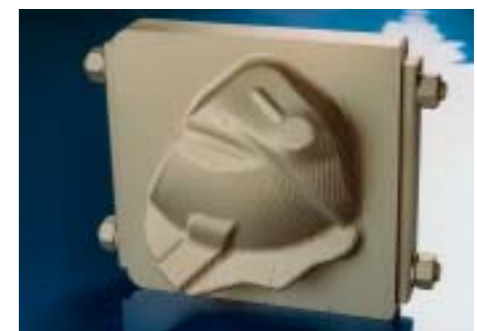
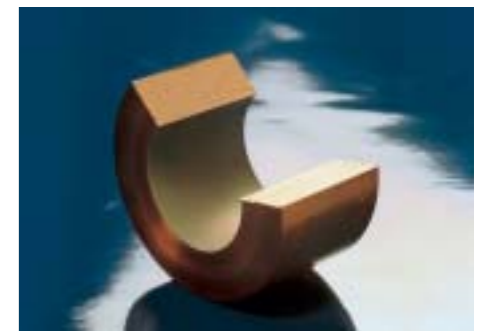




**Fraunhofer** Institut  
Werkstoff- und  
Strahltechnik

# Jahresbericht 2002







## Geleit

**Redaktion:** Die wirtschaftliche Situation war 2002 in Deutschland nicht besonders gut. Wie hat sich das IWS unter diesen Randbedingungen behauptet?

**Prof. Beyer:** Wir haben einen ausgeglichenen Haushalt und das herausragende Ergebnis von 2001 erreicht. Hierauf dürfen alle Mitarbeiter des IWS stolz sein.

**Redaktion:** Welche Ereignisse sind bei einem Rückblick auf 2002 besonders hervorzuheben?

**Prof. Beyer:** Zunächst gab es die Festveranstaltung "10 Jahre Fraunhofer-Gesellschaft in den neuen Bundesländern" im IWS mit Grundsteinlegung für unseren Anbau. Als besonderes Highlight kann jedoch die Bewilligung eines Großprojektes für den Lasereinsatz in der Luft- und Raumfahrt durch das Land Sachsen mit Unterstützung der Fraunhofer-Gesellschaft bezeichnet werden.

**Redaktion:** Gab es 2002 herausragende Ergebnisse im IWS, die zu nennen sind?

**Prof. Beyer:** 2002 ist es uns gelungen, den Weltrekord in der Reflektivität von Röntgenspiegeln für die Lithographie weiter zu verbessern.

Im Bereich des Verschleißschutzes konnten 10 µm dicke diamantähnliche Schichten abgeschieden werden. Bisher war die Schichtdicke aufgrund von Eigenspannungen auf ca. 1 µm begrenzt.

Vom IWS konnte ein neuartiges Verfahren zur Randschichtveredelung von ausscheidungshärtbaren Hochleistungsstählen entwickelt werden.

Dieses Verfahren wird im Turbinenbau zum Einsatz kommen.

**Redaktion:** Welche Überführungen von IWS-Entwicklungen in die industrielle Fertigung sind 2002 hervorzuheben?

**Prof. Beyer:** Zu nennen sind u.a. zwei Laserinduktions-Schweißanlagen, die in der Automobilindustrie installiert wurden, sowie eine prozessgeregelte Laserhärteanlage. Darüber hinaus konnte eine Vielzahl von IWS-Entwicklungen und -Komponenten in Fertigungsanlagen integriert werden.

Besonders zu erwähnen ist auch die erfolgreiche Inbetriebnahme der PVD-Bandbeschichtungsanlage im DOC und das neuartige ZE-Mg-Schichtsystem zum Korrosionsschutz. Die damit beschichteten Bleche sind selbst im Überlappstoß gut laserschweißbar.

**Redaktion:** Wie positioniert sich das IWS in den nächsten Jahren unter den wirtschaftlich immer schwieriger werdenden Bedingungen?

**Prof. Beyer:** Die Lasertechnik und die Oberflächentechnik sind Querschnittstechnologien. Damit besitzt das IWS zwei zukunftsorientierte Standbeine und ist für die kommenden Jahre gut gerüstet. Mit Bezug unseres Anbaus im Jahre 2003 / 2004 werden wir zusätzliche Arbeitsgebiete in Angriff nehmen können.

**Redaktion:** Vielen Dank für das Interview.

Vergangenheit bewerten  
Gegenwart gestalten  
in die Zukunft führen



Fraunhofer-Institut  
für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Winterbergstr. 28  
01277 Dresden

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

E-mail: [info@iws.fraunhofer.de](mailto:info@iws.fraunhofer.de)  
Internet: [www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

Geleit	3
Inhalt	5
Highlights des IWS im Jahr 2002	6
<b>Das Institut im Profil</b>	8
Kurzporträt	8
Organisation und Ansprechpartner	10
Anbindung an die TU Dresden	11
Zentren und externe Projektgruppen	12
Ausstattung des Institutes	16
<b>Das Institut in Zahlen</b>	18
<b>Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick</b>	20
<b>Kuratorium und Gremien</b>	21
<b>FuE-Angebot</b>	22
Röntgen- und EUV-Optik	22
Dünnschichttechnologie	34
Thermische Beschichtungsverfahren	50
Füge- und Randschichttechnologien	60
Laserabtragen und -trennen	76
Multimedia / Simulation	88
<b>Namen, Daten und Ereignisse</b>	97
Diplomarbeiten und Dissertationen	97
Vorlesungen und Mitarbeit in Gremien	98
Besondere Ereignisse	99
Preise des IWS 2002	99
Messebeteiligungen	100
<b>Patente, Gebrauchsmuster und Marken</b>	102
<b>Veröffentlichungen</b>	104
<b>Tagungsvorträge</b>	107
<b>Informationsservice</b>	112
<b>Kontaktadressen und Anfahrt</b>	113





### 10 Jahre IWS

Anlässlich der Jubiläumsveranstaltung 10 Jahre Fraunhofer in den neuen Bundesländern besuchten:

- Fr. E. Bulmahn, Ministerin BMBF
- Prof. Dr. K. Biedenkopf, Ministerpräsident Sachsen
- Prof. Dr. H.-J. Meyer, Minister SMWK Sachsen
- Dr. W. Eichler, Staatssekretär im Kultusministerium Sachsen-Anhalt
- Dr. K.-D. Vöhringer, Senatsvorsitzender der Fraunhofer-Gesellschaft

sowie 200 Gäste das IWS. Die Festveranstaltung wurde vom IWS live ins Internet übertragen und von ca. 1600 Zuhörern verfolgt.



Jubiläumsveranstaltung 10 Jahre Fraunhofer in den neuen Bundesländern

### ICALEO im Internet

Anlässlich der Präsidentschaft des Laserinstituts von Amerika (LIA) von Prof. Beyer wurde die weltweit größte Lasertagung, die ICALEO, mit Ton und Bild vollständig ins Internet gebarcht.

Die Arbeiten des IWS für das LIA stellen eine Weltpremiere dar.



Edelgard Bulmahn, Bundesministerin für Bildung und Forschung (oben), Prof. Dr. Kurt Biedenkopf, Ministerpräsident des Freistaates Sachsen (Mitte) und Prof. Dr. Hans-Jürgen Warnecke, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft auf der Festveranstaltung zum 10jährigen Bestehen der Fraunhofer-Gesellschaft in den neuen Bundesländern



Peter Baker, LIA (links) und Eckhard Beyer während der ICALEO 2002



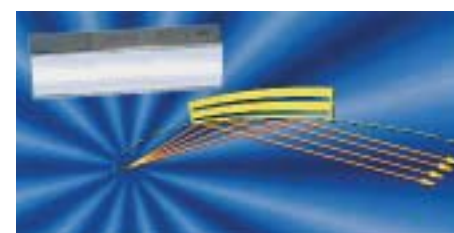
Im geplanten Airbus A380 kommen zukünftig auch Laserschweißverbindungen zum Einsatz

### IWS erhält Großprojekt zum Laserschweißen von Rumpfstrukturen für Airbus

Im Juli 2002 erfolgte der Startschuß für ein Großprojekt, daß es ermöglichen soll, Technologien zum Fügen von großformatigen Flugzeug-Rumpfstrukturen für die Firma Airbus zu entwickeln. Ziel ist es, bei Bauteilen bis zu 10 m Länge und 3 m Breite das Nieten durch das effektivere und Gewicht sparende Laserstrahlschweißen zu ersetzen. Die für die dazu nötigen Vorlauf Forschungen konzipierte unikale und vom SMWK geförderte sowie der Fraunhofer-Gesellschaft unterstützte Großanlage wird Anfang 2004 zur Verfügung stehen.

### Weltrekord bei EUV-Spiegeln verbessert

Bei EUV-Spiegeln ist jedes Prozent Reflektivität extrem wichtig. Im IWS wurden 2002 Spiegel mit 71,4 % Reflektivität hergestellt. Dieser Wert wurde bisher weltweit nicht erreicht. Die Ergebnisse des IWS stellen einen wichtigen Schritt für die Entwicklung der Röntgenlithographie dar.



Röntgenoptische Anordnung, basierend auf den im IWS hergestellten Röntgenoptiken

### IWS-Entwicklungen und Überführung in die industrielle Fertigung

Mit den Anlageninbetriebnahmen bei Getrag Ford Transmissions Köln und Volkswagen Wolfsburg ist es im vergangenen Jahr gelungen, zwei weitere Technologieentwicklungen zum induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen in die Serienfertigung zu überführen. Damit befinden sich jetzt bereits sechs Laser-Induktionsanlagen im Serieneinsatz. Weitere werden in Kürze folgen.

Darüber hinaus konnten vom IWS entwickelte Verfahren und Spezialanlagen zum Laserbehandeln von Oberflächen überführt werden.

*Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden; es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.*  
Johann Wolfgang von Goethe



Laserinduktionsschweißanlage im Serieneinsatz bei Getrag Ford Transmissions Köln



Laserinduktionsschweißanlage im Serieneinsatz bei Volkswagen Wolfsburg

Alles sollte so einfach wie möglich sein -  
aber nicht einfacher.

Albert Einstein

### 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.

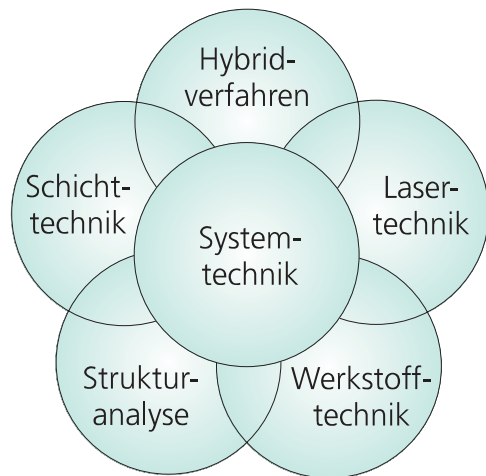
Durch die enge Zusammenarbeit mit Anlagen- und Systemanbietern können wir unseren Kunden *Problemlösungen aus einer Hand* anbieten. Diese beruhen auf neuartigen Konzepten. Als Basis hierfür dient die Gesamtbetrachtung des Bearbeitungssystems, des Verfahrens sowie des Bauteilverhaltens. Die Ausstattung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

### Lasertechnik

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

### Schichttechnik

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



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.

### 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

### 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.

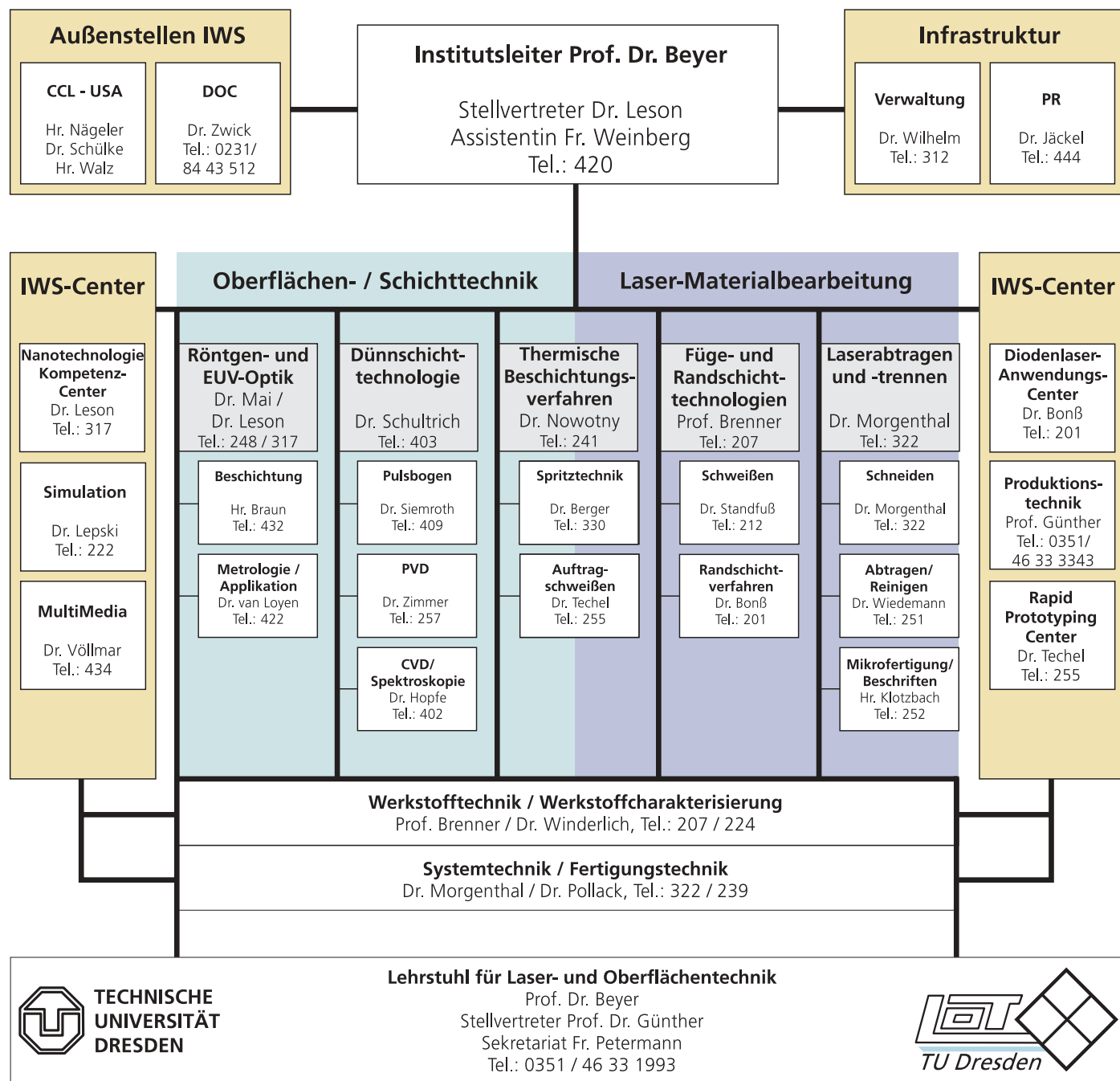
### Geschäftsfelder

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		■	■	■	
Prototyping	■		■		□
Prozess-Monitoring	■	■			□

Internet: [www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)



## Organisation und Ansprechpartner



## Anbindung an die TU Dresden

### Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik

2002 waren am Lehrstuhl 38 Mitarbeiter beschäftigt. Die Drittmittelträge lagen über 1 Mio. €.

Der Lehrstuhl ist eingegliedert in die Produktionstechnik der TU. Die durchgeführten Projekte sind stärker grundlagenorientiert und ergänzend zu den Arbeiten des IWS angelegt.

Die Arbeitsgruppen behandeln folgende Themen:

- Fertigungsgestaltung
- Lasertechnik
- Oberflächentechnik
- Schichttechnik
- Klebtechnik

Folgende Vorlesungen wurden angeboten:

- Prof. Beyer: Fertigungstechnik II (Oberflächen- und Beschichtungs-technik)
- Dr. Schultrich, Prof. Beyer: Schicht-technologie
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächen-technik / Nanotechnologie
- Prof. Beyer: Lasergrundlagen / Lasersystemtechnik
- Prof. Beyer: Laser und Plasmen in der Fertigungstechnik (Mechatronik)

Die Vorlesungen sind auf Basis von Multimedia-Techniken aufgebaut.



CD zur Vorlesung Fertigungstechnik 2

### Kooperation Fraunhofer IWS - TU Dresden

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

Vorteile für das IWS:

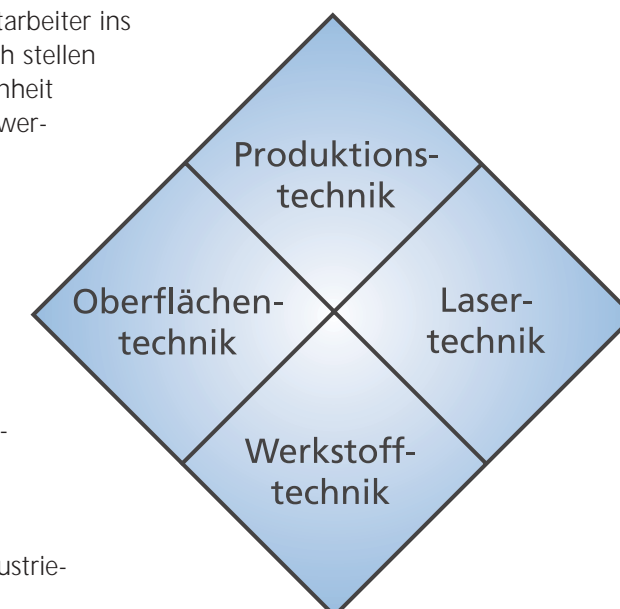
- kostengünstige Grundlagenforschung
- Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern für das IWS
- Zugang zu wissenschaftlichen Hilfskräften

Vorteile für die TU:

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

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

Jose Ortega y Gasset



CD Laserlexikon (Informationen auch unter [www.laserlexikon.de](http://www.laserlexikon.de))



CD zur Vorlesung Lasersystemtechnik

## Zentren und externe Projektgruppen des Fraunhofer IWS

*Erfolg hat nur, wer etwas tut,  
während er auf den Erfolg wartet.*  
T. A. Edison

### Nanotechnologie-Kompetenz-zentrum "Ultradünne funktionale Schichten"

Die Nanotechnologie gehört zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Bereits heute gibt es marktreife Produkte: Festplatten und Leseköpfe für die Datenspeicherung, die mit 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 Schlüsselement der Nanotechnologie.

Zur konsequenten Erschließung dieser industriellen Anwendungsmöglichkeiten haben 49 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 2002 war die Durchführung des europäischen Nanotechnologie-Symposiums "Nanofair 2002", das 200 Teilnehmer aus Industrie und Wissenschaft zusammenführte und maßgeblich vom Kompetenzzentrum und vom IWS mitgestaltet wurde.



Intensive Gespräche am Rande der Nanofair: Dr. Leson im Gespräch mit Nobelpreisträger Prof. Jean-Marie Lehn



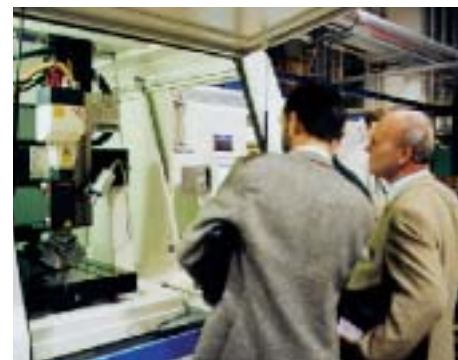
Arbeitskreise des Nanotechnologie-Kompetenzentrums

### Anwendungszentrum Hochleistungs-Diodenlaser

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

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

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



Anlage zum Härten mit integriertem HLDL in der Laserhalle des IWS

### Produktionstechnisches Zentrum

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

Arbeitsschwerpunkte:

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



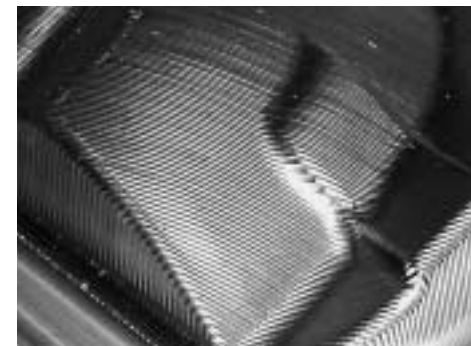
Strahltechnologie: Wasserstrahl-Abrasiv-Schneidanlage

### Rapid-Prototyping-Zentrum

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

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

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



Oberfläche eines durch Metall-LOM hergestellten Werkzeugs



Laserintegriertes CNC-Fräszentrum



Lamellierter Rohling eines Prägwerkzeugs



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

Viktor Hugo

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



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

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.

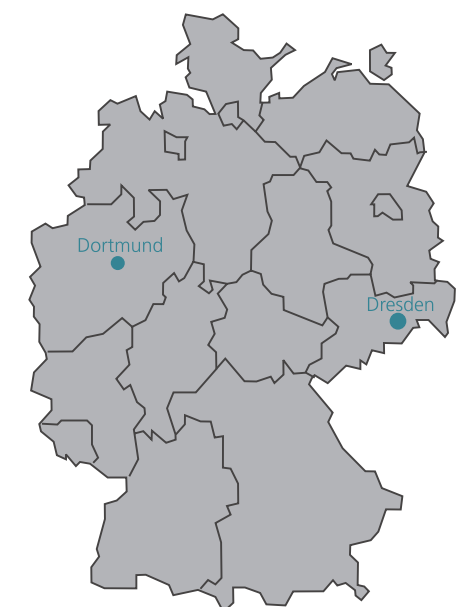
Ein erstes, herausragendes Ergebnis dieser Zusammenarbeit sind neuartige Zink-Legierungsüberzüge (ZE-Mg), die auf dem DOC-Symposium im Dezember 2002 vorgestellt wurden. Sie vereinen bei einer Halbierung der Überzugsdicke die sehr gute Korrosionsbeständigkeit bewährter Zinküberzüge mit einer wesentlich verbesserten Bearbeitbarkeit, wie die Fraunhofer-Projektgruppe für die Laserschweißbeignung zeigen konnte.

Darüber hinaus bietet die Fraunhofer-Projektgruppe auf 1100 m<sup>2</sup> Neubaufläche eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredelung. Mit modernster Anlagentechnik lassen sich nahezu porenfreie und äußerst haftfeste Plasmaspritzschichten herstellen, hoch beanspruchte Bereiche von Bauteilen und Werkzeugen mit dem Laserauftragschweißen gezielt mit millimeterdicken Verschleißschutzschichten panzern und metergroße und tonnenschwere Teile im Vakuum (PVD, PACVD, PDT) mit nano- bis mikrometerdicken Höchstleistungsschichten, z.B. mit Diamor®-Schichtsystemen, versehen, die eine überragende Härte mit exzellenten Gleiteigenschaften verbinden.

Die breite Palette dieser Verfahren, die sich teilweise untereinander kombinieren lassen, bieten im Verein 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.



Gebäude des Dortmunder OberflächenCentrums



### Fraunhofer Center for Coatings and Laser Applications (CCL)



**Christian Walz**  
Division Manager  
CCL / USA  
Tel. 1-734-354-6300



**Dr. Thomas Schülke**  
Division Manager  
CCL / USA  
Tel. 1-517-432 8173

Im Zuge des Ausbaus der USA-Aktivitäten des Fraunhofer IWS Dresden erfolgte im Sommer 2002 eine Umbenennung des bisherigen "Center for Surface and Laser Processing CSLP" in "Fraunhofer Center for Coatings and Laser Applications CCL". Seit Dezember 2002 wird das CCL von Prof. Dr. Jes Asmussen geleitet. Prof. Asmussen ist faculty member der Michigan State University. Er ist Experte für Diamantbeschichtungen. Seine bisherigen Arbeiten ergänzen in idealer Weise das Know-how des IWS auf dem Gebiet der DLC-Beschichtungen. Unter Leitung von Prof. Asmussen soll in Lansing ein Kohlenstoffcenter aufgebaut werden.

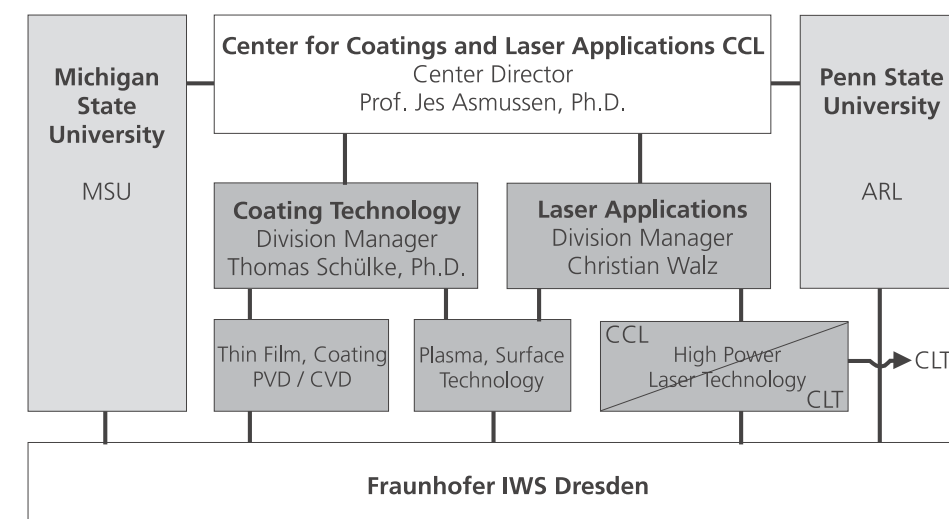
Das CCL hat 2 Divisions, die "Coating Technology Division" an der Michigan State University in East Lansing unter Leitung von Dr. Thomas Schülke, und die "Laser Applications Division" im Gebäude des Headquarters von Fraunhofer USA unter der neuen Leitung von Christian Walz. Mit dieser Umstrukturierung und dem Umzug in neue, größere Räumlichkeiten wurden die Weichen gestellt, um zukünftig noch besser und schneller auf die Anforderungen unserer industriellen Kunden in den USA reagieren zu können.

Im Laserbereich (Laser Applications Division) wurden unter Leitung des Fraunhofer IWS Dresden gemeinsame Projekte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ILT Aachen durchgeführt. Diese Kooperation soll zukünftig noch weiter ausgebaut werden. Über das CCL wurden im letzten Jahr eine Reihe von Projekten akquiriert, in die das IWS in Dresden direkt integriert war. Darüber hinaus konnten IWS-Mitarbeiter im Rahmen von FuE-Projekten für einen längeren Zeitraum (3 Monate) in US-Firmen arbeiten. Letztlich konnten auch deutsche (sächsische) kleine und mittelständische Unternehmen in Systemlösungen für US-Firmen integriert werden.

Im Beschichtungsbereich (Coating Technology Division) können mit der vorhandenen Anlagentechnik dünne Verschleißschutzschichten aus TiN, (Ti, Al)N und anderen Hartstoffen abgeschieden werden. Die zerstörungsfreie Prüfung der Schichten ist mit dem im IWS entwickelten laserakustischen Messplatz LAwave® möglich, der im vergangenen Jahr insbesondere für Aufgaben und Projekte der Halbleiter- und Mikroelektronik eingesetzt wurde. Das laserakustische Prüfverfahren LAwave® wurde im Oktober 2001 mit dem "R&D 100 Award" ausgezeichnet.



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



## Ausstattung des Institutes

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

Helmar Nahr

### Laserstrahlquellen

mehrere CO<sub>2</sub>-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 2,5 kW

TEA-CO<sub>2</sub>-Laser

Excimerlaser (248 nm)

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

gepulster Nd:YAG-Laser mit OPO

### Handlingsysteme

Portalanlagen mit 5-CNC-Achsen (plus  
externer Drehachse), Arbeitsraum  
4000 · 3000 · 1500 mm<sup>3</sup>, mit CO<sub>2</sub>-  
Laserstrahlquellen 2,5 bis 6 kW

CNC-Laser-Bearbeitungsanlagen  
mit 8 Achsen, Geschwindigkeiten bis  
20 m min<sup>-1</sup>, Arbeitsraum 2400 · 1800  
· 600 mm<sup>3</sup>, mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen  
2,5 bis 6 kW

Laserinduktions-Hybridanlage mit  
5 Achsen (6 kW-CO<sub>2</sub>-Laser, 80 kW-  
MF-Induktionsgenerator)

Präzisionsanlagen (Genauigkeitsklasse  
5 µm) mit 5 bzw. 4 CNC-Achsen, mit  
CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle bis 6 kW

CO<sub>2</sub>-Nd:YAG-Kombinationsanlage  
(2 bzw. 3 kW) mit 4 CNC-Achsen für  
Präzisionsbeschichtung

Schneidmaschine mit Linearantrieben  
bis 300 m min<sup>-1</sup> Vorschub und CO<sub>2</sub>-  
Laserstrahlquelle bis 3,5 kW

universelle Excimer-Laser-Mikrostruk-  
turierungsanlage

### Beschichtungsanlagen

Laser-PVD-Beschichtungsanlagen  
(Nd:YAG-, Excimer-, TEA-CO<sub>2</sub>-Laser)  
im Hochvakuum- und Ultrahoch-  
vakuumbereich

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

Laser-CVD-Anlage mit 6 kW-CO<sub>2</sub>-Laser  
und Lampen-CVD-Anlage (24 kW) zur  
Faserbeschichtung

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

6" -Cluster-Tool-Anlage zur Kombina-  
tion von Großflächen-PLD und Magne-  
tron-Sputterverfahren

Kombinations-Beschichtungsanlage  
(Elektronenstrahl (40 kW) und Hoch-  
strombogen)

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

Anlage zum laserunterstützten atmo-  
sphärischen Plasmaspritzen (LAAPS)

### Spezielle Komponenten

statische und flexible dynamische  
Strahlformungssysteme für Laser-  
leistungen bis 10 kW

CNC- bzw. sensorgesteuerter Draht-  
förderer für das Laserschweißen

Pulverförderer und Spezialausrüstun-  
gen zum richtungsunabhängigen  
Laserstrahlbeschichten sowie Tempera-  
turmesssystem zur geregelten Prozess-  
führung

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

Strahldiagnosesysteme für CO<sub>2</sub>- und  
Nd:YAG-Laser

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

Messtechnik zur Kurzzeit-Prozessanaly-  
se (4-Kanal-Hochgeschwindigkeits-Bild-  
verstärkerkamera)

### Spezielle Bearbeitungsanlagen

mobiler 4 kW-Nd:YAG-Laser im Con-  
tainer

Rapid-Prototyping-Anlage zum Laser-  
sintern

transportabler Nd:YAG-Laser mit  
5 · 10<sup>7</sup> Watt Pulsspitzenleistung (Puls-  
dauer 6 ns, max. Pulsfrequenz 20 Hz)  
mit Gelenkarm-Strahlübertragung und  
Zoomoptik für Reinigungsarbeiten im  
Außeneinsatz

durchstimmbares Laserbearbeitungs-  
system (Wellenlänge 400 ... 2000 nm,  
> 100 mJ) mit flexiblem Strahlarm und  
CNC-Bauteilbewegung für das Abtra-  
gen dünner Schichten

Laserbearbeitungsstation mit Industrie-  
roboter und CO<sub>2</sub>-Slab-Laser

CNC-Bearbeitungszentrum zum  
5-Achs-Fräsen und Auftragschweißen

laserintegriertes CNC-Fräszentrum zum  
Generieren und Reparieren

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

### Messgeräte

Ausrüstung zur Gefügeanalyse ein-  
schließlich:

- Metallographie
- analytischer Transmissionselektronen-  
mikroskopie
- analytischer Rasterelektronenmikro-  
skopie
- entsprechender Präparationstechnik

Ausrüstung zur Werkstoffprüfung:

- servohydraulische Prüfmaschine,
- mechanische Zug- / Druck-Prüfma-  
schine
- Kerbschlagpendel
- Härteprüfautomat
- rechnergestütztes Mikrohärteprüf-  
system
- Resonanzermüdungsapparat
- Flachbiege-Torsions-Maschine

Laserakustik-Messsysteme zur Bestim-  
mung des E-Moduls von Schichten

Laserschock-Messsystem mit Hoch-  
geschwindigkeitspyrometer

Ausrüstung zur Oberflächen- und  
Schichtanalyse:

- vollautomatisches Spektralellipsome-  
ter (270 - 1700 nm)
- UV-VIS-Spektrometer
- Raman-Mikrospektrometer
- FTIR-Spektrometer, FTIR-Mikroskop
- registrierendes Eindruckmessgerät
- Scratchtester
- Rauheitsmessgerät
- Tribometer
- Röntgenfluoreszenz-Schichtdicken-  
messgerät
- Flächenwiderstandsmessgerät

Röntgendiffraktometer (CuKα)  
Röntgendiffraktometer (MoKα)

optisches 3D-Koordinatenmesssystem



Blick in die Technikumshalle des IWS



Hochgeschwindigkeits-Laserschneidmaschine



Atmosphärische Plasmaspritze mit  
Laserkopplung



Vakuum-Plasmaspritzeanlage



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



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



Bei der Eroberung des Weltraums sind zwei Probleme zu lösen: Die Schwerkraft und der Papierkrieg. Mit der Schwerkraft wären wir fertig geworden.

Wernher von Braun

### 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 2002 wie folgt auf:

#### Mitarbeiter im Fraunhofer IWS

	Anzahl
<b>Stammpersonal</b>	<b>110</b>
- Wissenschaftler	66
- Technische Angestellte	35
- Verwaltungsangestellte	9
<b>Lehrlinge</b>	<b>12</b>
<b>Wissenschaftliche Hilfskräfte</b>	<b>60</b>
<b>Gesamt</b>	<b>182</b>

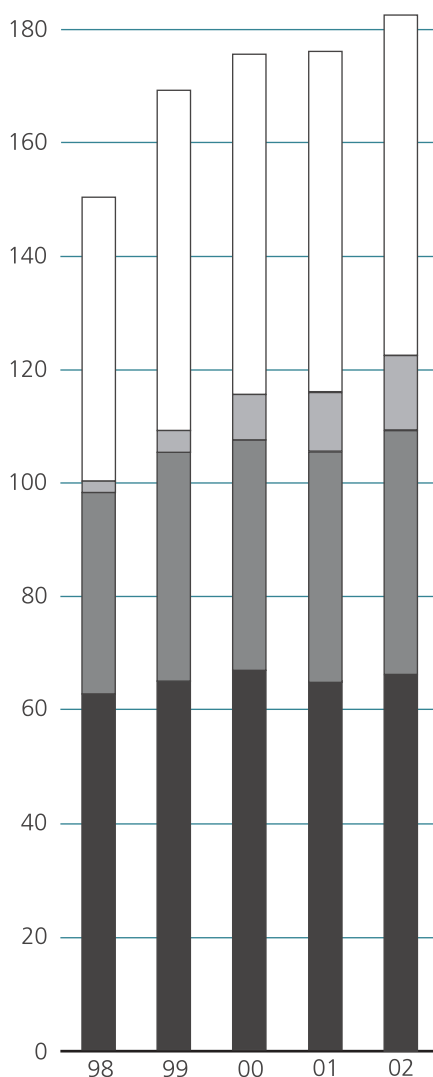
#### Mitarbeiter am Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik der TU Dresden

	Anzahl
<b>Stammpersonal</b>	<b>30</b>
- Wissenschaftler	22
- Technische Angestellte	6
- Verwaltungsangestellte	2
<b>Wissenschaftliche Hilfskräfte</b>	<b>8</b>
<b>Gesamt</b>	<b>38</b>

#### Gebäude

- Technikumshalle	5050 m <sup>2</sup>
- Laborräume	1200 m <sup>2</sup>
- Büroräume	1760 m <sup>2</sup>
- Infrastrukturräume	1550 m <sup>2</sup>
- Technikum im DOC (Dortmund)	540 m <sup>2</sup>
	1100 m <sup>2</sup>

Anzahl der Mitarbeiter im IWS



□ studentische Hilfskräfte  
 □ Lehrlinge  
 ■ Technik / Verwaltung  
 ■ Wissenschaftler und Doktoranden

### Aufwendungen und Erträge 2002 (vorläufiges Ergebnis\*)

\* Nachkalkulation noch nicht erfolgt

**Aufwendungen Betrieb und Investitionen 2002** **Mio. €**  
 13,0

**Betriebshaushalt** **Mio. €**  
 11,0  
 - Personalaufwendungen 5,6  
 - Sachaufwendungen 5,4

**Investitionshaushalt** **Mio. €**  
 2,0

**Erträge 2002** **Mio. €** **%**  
 13,0

**Erträge Betrieb** **Mio. €** **%**  
 11,0  
 - Projekterträge aus der Industrie 4,9 45  
 - Projekterträge durch Bund, Land und EU 3,9 35  
 - Grundfinanzierung IWS 2,2 20

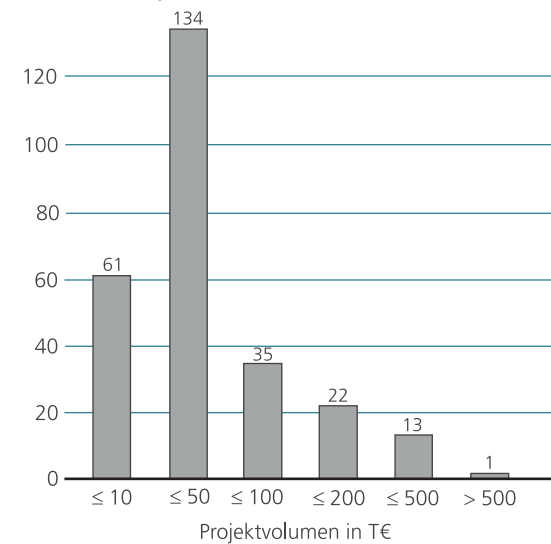
**Erträge Investitionen** **Mio. €**  
 2,0  
 - Projekterträge aus der Industrie 0,4  
 - Projekterträge durch Bund, Land und EU 0,5  
 - Grundfinanzierung IWS 1,1

Im Jahr 2002 wurden dem IWS von der Fraunhofer-Gesellschaft zusätzlich strategische Investitionen in Höhe von 1,0 Mio. € zur Verfügung gestellt.

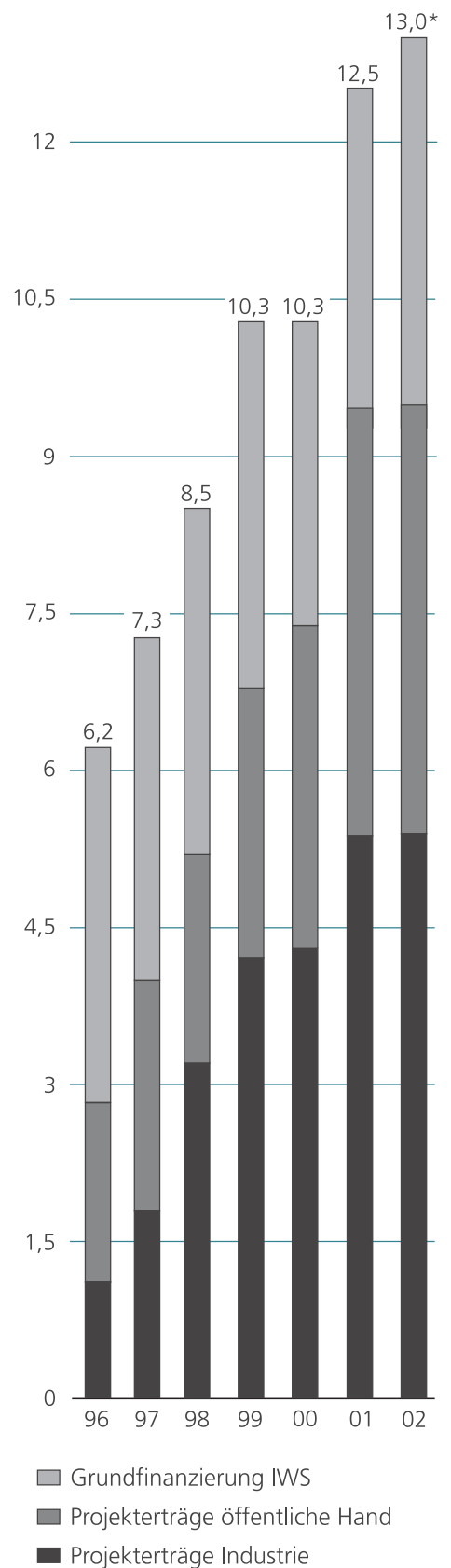
### Projekte

Im Jahr 2002 wurden am IWS 266 Projekte durchgeführt. Die Aufteilung der Projekte nach ihrem finanziellen Volumen ist in der folgenden Grafik dargestellt. So wurden beispielsweise 134 Projekte mit einem finanziellen Volumen von 10 ... 50 T€ bearbeitet.

Anzahl der Projekte



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





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

Albert Einstein

### Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. Im Auftrag und mit Förderung durch Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in der Wirtschaft beitragen.

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

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

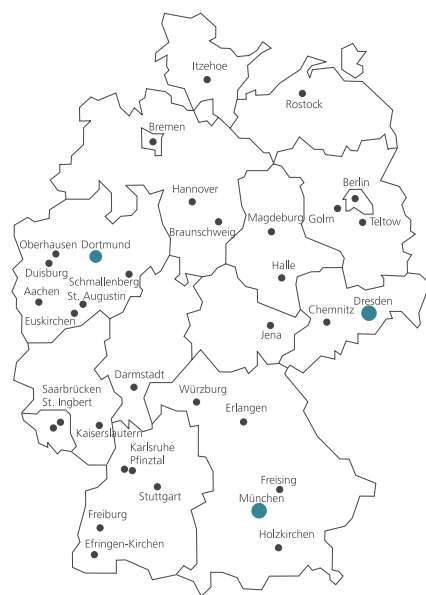
Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit rund 80 Forschungseinrichtungen, davon 57 Institute, an über 40 Standorten in ganz Deutschland. Rund 13 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von etwa einer Milliarde €. Davon fallen etwa 900 Millionen € auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Für rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft Erträge aus

Aufträgen der Industrie und öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, um damit den Instituten die Möglichkeit zu geben, Problemlösungen vorzubereiten, die in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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

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

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



### Kuratorium

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

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

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

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

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

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

**H. Ennen**, MinR. Dr.  
Sachsenbüro Brüssel

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

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

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

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

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

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

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

Die 12. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 27. Februar 2002 im Fraunhofer IWS Dresden statt.

### Institutsleitungsausschuss (ILA)

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

Mitglieder des ILA sind:

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

Gäste sind:

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

### Wissenschaftlich-Technischer Rat (WTR)

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

- Prof. Dr. E. Beyer
- Dr. S. Bonß

### Verbund Oberflächentechnik und Photonik (VOP)

Das IWS ist Mitglied des Verbundes Oberflächentechnik und Photonik. Dem Verbund gehören an:

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

## FuE-Angebot: Röntgen- und EUV-Optik

**Redaktion:** Im Jahr 2002 wurde ein Unternehmen aus Ihrer Abteilung aus-gegründet, welches sich mit der Her-stellung von Röntgenspiegeln befasst. Was hat zu diesem Schritt geführt?

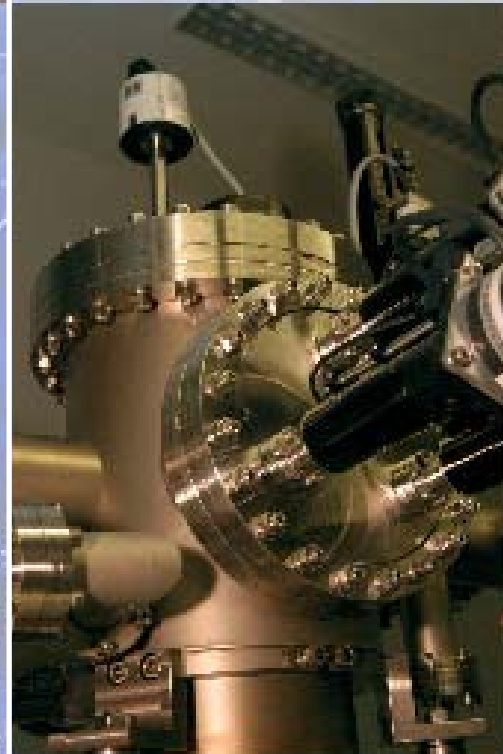
**Dr. Leson:** Das IWS hat sich in den letzten Jahren eine international führende Position auf dem Gebiet der Nanometermultischichtsysteme und den darauf basierenden Röntgenoptiken erarbeitet. Die gleichzeitig stark gestiegene Nachfrage von Anwendern von Optiken für die Röntgenanalytik bildete damit gute Voraussetzungen für eine Ausgründung. Seit Juli 2002 hat die AXO Dresden GmbH die Ferti-gung und den Vertrieb von Röntgen-spiegeln auf der Basis von IWS-Lizen-zen übernommen. Geschäftsführer des neuen Unternehmens ist Herr Tho-mas Holz, ehemaliger Mitarbeiter des Fraunhofer IWS Dresden.

**Redaktion:** Im vergangenen Jahr haben Sie nicht nur Fortschritte bei der Entwicklung neuer röntgenoptischer Komponenten im harten Bereich erzielt, sondern auch bei langen Wel-lenlängen, dem sogenannten EUV-Bereich. Welche Erfolge konnten Sie hier erzielen?

**Dr. Leson:** Nachdem wir im Jahre 2001 bei EUV-Spiegeln auf der Basis des Systems Molybdän-Silizium bereits mit einer Reflektivität von 71,4 % einen internationalen Spitzenwert erzielen konnten, gelang es uns 2002 bei der für die Anwendung in der Lithographie relevanten Arbeitswellen-länge von 13,4 nm die 70 %-Schall-mauer zu durchbrechen und uns damit erneut an die Weltspitze zu setzen. Die Reflektivitätswerte werden von der unabhängigen Physikalisch-Techni-schen Bundesanstalt gemessen. Zudem konnten wir wesentliche Fortschritte bei der Realisierung freidefinierbarer Schichtdickengradienten und an Tem-peraturstabilität erzielen.

**Redaktion:** In einem großen Projekt mit der Fa. Carl Zeiss planen Sie den Aufbau eines EUV-Reflektometers. Wie ist dort der aktuelle Stand?

**Dr. Leson:** Unser Dresdner Institutsgelände platzt momentan aus allen Nähten, deshalb wird derzeit auch ein Anbau errichtet. Mit dem großen Zeiss-Reflektometer konnten wir aber nicht bis zur Fertigstellung warten, so dass wir es jetzt in angemieteten Räu-men in Dresden aufbauen. Nach der Probephase wird das Gerät dann 2003 zu Carl Zeiss nach Oberkochen umge-setzt, wo wir es gemeinsam mit Carl Zeiss und anderen Projektpartnern für Messungen im EUV-Bereich nutzen werden.



*Anyone who has never made a mistake  
has never tried anything new.*

Albert Einstein



Dr. Andreas Leson  
Abteilungsleiter  
(Tel. 2583 317)



Dipl.-Phys. Stefan Braun  
Gruppenleiter Beschichtung  
(Tel. 2583 432)

### Multischichten für EUV- und röntgenoptische Anwendungen

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

- höchste Schichtdickengenauigkeit,
  - geringste Grenzflächenrauigkeiten,
  - hohe chemische Reinheit,
  - hohe laterale Homogenität und
  - sehr gute Dickenreproduzierbarkeit.
- Schichtsysteme unterschiedlicher Materialkombinationen können auf ebenen oder gekrümmten Substraten mit bis zu 150 mm Durchmesser mit und ohne Gradient der Periodendicke abgeschieden werden.

Das Hauptanwendungsgebiet solcher Multischichten ist der Einsatz als röntgenoptisches Bauelement zur Strahlformung und Monochromatisierung. Neben der Synthese von Einfach- und Multischichten (z.B. Mo/Si, Ni/C, Cr/Sc, W/Si, W/B<sub>4</sub>C, C/C, B<sub>4</sub>C/Si) 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 248)

### Metrologie und Applikation

Arbeitsschwerpunkte sind die Reflektometrie, die Diffraktometrie sowie die Weiterentwicklung von Optiksyste-men und Messverfahren.

Mit Standard-Röntgenanalysegeräten werden unter Einsatz von Cu-K $\alpha$ - bzw. Mo-K $\alpha$ -Strahlung zerstörungsfreie Messungen zur Bestimmung von Schichtdicken, Schichtrauheiten und Dichten sowie zur qualitativen Phasenanalyse, vornehmlich an dünnen und / oder Multilagenschichten, aber auch z.B. an Pulvern, durchgeführt. Zur Optimierung der Analyseverfahren wurden spezielle strahlformende Optiken wie Beamkollimator und Beamkompressor entwickelt.

Optikkomponenten für Anwendungen im Bereich der extremen ultravioletten (EUV) Strahlung erfordern auch deren Charakterisierung im EUV-Bereich. Wir haben deshalb ein spezielles Labor-Gerät, ein EUV-Reflektometer, für Untersuchungen bei Wellenlängen von 10 bis 16 nm aufgebaut.



Gesamtansicht des EUV-Reflektometers

### Beispiele aus den Arbeiten 2002

1. Röntgenoptische Systeme für Reflektometrie und Diffraktometrie 26
2. Hochreflektierende EUV-Beschichtungen auf ebenen und gekrümmten Oberflächen 28
3. Hochauflösende nm-Multischichten für den EUV- und Röntgenbereich 30
4. Maßgeschneiderte Innenbeschichtungen von Bauteilen 31
5. Labor-Reflektometer für große Optik-Komponenten im Wellenlängenbereich von 10 - 16 nm 32



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



## Röntgenoptische Systeme für Reflektometrie und Diffraktometrie

## Aufgabenstellung

Der Einsatz von Nanometer-Multischichten als Röntgenoptiken hat zu einer deutlichen Erweiterung der analytischen Möglichkeiten geführt. Dies gilt sowohl für den Einsatz von Labor-Röntgenquellen als auch auf dem Gebiet der Synchrotronstrahlung. Mit einer wachsenden Zahl von Anwendungen sind mehr und mehr qualifizierte Röntgenoptiken gefragt, welche sowohl auf den vorgesehenen Spektralbereich als auch auf das jeweilige Messproblem zugeschnitten sind. Dazu ist es erforderlich, die spezielle Charakteristik der zur Verfügung stehenden Quelle über eine angepasste Optik in der Messanordnung an die Erfordernisse der Probe bzw. des Messproblems anzupassen. Nur so kann ein Nutzstrahl zur Verfügung gestellt werden, der in seinen Parametern eine hohe Leistungsfähigkeit für die gewünschte Applikation garantiert. Speziell für Anwendungen in der Mikro- und in der Einkristalldiffraktometrie sowie in der Röntgen-Reflektometrie werden hochbrillante, monochromatische Nutzstrahlen mit sub-Millimeter-Abmessungen am Probenort benötigt, um effiziente Messungen mit einer hohen Winkel- bzw. Ortsauflösung zu gestatten.

## Lösungsweg

Gegenwärtig werden drei Typen unterschiedlich gekrümmter lateral gradierter Multischichtoptiken in der Röntgenanalytik verwendet: ebene sowie parabolisch oder elliptisch gekrümmte Optiken, mit denen divergente bzw. parallele oder fokussierende monochromatische Strahlenbündel erzeugt werden können. Die Abscheidung dieser Nanometer-Gradientenmultischichten stellt extreme Anforderungen an

den jeweiligen Abscheideprozess bezüglich Präzision, Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität. Über einen Stapel von mehr als 500 Einzelschichten mit Dicken im Bereich zwischen 1 bis 10 nm müssen mittlere Abweichungen von der Einzelschichtdicke kleiner 0,1 nm und Grenzschichtrauheiten unterhalb 0,25 nm eingehalten werden. Über makroskopische Substratmessungen von mehr als 100 mm sind Schichtdickenhomogenitäten besser 99 % sowie laterale Schichtdickengradienten im Bereich von  $10^{-8}$  zu gewährleisten.

Das Magnetron-Sputtern und die Elektronenstrahlverdampfung sind etablierte Abscheidetechnologien zur Herstellung solcher röntgenoptischen Multischichten. Für spezielle Materialkombinationen sowie für zugeschnittene Schichtdickenprofile wurde die Puls Laser Deposition (PLD) als eine weitere interessante Alternative zu den oben genannten dominierenden Technologien entwickelt. Als ein Ergebnis der mit dem PLD-Verfahren erzielten Präzision ist es möglich, Gradientenmultischichten aus unterschiedlichen Materialkombinationen sowohl auf ebenen als auch auf vorgekrümmten Substraten abzuscheiden. Damit besteht die Möglichkeit, strahlformende Röntgenoptiken für die verschiedensten Geometrien und unterschiedlichsten Wellenlängen herzustellen. Neben dem Einsatz von EinzeLOPTIKEN können durch die Kombination von geeigneten Multischichtoptiken bzw. durch die Kombination von Multischichtoptiken mit Kristall- oder KapillaroPTIKEN völlig neuartige Strahlqualitäten erzielt werden.

## Ergebnisse

Gegenwärtig sind parabolische, elliptische und planare Nanometer-Multischichtoptiken verschiedenster Geometrien für alle typischen Spektrallinien (zum Beispiel: Cr  $K\alpha$ -, Co  $K\alpha$ -, Cu  $K\alpha$ -, Mo  $K\alpha$ -, Ag  $K\alpha$ -Strahlung) verfügbar. Durch die Kombination von zwei Parallelstrahl-optiken jeweils auf der Primär- und der Detektorseite können in einem sogenannten "Twin-Mirror-Arrangement" (TMA) unter Verwendung des Materialsystems Ni/C sehr hohe Intensitäten von mehr als  $2 \cdot 10^9$  cps in Kombination mit einer geringen Divergenz  $\Delta\Phi < 0,02^\circ$  und einer hervorragenden Unterdrückung des Anteils der Cu  $K\beta$ -Strahlung von  $I(\text{Cu } K\alpha_1) : I(\text{Cu } K\beta) \geq 10^6$  realisiert werden. Die Ausrichtung von zwei Parallelstrahl-optiken auf einen gemeinsamen Fokus (Abb. 1) liefert einen monochromatischen Parallelstrahl mit sub-Millimeter-Ausdehnung, geringer Divergenz und einer Intensität größer  $10^6$  cps, wenn das System auf den Punktfokus einer Röntgenquelle gerichtet wird. Vorteile dieses Strahlkollimators (Abb. 2) sind die universelle Montagemöglichkeit sowie die weitestgehende Unabhängigkeit des Einfallswinkels auf der Probe von Instabilitäten der Röntgenquelle auf Grund der symmetrischen Anordnung der Röntgenoptiken. Eine weitere Intensitätserhöhung in kleinen Strahlquerschnitten bzw. bei geringen Strahlbreiten wird durch den Einsatz eines Strahlkompressors erzielt. Die Kombination einer fokussierenden Parallelstrahl-optik mit einer konvex gekrümmten Parallelstrahl-optik (Abb. 4) am Punktfokus liefert einen komprimierten hochbrillianten und monochromatischen sub-Millimeter Röntgenstrahl mit

einstellbarer Strahlbreite  $b$  am Probenort. Der Einsatz dieses Systems in der Röntgenreflektometrie speziell an Gradientenmultischichten bzw. an gekrümmten Substratoberflächen liefert trotz kleiner Punktstrahlabmessungen im Bereich von 0,3 mm noch vergleichsweise hohe Intensitäten (Abb. 3). Weitere zukünftige Anwendungen solcher Systeme mit hochbrillianten monochromatischen Punktstrahlen finden sich in der Röntgenlithographie und in der Mikrotomographie.

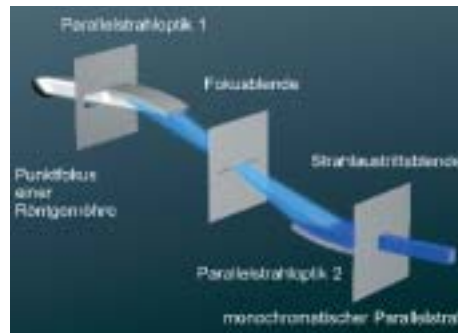


Abb. 1: Schematischer Strahlengang des Strahlkollimators



Abb. 2: Hochbrillanter kollimierender Monochromator zur Erzeugung eines sub-Millimeter-Röntgenpunktstrahls

## Ansprechpartner

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

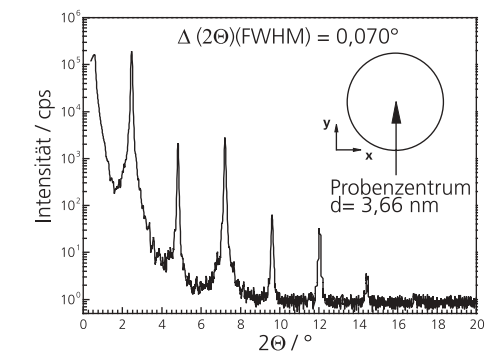


Abb. 3: Ergebnisse der sub-Millimeter-Reflektometrie, erzielt mit dem Strahlkompressor an einer Gradientenmultischicht durch Messung quer zur Richtung des Schichtdickengradienten

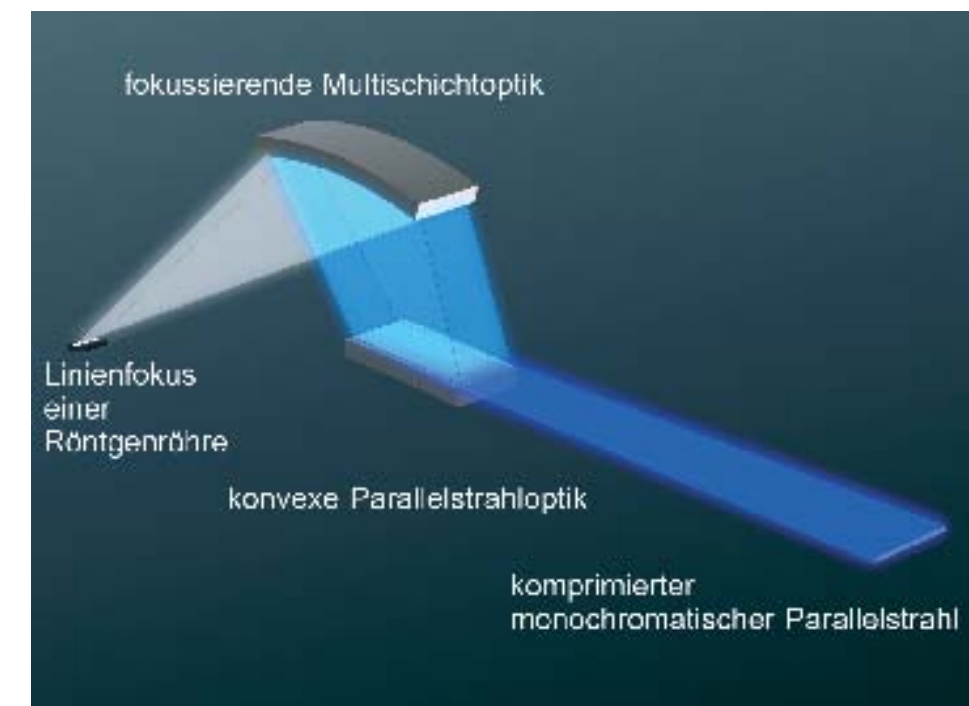


Abb. 4: Schematischer Strahlengang des Strahlkompressors

## Hochreflektierende EUV-Beschichtungen auf ebenen und gekrümmten Oberflächen

### Aufgabenstellung

Multischichten mit nm-dicken Einzelschichten werden für unterschiedlichste EUV- und röntgenoptische Anwendungen eingesetzt. Neben Labor-Anwendungen in der Reflektometrie, Diffraktometrie und Fluoreszenzanalyse hat sich die EUV-Lithographie als eine starke Triebkraft für die Weiterentwicklung derartiger Multischichten erwie-

sen. Hierfür werden Mo/Si-Multischichten für die Reflexion von Strahlung mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 13,5$  nm benötigt. Unabhängig von der Anwendung müssen die Multischichten höchsten Anforderungen hinsichtlich Reflektivität, Reproduzierbarkeit, Homogenität bzw. Präzision der Schichtdickenverteilung, Auflösungsvermögen und Temperaturstabilität genügen. Insbesondere ist es nötig, auf gekrümmten Oberflächen Multischichten mit hochpräzisen Schichtdickenverteilungen zu realisieren. Nur dann ist gewährleistet, dass an jedem Ort auf der Spiegeloberfläche die Braggsche Reflexionsbedingung erfüllt ist, die das Zusammenspiel von Einfallswinkel und Wellenlänge der Strahlung vorgibt.

Neben dem Einsatz solcher Spiegel in der EUV-Lithographie zur Belichtung von Halbleiterstrukturen mit Abmessungen  $< 50$  nm werden in zunehmendem Maße auch Nicht-Lithographie-Anwendungen wie z.B. Mikroskopie und Spektroskopie interessant, wo unter anderem sogenannte Schwarzschild-Objektive eingesetzt werden (Abb. 1).

### Lösungsweg

Zur Abscheidung von Mo/Si-Multischichten wird die im IWS verfügbare hochpräzise Magnetronspüßtechnik eingesetzt. Mit dieser Technik konnten innerhalb sehr kurzer Zeit Ergebnisse erzielt werden, die im internationalen Maßstab Spitzenwerte darstellen. Durch den Einsatz von dünnsten Barrierschichten im Mo/Si-Multischichtstapel konnte ein grenzflächen-optimiertes Multischichtsystem entwickelt und die EUV-Reflektivität deutlich

gesteigert werden. Mit den 2002 durchgeführten weiterführenden Arbeiten, bei denen systematisch die veränderten Schichtbildungsprozesse durch den Einbau der Barrierschichten untersucht wurden, konnte ein vollständiges Verständnis dieses neuartigen komplexen Schichtsystems erworben werden. Die damit verbundene Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Multischichtherstellung wurde am Synchrotronstrahlungsring BESSY2 von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) geprüft.

Neben der Optimierung des Stapelgefüges hinsichtlich des optischen Verhaltens ist auch die Weiterentwicklung der Technologie zur Beschichtung von konkav und konvex gekrümmten Substratoberflächen ein wichtiger Bestandteil zur Verbesserung der Abbildungseigenschaften von EUV-Spiegelsystemen. Durch die Verfeinerung der Target-Substrat-Relativbewegung und durch den Einsatz von geeigneten Blendensystemen können homogene und auch Gradientenmultischichten hochpräzise abgeschieden werden. Die Optimierung der Beschichtungsparameter erfolgt dabei zunächst auf Testanordnungen, bei denen kleine ebene Silizium-Substrate tangential an der zu beschichtenden Kontur fixiert werden. Anschließend wird der Prozess auf die eigentlichen Hochqualitätssubstrate übertragen. Damit lassen sich Vorversuche auf den teuren Zielsubstraten weitgehend vermeiden.

### Ergebnisse

Durch die Verbesserung der Grenzflächenqualität in Mo/Si-Multischichten konnte die Reflektivität der EUV-Spiegel weiter erhöht werden. Es gelang erstmals, die Schallmauer von 70 % bei dem für die praktische Anwendung wichtigem, nahe normalem Strahlungseinfall und bei der für die EUV-Lithographie angestrebten Arbeitswellenlänge zu durchbrechen. Der momentan erreichte Höchstwert liegt bei  $R_{\text{EUV}} = 70,1$  % ( $\alpha = 1,5^\circ$ ,  $\lambda = 13,3$  nm) (Abb. 2) und markiert damit den internationalen Spitzenwert.

Die Reproduzierbarkeit der Herstellung hochreflektierender EUV-Spiegel wurde anhand einer Kleinserie von 10 identisch beschichteten Spiegeln bei der Arbeitswellenlänge ermittelt. Die Standardabweichungen von Reflektivität und Peaklage der einzelnen Spiegel betragen 0,2 % und 0,22 %. Weiterhin konnte demonstriert werden, dass auch die thermische Stabilität der grenzflächen-optimierten EUV-Spiegel im Vergleich zu Standardspiegeln deutlich höher ist. Nach Temperung bei  $150^\circ\text{C}$  wird sogar eine Erhöhung der Reflektivität um knapp 0,2 % beobachtet. Auch eine Erwärmung der Spiegel auf  $200^\circ\text{C}$  bewirkt nur eine geringfügige Reduzierung um 0,3 %.

Die Beschichtung konvex und konkav gekrümmter Oberflächen wurde sowohl für homogene als auch für rotationssymmetrische Gradienten-Multischichten erfolgreich entwickelt. Dabei wurden bisher mittlere quadratische Abweichungen der Ist-Kurve von der Soll-Kurve von 0,06 % für konkave und 0,07 % für konvexe Oberflächen erreicht.

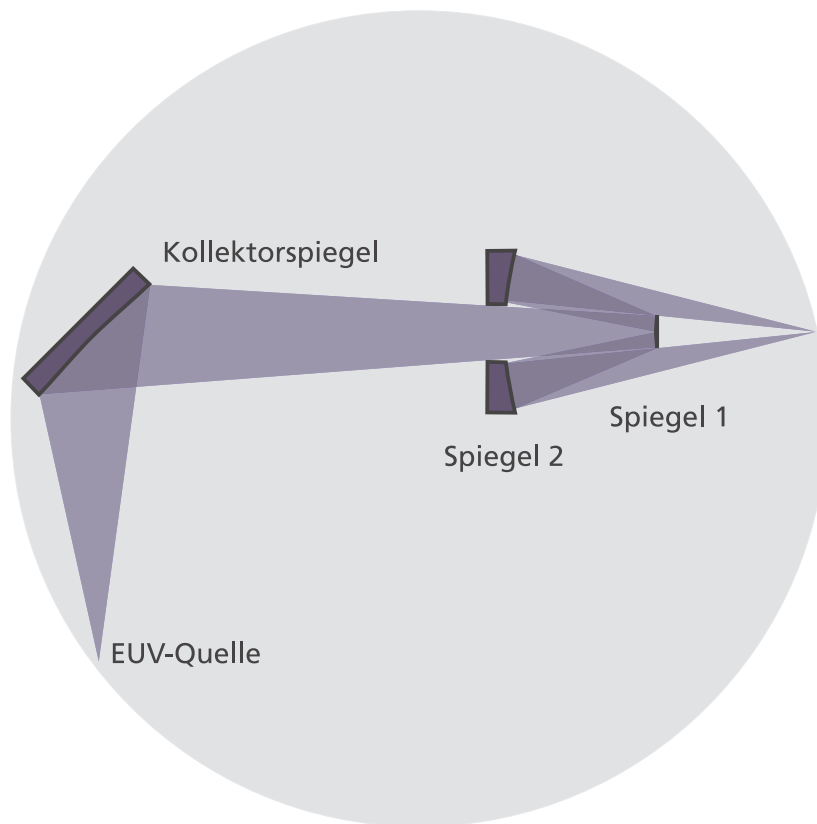


Abb. 1: Schematische Darstellung des Strahlengangs bei Schwarzschild-Objektiven für EUV-Strahlung.

### Ansprechpartner

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

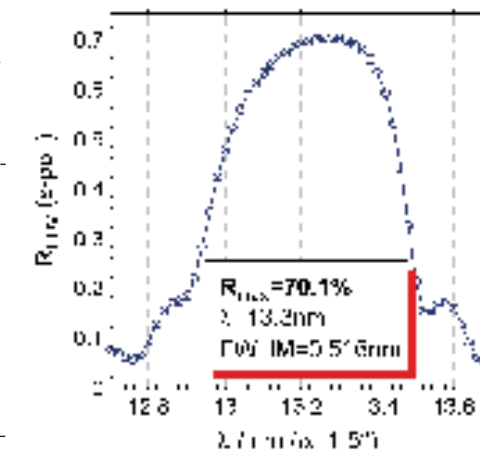


Abb. 2: Reflektivität typischer EUV-Spiegel, die aus grenzflächen-optimierten Mo/Si-Multischichten aufgebaut sind



## Hochauflösende nm-Multischichten für den EUV- und Röntgenbereich

### Aufgabenstellung

Seit knapp 20 Jahren werden künstliche, eindimensional periodische nm-Multischichten gezielt und mit höchster Präzision synthetisiert. In Analogie zur Beugung von Röntgenstrahlen an den Netzebenen natürlicher Kristalle ermöglichen diese die Reflexion der Strahlung an den Grenzflächen innerhalb der Multischicht. Im Unterschied zur Röntgenbeugung an Kristallen, bei der einige Tausend Netzebenen mit der einfallenden Strahlung in Wechselwirkung treten, erfolgt die Röntgenreflexion in nm-Multischichten gewöhnlich nur an einigen Hundert Grenzflächen. Daher ist das Auflösungsvermögen typischer Multischichten um mehr als 2 Größenordnungen geringer als das von Kristallen. Für viele Anwendungen, bei denen Multischichten zur Reflexion eingesetzt werden (z.B. beim Einsatz als Monochromatoren), kommt es zunehmend auf eine erhöhte Auflösung an. Ziel der Arbeiten war es daher, Multischichten zu entwickeln, die deutlich höhere Auflösungen und gleichzeitig akzeptable Reflektivitäten aufweisen.

### Lösungsweg

Bei vorgegebener Röntgen- oder EUV-Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ist die Eindringtiefe in die Multischicht durch die Absorption der Schichtmaterialien bestimmt. Um eine Erhöhung der Anzahl der zur Gesamtreflexion beitragenden Grenzflächen im Multischichtstapel zu erreichen, müssen folgende Maßnahmen realisiert werden:

- Einsatz von Schichtmaterialien mit geringer Absorption,
- Verringerung der Periodendicke der Multischicht bei gleichzeitiger Erhöhung der Periodenanzahl.

Typische Materialien mit geringer Absorption sind Elemente mit niedriger Ordnungszahl und deren Verbindungen, wie z.B. Be, B<sub>4</sub>C, BN, C, Si, SiO<sub>2</sub>, Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc. Um hochauflösende Multischichten zu erhalten, müssen folglich diese Elemente kombiniert und mit geringst möglicher Periodendicke abgeschieden werden. Eine weitere Möglichkeit der Realisierung hochauflösender Multischichten besteht darin, Kohlenstoffschichten unterschiedlicher Modifikation im Multischichtstapel einzusetzen. Dies kann durch gezielte Veränderung der Laserstrahlparameter mit dem Verfahren der Puls Laser Deposition erreicht werden.

### Ergebnisse

Es gelang, verschiedene Multischichtsysteme mit geringsten Periodendicken bei gleichzeitig geringer Grenzflächenrauheit und -interdiffusion herzustellen. Die hervorragende Regelmäßigkeit auch bei hohen Periodenzahlen belegen die Ergebnisse der Cu-K $\alpha$ -Reflektometrie (Abb. 1). Aus TEM-Untersuchungen an Querschnittspräparaten folgt, dass der periodische Materialkontrast auch zwischen sub-nm dicken Einzelschichten erhalten bleibt (Abb. 2).

Das beste Auflösungsvermögen wurde bisher mit B<sub>4</sub>C/Si-Multischichten erreicht. Bei einer Periodenanzahl von N = 500 und einer Periodendicke von 1,98 nm konnte ein Auflösungsvermögen von  $E/\Delta E = 492$  bei einer Reflektivität von 3,7 % erzielt werden ( $\lambda = 0,6887$  nm,  $\Theta = 10,185^\circ$ ). Falls nicht diese extremen Anforderungen an das Auflösungsvermögen gestellt werden, sind auch höhere Reflektivitäten möglich:  $E/\Delta E = 203$ , R = 24,2 % ( $d_{\text{Periode}} = 4$  nm, N = 300,  $\lambda = 0,6888$  nm,  $\Theta = 5,144^\circ$ ).

## Maßgeschneiderte Innenbeschichtungen von Bauteilen

### Aufgabenstellung

Die Beschichtung von Bauteil-Innenflächen stellt für alle industriell verfügbaren Beschichtungstechnologien eine Herausforderung dar. Hohe Ansprüche hinsichtlich Schichtdickenhomogenität oder Gefügebau können insbesondere bei komplizierten und schwer zugänglichen Innenstrukturen nur sehr aufwändig oder ungenügend erfüllt werden.

Ziel der Arbeiten war es daher, das am Fraunhofer IWS entwickelte Verfahren der Innenbeschichtung mittels Puls Laser Deposition (PLD, Abb. 1) derart zu erweitern, dass neben den dichten nm-Schichten der "klassischen" PLD auch poröse Strukturen mit Dicken bis zu einigen 100  $\mu\text{m}$  erzeugt werden können. Mit dem damit erweiterten Eigenschaftsspektrum der möglichen Innenbeschichtungen lassen sich komplexe Schichtsysteme auf den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneidert herstellen.

### Lösungsweg

Wichtigste Erweiterung des PLD-Verfahrens ist die Kombination des bisherigen Prozesses der Laserablation für die Erzeugung des schichtbildenden Teilchenstroms mit einer thermischen Verdampfung, die ebenfalls mittels einem gepulsten Laser initiiert wird. Die Schichtwachstumsbedingungen können dadurch so eingestellt werden, dass sowohl kolumnar-poröse Strukturen als auch glasartig-amorphe Schichten realisierbar sind (Abb. 2).

Die vorteilhaften Eigenschaften der klassischen PLD wie z. B. die geringe Erwärmung der Substratoberfläche, die hohe Reproduzierbarkeit und Schicht-homogenität sowie die erreichbare Dickenpräzision bis in den sub-nm-Bereich bleiben weiterhin erhalten.

Zusätzlich können einige Nachteile der klassischen Variante (geringe Beschichtungsrate, hohe Schichteigenspannungen) kompensiert werden.

### Ergebnisse

Mit dem entwickelten Verfahren wurden Wärmedämmschichten (WDS) für Raumfahrt-Triebwerke hergestellt, die extreme Anforderungen hinsichtlich Wärmestrom, Druck und Temperatur erfüllen müssen. Die WDS zeichnen sich durch einen komplexen Schichtaufbau mit dichten, amorphen Teilschichten als Haftvermittler und Diffusionsbarrieren einerseits, und kolumnar-porösen Strukturen zur Wärmedämmung und zur Kompensation von thermisch induzierten Spannungen und Dehnungen auf der anderen Seite aus.

Eine weitere Anwendung sind Beschichtungen für den Hochtemperatur-Korrosionsschutz von Brennkammern auf C/SiC-Basis. Schichtsysteme aus Refraktärmetallen, die auch bei Wandtemperaturen > 2000 °C noch ausreichend Oxidationsschutz bieten, können mittels des PLD-Verfahrens präzise auf die Innenwand aufgebracht werden (Abb. 3). Neben Wärmedämm- oder Korrosionsschutzschichten sind auch Beschichtungen für Verschleiß- und Reibungsminderung (Hartstoffe, DLC) sowie Kombinationen verschiedener funktionaler Schichtsysteme möglich.

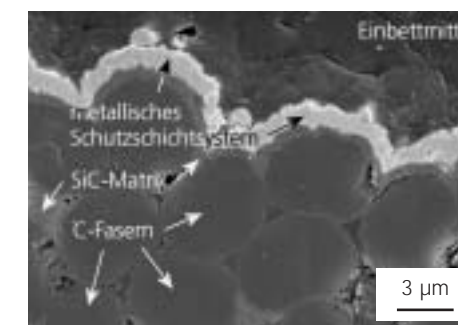


Abb. 3: REM-Querschnittsaufnahme einer C/SiC-Brennkammerwand mit PLD-Hochtemperatur-Korrosionsschutzschicht

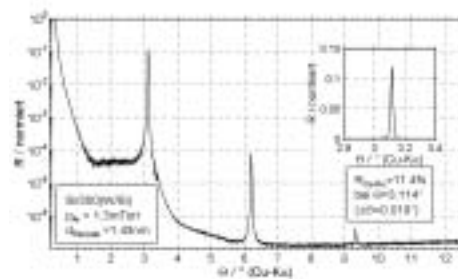


Abb. 1: Cu-K $\alpha$ -Reflektogramm einer W/Si-Multischicht mit einer Periodendicke von  $d_{\text{Periode}} = 1,43$  nm



Abb. 2: TEM-Querschnitt einer Cr/Sc-Multischicht mit einer Periodendicke von  $d_{\text{Periode}} = 1,58$  nm



Abb. 1: Prozessfoto der Innenbeschichtung mittels PLD

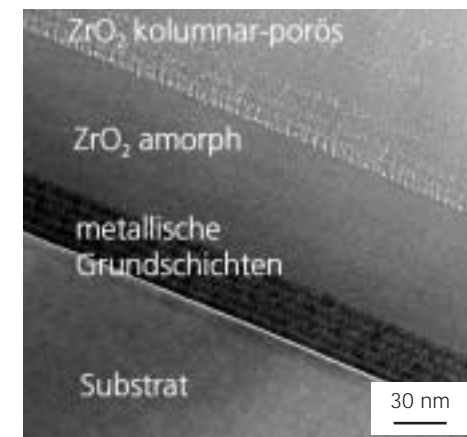


Abb. 2: TEM-Querschnittsaufnahme des Grundschichtsystems von PLD-Wärmedämmschichten

### Ansprechpartner

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

### Ansprechpartner

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



## Labor-Reflektometer für große Optik-Komponenten im Wellenlängenbereich von 10 -16 nm

### Aufgabenstellung

In der Mikroelektronik-Industrie werden die Lithographie-Anlagen der nächsten Generation mit einer Arbeitswellenlänge im Bereich des extremen Ultraviolett bei 13,4 nm arbeiten müssen (EUV-Lithographie), um Strukturbreiten unter 50 nm realisieren zu können. Gegenwärtig laufen dazu die Entwicklungen auf Hochtouren. Die erforderlichen optischen Komponenten, Spiegel und Masken, müssen ebenfalls für die genannte Arbeitswellenlänge entwickelt und optimiert werden. Dies geschieht im wesentlichen durch die Auswertung von Reflektometrie-Messungen dieser Komponenten im EUV-Bereich.

Bisher war man für Messungen im EUV-Bereich auf die Nutzung von Synchrotron-Strahlung (z.B. am BESSY II in Berlin) angewiesen. Ein kommerzielles Labor-Gerät, welches unmittelbar neben einer Anlage zur Herstellung von optischen Komponenten bereitstellen könnte, gab es bislang nicht. Die Kontrolle und Überwachung der Herstellung von optischen Komponenten wies deshalb immer eine gewisse Verzögerung im Entwicklungs- und Fertigungsprozess auf. Solche Verzögerungen sind aber für eine zielorientierte Entwicklung hinderlich.

### Lösungsweg

Die Aktivitäten zur Erstellung eines Labor-Gerätes für die Reflektometrie im EUV-Bereich gliedern sich in vier große Schwerpunkte:

- die Bereitstellung einer geeigneten Strahlungsquelle, die im EUV-Bereich zeitlich und örtlich stabil einen hohen Photonenfluss gewährleistet,
- die Monochromatisierung der erzeugten EUV-Strahlung bei möglichst vollständiger Unterdrückung sonstiger Fremdlichtanteile,

- die Realisierung einer geeigneten Proben- und Detektormanipulation für Reflektometrie-Messungen an Spiegeln und Masken,
- eine Steuer- und Messtechnik, die die erforderlichen Prozessabläufe realisiert.

Der Aufbau dieses EUV-Reflektometers erfolgte unter Beteiligung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), des Max-Born-Institutes (MBI), der Fa. Bestec, der Fa. PINK, der Fa. AIS Automation, der Fa. GBS-Elektronik und der Carl Zeiss SMT AG.

### Ergebnisse

Der EUV-Strahl wird, um eine Absorption an Luft zu verhindern, im Reflektometer vollständig im Vakuum geführt. Die Gesamtansicht des EUV-Reflektometers ist in Abb. 2 dargestellt. Um den Strahlengang gruppieren sich alle benötigten Baugruppen:

#### EUV-Quelle

Gepulste energiereiche Laserstrahlung der Wellenlänge 532 nm wird mittels einer speziellen Fokussierungsoptik auf ein Gold-Target fokussiert, wobei der Durchmesser des Laserfokus etwa 10  $\mu\text{m}$  beträgt. Über der Targetoberfläche bildet sich ein Plasma, das im EUV-Bereich ein quasikontinuierliches Spektrum liefert. Der EUV-Quellpunkt besitzt einen Durchmesser von ca. 50  $\mu\text{m}$ . Bei einer Laserleistung von 650 mJ beträgt der spektrale Photonenfluss in der EUV-Quelle etwa  $11 \cdot 10^{13}$  Photonen/(s·sr·0,1nm bw) bei einer Wellenlänge von 13,4 nm. Die Intensitätsschwankungen von Schuss zu Schuss der EUV-Quelle liegen bei < 10 %. Diese Stabilität der spektralen Plasmaemission bzw. des gewünschten Photonenflusses sowie eine geringe Partikelemission erfordern zur Generierung jedes einzelnen EUV-Strahles den Beschuss einer jeweils frischen Targetoberfläche.

#### Monochromator

Im Strahlengang des Monochromators befinden sich eine Eintrittsblende, ein plan-elliptischer Vorspiegel, ein sphärisches Gitter mit 1200 Linien/mm, ein Austrittsspalt, ein sphärischer Refokussierspiegel, 2 Streulichtblenden und ein Strahlteiler. Die Wellenlänge kann im Bereich von 10 bis 16 nm mit einer Präzision von 0,003 nm eingestellt werden.

Durch den Strahlteiler wird ein fester Anteil der Primärstrahlintensität auf einen Referenzdetektor gebracht, so dass ein Referenzsignal bei jeder Plasmaemission zugänglich ist. Bei einer Laserleistung von 250 mJ wird am Monochromatorausgang eine Photonenzahl von  $3 \cdot 10^6$  Photonen / Schuss registriert, was einem Photonenumsatz durch den Monochromator von ca. 3,3 % entspricht.

#### Goniometer

Das Probenmanipulationssystem des Goniometers (Abb. 1) gewährleistet den genauen Verstellbetrieb für die Vermessung von Optikkomponenten im Vakuum. Die zu vermessenden Spiegel oder Masken können dabei einen Durchmesser bis zu 50 cm und eine Dicke bis zu 20 cm sowie ein Gewicht bis zu 30 kg aufweisen. Die Oberfläche dieser Komponenten kann dabei eben, konvex oder konkav gekrümmt sein. Der Messfleck auf der Probe ist im Durchmesser kleiner als 2 mm. Der Einfallswinkel des EUV-Strahles kann zwischen 3° und 60° variiert werden.

#### Gesamtsteuerung

Der Betrieb des Reflektometers wird über eine Gesamtsteuerung gewährleistet und überwacht. Dies bezieht sich auf die Überwachung aller Komponenten, das gesamte Vakuumsystem und den komfortablen Messbetrieb. Das Reflektometer arbeitet in 5 Messmodi:

- Energie-/Wellenlängenscan,
- Theta/2Theta-Scan,
- Detektor-Scan,
- Rocking-Scan,
- Phi-Scan.

#### Verfügbarkeit des EUV-Reflektometers

Nach Abschluss der laufenden Qualifizierung wird das Reflektometer im nächsten Jahr für den Messbetrieb im EUV-Bereich zur Verfügung stehen.

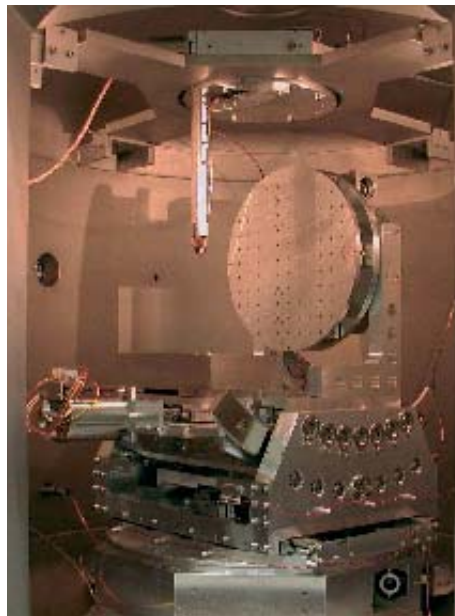


Abb. 1: Manipulationssystem innerhalb der Goniometerkammer

#### Ansprechpartner

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

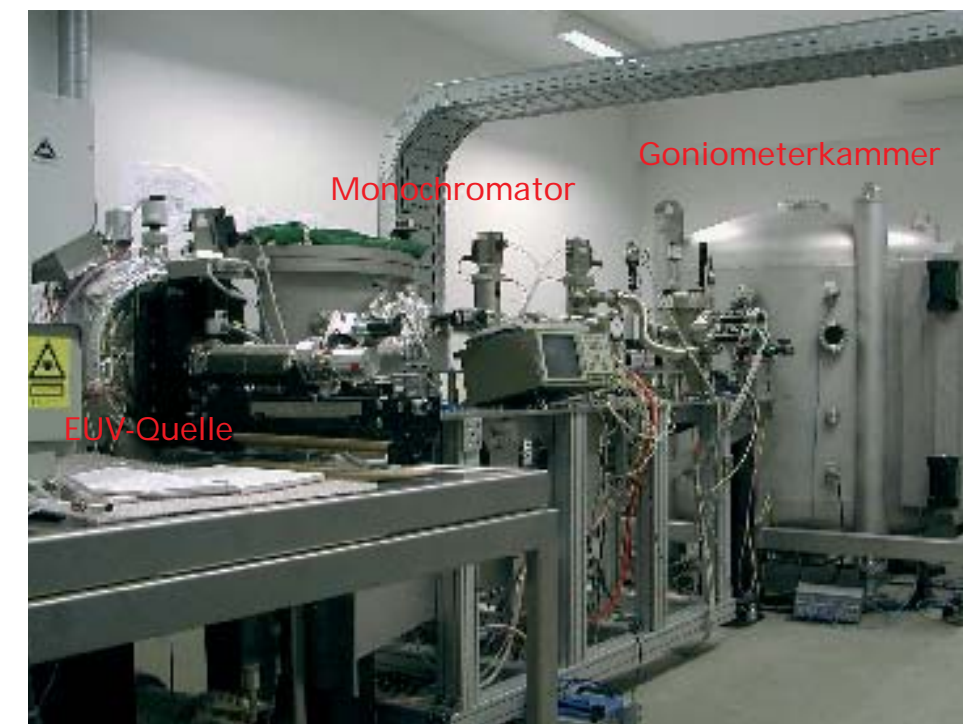


Abb. 2: Gesamtansicht des Labor-Reflektometers

## FuE-Angebot: Dünnschichttechnologie



**Redaktion:** Das laserakustische Prüfverfahren LWave® wurde Ende 2001 mit dem amerikanischen "R&D 100 Award" ausgezeichnet. Für welche Anwendungsfelder ist dieses innovative Verfahren besonders interessant?

**Dr. Schultrich:** Ein besonders zukunftssträchtiges Einsatzgebiet ist die Mikroelektronik. Mit Hilfe der Laserakustik sind hier Untersuchungen möglich, die mit keinem anderen Verfahren mit vergleichbarer Aussagekraft und / oder Effektivität möglich sind. Dazu gehören so verschiedene Fragestellungen wie die Bewertung der Oberflächenqualität von Wafern, die Optimierung von Photolackschichten und die Charakterisierung von hochporösen Low-k-Dielektrika. Dementsprechend wurde mit der Geräteversion LWave® 300 ein Prüfgerät entwickelt, das die spezifischen Belange der Halbleiterindustrie berücksichtigt und insbesondere die Untersuchung von 300 mm Wafern erlaubt.

Der weltweite Vertrieb der LWave®-Geräte hat sich mittlerweile zu einem wichtigen Standbein der Fa. ALOtec GmbH, einer Ausgründung des Fraunhofer IWS, entwickelt. Die soeben zum Jahreswechsel abgeschlossenen Verträge für die Lieferung weiterer LWave®-Anlagen nach Japan und in die USA zeigt das wachsende Kundeninteresse an dieser vielfältig einsetzbaren Prüftechnik.

**Redaktion:** Mit Partnern des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums "Ultradünne funktionale Schichten" wurde auch eine neue Technologie zur Beschichtung von Festplatten entwickelt und an der industriellen Anlagentechnik erfolgreich erprobt. Lassen sich diese Ergebnisse auch auf andere Produkte übertragen?

**Dr. Schultrich:** Ja, die gemeinsam mit IBM Mainz für den Kratz- und Korrosionsschutz von Festplatten entwickelten Kohlenstoffschichten dürften auch für viele andere Mikro- und Nanosysteme, vor allem für solche mit sich bewegenden Komponenten, von Interesse sein. Mit dem in die IBM-Anlagentechnik implementierten IWS-Technologie wurden superglatte Schichten erzeugt, deren Härte um mehr als das Doppelte über der der Sputter-Schichten liegt, die den aktuellen Stand verkörpern. Von besonderer Bedeutung für mikro- und nanotribologische Anwendungen ist dabei die Tatsache, dass die extrem hohe Härte und der hervorragende Korrosionsschutz bereits mit ultradünnen Schichten zwischen 3 und 5 nm erreicht werden.



*Wer vom Ziel nichts weiß,  
kann den Weg nicht haben.  
Christian Morgenstern*





Dr. Bernd Schultrich  
Abteilungsleiter  
(Tel. 2583 403)



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

#### Beschichtung und Oberflächenmodifizierung mittels Bogen-technologien

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

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



Vorbereitung Diamor®-beschichteter Proben für die Mikroanalyse



Dr. Otmar Zimmer  
Gruppenleiter PVD  
(Tel. 2583 257)

#### Beschichtung mittels aktivierter Hochrateverfahren

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

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



Arc-Beschichtung von temperaturempfindlichen Fasern



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

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

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



Arcjet-CVD-Anlage zur quasi-kontinuierlichen Beschichtung (30 kW DC-Arc-Quelle)

#### Beispiele aus den Arbeiten 2002

1. Erweitertes Anwendungspotential durch superharte Kohlenstoffschichten im Mikrometerbereich 38
2. Erschließung der Vakuumbogenbeschichtungstechnik für die Mikroelektronik 40
3. Anwendung der laserakustischen Prüfmethode LAwave® für die Halbleitertechnik 42
4. Kohlenstoffschichten als Antihafschichten 44
5. Partikelfilter für die industrielle Vakuumbogenbeschichtung 45
6. Atmosphärendruck-Plasma-CVD zur Beschichtung von Massengütern 46
7. Entwicklung spektroskopischer Sensoren zur Anlagensteuerung 48
8. Qualitätssicherung in der industriellen Hartstoffbeschichtung mittels Laser-Akustik 49

## Erweitertes Anwendungspotential durch superharte Kohlenstoffschichten im Mikrometerbereich

### Aufgabenstellung

Tribologische Schutzschichten erfordern gewöhnlich eine Kombination aus großer Härte und niedriger Reibung. Amorphe Kohlenstoffschichten mit diamantähnlichem Bindungscharakter (DLC) erfüllen diese Bedingungen, wobei es aber in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren und der Konzentration von Fremdatomen (vor allem Wasserstoff) große Unterschiede gibt. Die höchste Härte - so genannte "Superhärte" ( $H > 40$  GPa) - in der Vielfalt der DLC-Schichten erzielen die Wasserstoff-freien DLC-Schichten, die mit hohen Teilchenenergien und bei niedrigen Temperaturen abgeschieden werden. Diese Schichten weisen aber sehr hohe Druckeigenspannungen auf, die etwa linear mit der Härte zunehmen und bis zu 10 GPa betragen können. Druckeigenspannungen sind zwar

im Hinblick auf die Verschleißeigenschaften positiv, können aber zu Abplatzungen führen, wenn die Schicht eine kritische Dicke überschreitet.

So war es bislang nur möglich, superharte DLC-Schichten bis zu einer Dicke von einigen hundert Nanometern einzusetzen. Zahlreiche tribologische Anwendungen, z. B. Verschleißschutzschichten auf Umformwerkzeugen, Lagern, etc. erfordern jedoch Schichtdicken von mehreren Mikrometern, um eine hinreichende Tragfähigkeit der Schicht gegenüber punktuellen Belastungen zu gewährleisten.

### Lösungsweg

Die im IWS Dresden abgeschiedenen superharten DLC-Schichten (Diamor<sup>®</sup>) werden mit der Technik des gepulsten Vakuumbogenverfahrens hergestellt. Dabei stehen mit dem Laser-gesteuerten Vakuumbogen (Laser-Arco<sup>®</sup>) und dem Hochstrombogen (HCA) zwei komplementäre Technologien zur Verfügung. Zur Beschichtung ist keine erhöhte Substrattemperatur nötig, da die zur Schichtausbildung nötige hohe Energie der Beschichtungsteilchen aus dem Plasma der Bogenentladung stammt. Die an sich günstige niedrige Abscheidetemperatur zieht jedoch nach sich, dass dünne Oxidbedeckungen bzw. wasserhaltige Deckschichten des Grundwerkstoffes nur unzureichend entfernt werden. Eine dennoch stabile Anbindung an das Grundmaterial kann über die Einbeziehung eines Zwischenschichtsystems realisiert werden.

Durch den Beschuss mit Sauerstoff-affinen Metallen (z. B. Aluminium oder Titan) kann die Deckschicht in entsprechende Mischoxide umgewandelt werden. Es baut sich eine gradierte Nanometer-Zwischenschicht auf, die zu einer wesentlichen Steigerung der Schichthaftung führt. Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Haftung liegt in einem nanotechnologischen Schichtdesign. Es zielt darauf ab, einerseits Druckeigenspannungen in der Schicht lokal abzubauen und andererseits den Bruchwiderstand der Schicht zu erhöhen. Dabei wird durch geeignete Abscheidebedingungen eine lamellare Strukturierung der Schicht im Nanometerbereich eingestellt.

### Ergebnisse

Durch die Anwendung und Optimierung der genannten nanotechnologischen Konzepte gelang es, mehrere Mikrometer dicke Diamor<sup>®</sup>-Schichten auf verschiedene Substraten abzuscheiden. Diese Schichten weisen Superhärte, sehr geringe Reibwerte sowie ausgezeichnete Haftung auf dem Grundmaterial auf, wie folgende Ergebnisse demonstrieren.

Abb. 1 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Diamor<sup>®</sup>-Schichten auf einem Silizium- bzw. Stahlsubstrat im Querschnitt. Diese Schichten wurden mit dem Konzept der optimierten Schichtanbindung durch Nanometer-Zwischenschichten hergestellt. Der Elastizitätsmodul der Schichten beträgt 450 GPa sowohl auf Stahl als auch auf Silizium. Durch Nanohärte-Messungen wurde eine Härte von 70 GPa ermittelt.

Die hervorragenden tribologischen Eigenschaften konnten in einem Schwingverschleißtest, dem so genannten Fretting-Test, bestätigt werden. Dabei wird der Verlauf der Reibungskoeffizienten im Kontakt mit einer Stahlkugel (Trockenschmierung) als Funktion der Zeit ermittelt. Es wird ersichtlich, dass der anfänglich schon niedrige Reibwert rasch absinkt und im weiteren Verlauf auf etwa 0,1 abnimmt. Im Vergleich dazu zeigen herkömmliche Hartstoffschichten (TiN bzw. CrN) mit 0,6 bis 0,7 deutlich höhere Reibwerte schon zu Beginn sowie eine weitere Erhöhung mit zunehmendem Reibweg, die auf einsetzenden Schichtverschleiß hinweist.

Die Qualität der Schichthaftung wird durch das Erscheinungsbild nach dem Einbringen eines Rockwell-Eindrucks in eine beschichtete Stahlprobe demonstriert. Abb. 2 zeigt, dass die Schicht um einen solchen Eindruck herum keinerlei Haftungsprobleme zeigt. Damit sind die Diamor<sup>®</sup>-Schichten der obersten Haftfestigkeitsklasse gemäß VDI-Richtlinie 3198 zuzuordnen.

Mit der Möglichkeit, superharte amorphe Kohlenstoffschichten im Mikrometerbereich abscheiden zu können, eröffnet sich ein breites Spektrum potentieller Anwendungen. Neben der Verwendung als Verschleißschutzschicht für extreme Belastungsbedingungen ist nun auch die Anwendung dicker Diamor<sup>®</sup>-Schichten als freistehende Strukturen z.B. für mikromechanische Komponenten realisierbar.

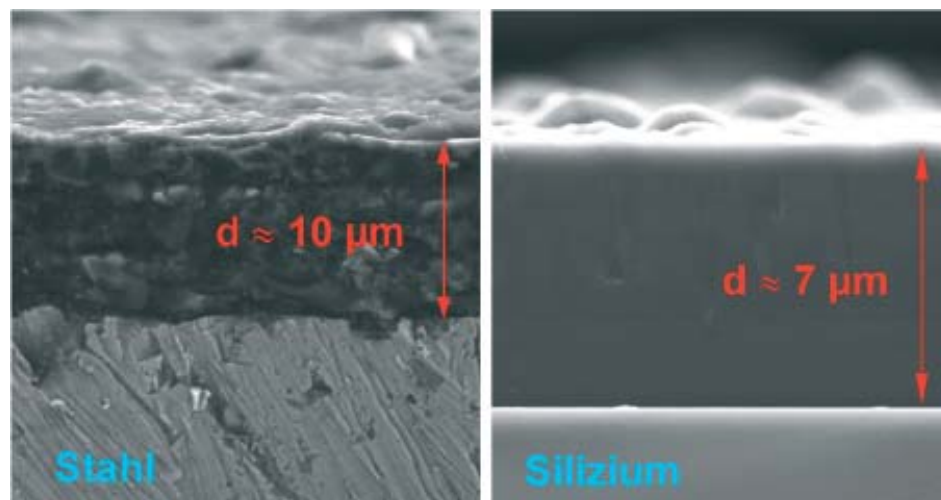


Abb. 1: Diamor<sup>®</sup> auf Stahl und Silizium (Querschnitt im Rasterelektronenmikroskop)

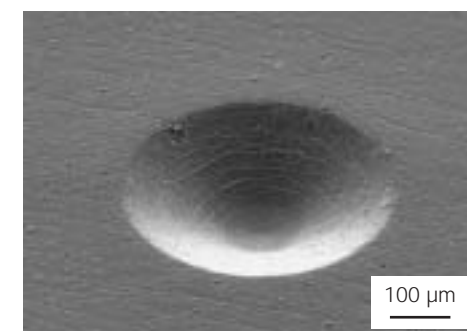


Abb. 2: Rockwell-Eindruck in Diamor-beschichtetes Stahlsubstrat zur Charakterisierung der Haftfestigkeit (Schrägsicht im Rasterelektronenmikroskop)

### Ansprechpartner

Dr. Volker Weihnacht  
Tel.: 0351 / 2583 247  
volker.weihnacht@iws.fraunhofer.de



## Erschließung der Vakuumbogenbeschichtungstechnik für die Mikroelektronik

### Aufgabenstellung

In dem Maße, wie die Integrationsdichte mikroelektronischer Schaltkreise zunimmt, werden die Strukturen immer kleiner. Strukturbreiten von 130 nm sind heute Stand der Technik. Für die Zukunft werden Breiten von 100 nm und kleiner angestrebt. In diesem ständig fortwährenden Prozess der Miniaturisierung kommt unter anderem den elektrisch leitfähigen Verbindungen eine Schlüsselfunktion zu. Diese bestehen aus einem gut leitenden Metall (Aluminium oder Kupfer), das in die zuvor geätzten Sub-Mikrometer-Strukturen abgeschieden wird. Der hierfür entwickelte Prozess ist galvanischer Natur und benötigt eine elektrisch leitfähige Oberfläche auf dem Wafer, den Seed-Layer. Dieser sollte möglichst gleichförmig die gesamten Strukturen bedecken.

Vor dem Aufbringen der eigentlichen Leitbahn werden die Strukturen mit einer Barrierschicht ausgekleidet. Sie verhindert eine Diffusion des Leitbahnmaterials in den Wafer, was den Schaltkreis zerstören würde. Dazu sollte die Schicht amorph bis nanokristallin sein, da die Korngrenzen einen Diffusionskanal darstellen. Die optimale Barriere ist weiterhin strukturkonform und extrem dünn, um den Querschnitt der Leitbahn nicht unnötig zu vermindern.

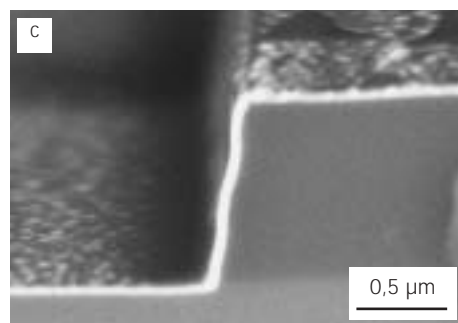
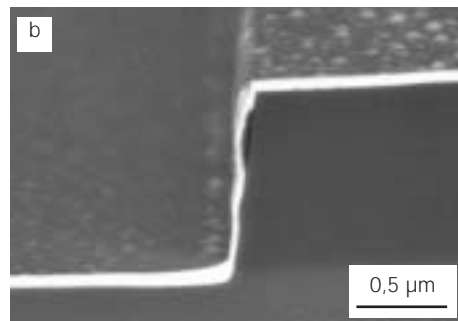
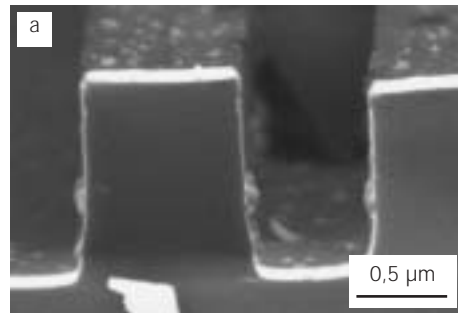


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Variation der Ta-Abscheidung  
a) Bodenbeschichtung  
b) strukturkonforme Abscheidung  
c) Seitenwandbeschichtung

### Ansprechpartner

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

### Lösungsweg

Einen aussichtsreichen Lösungsweg dafür stellt der am IWS entwickelte gefilterte Hochstrombogen ( $\Phi$ -HCA), eine Kombination aus Hochstrombogenverdampfer (HCA-High Current Arc) und Plasmafilter, dar. Die Hochstrombogenverdampfung ist eine gepulste Vakuumbogenentladung mit Strömen bis zu einigen kA. Damit überschreitet sie die Stromstärken konventioneller Gleichstrombogenquellen um ein Vielfaches. Das erzeugte Plasma ist vollständig ionisiert und besitzt hohe Teilchenenergien um 40 eV. Bei dem Verdampfungsprozess entstehen zwangsläufig Partikel (Droplets), die mit dem Filter aus dem Plasmastrom extrahiert werden können.

Für eine Beschichtung steht somit ein dropletfreier Ionenstrahl zur Verfügung. Die daraus resultierenden Schichten sind amorph (Kohlenstoff) bis nanokristallin (Metalle) und extrem dicht. Diese Art von Schichten bringt für eine Anwendung in der Mikroelektronik als Barrierschicht die besten Voraussetzungen mit. So können die mit dem  $\Phi$ -HCA abgeschiedenen dünnsten Kohlenstoffschichten von weniger als 2 nm zuverlässig die magnetischen Schichten von Festplatten vor aggressiven Medien schützen, wie durch praxisrelevante Korrosionstests des Partners IBM bestätigt wurde. Die Übertragung dieser Erfahrungen auf die Abscheidung von Barrierschichten wird gegenwärtig gemeinsam mit der Firma FHR Anlagenbau GmbH und der TU Dresden im Rahmen eines durch das Sächsische Wirtschaftsministerium geförderten Projektes untersucht.

### Ergebnisse

Die Beschichtungen wurden an einem Cluster-Tool mit einem  $\Phi$ -HCA als Beschichtungsquelle durchgeführt, das für Substrate bis 200 mm geeignet ist. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die strukturkonforme Abscheidung der Materialien Tantal bzw. Tantalnitrid ( $\text{TaN}_x$ ) und Kupfer. Die  $\text{TaN}_x$ -Schicht übernimmt hierbei die Funktion der Barrierschicht und das Kupfer die des Seed-Layers. Die Experimente erbrachten den Nachweis, dass die Abscheidung beider Materialien gut variiert werden kann: Von einer reinen Bodenbedeckung über die strukturkonforme Abscheidung bis hin zu einer Seitenwandbedeckung reicht das Spektrum. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Abb. 1 a - c belegen eindrucksvoll die möglichen Abscheidungsformen von Tantal mit dem  $\Phi$ -HCA. Ausgehend von einer reinen Beschichtung des Bodens über eine fast strukturkonforme Abscheidung kann bis zur fast ausschließlichen Seitenwandbedeckung variiert werden. Eine Röntgenstrukturuntersuchung konnte keine Aussage zur Korngröße liefern. Das bedeutet, dass die mittlere Korngröße kleiner 10 nm ist und die Schichten mit diesem Verfahren als Barriere geeignet sind.

Die Untersuchungen zur Variationsbreite der Kupferabscheidung erbrachten zu Tantal vergleichbare Ergebnisse (Abb. 3 a - c). Damit eröffnet sich mit dem  $\Phi$ -HCA die Möglichkeit, die

Barrierschicht und den Seed-Layer mit dem gleichen Verfahren abzuscheiden. Wird die Abscheidungsvariante der reinen Bodenbeschichtung weitergeführt, können die Sub-Mikrometer-Strukturen, wie es in Abb. 2 dargestellt ist, voidfrei (d. h. ohne Löcher) gefüllt werden. Mit diesem Verfahren kann sowohl die Barrierschicht als auch anschließend die Leitbahn abgeschieden werden. Das kann zur Einsparung eines Prozessschrittes führen.

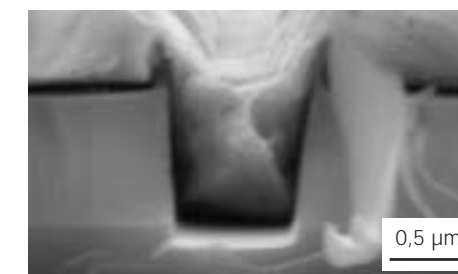


Abb. 2: Füllen mikroelektronischer Grabenstrukturen: Kupferabscheidung mittels gefiltertem Hochstrombogen

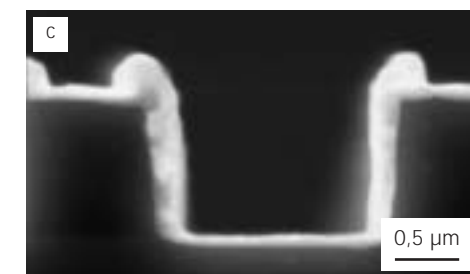
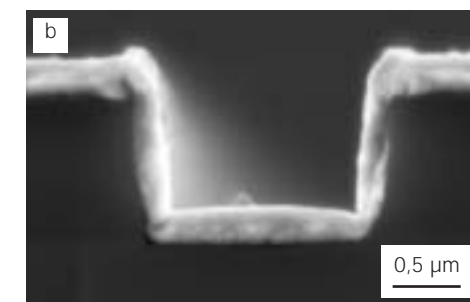
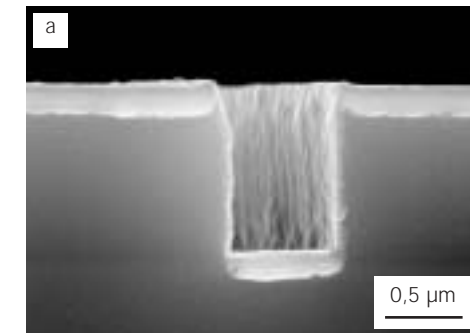


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Variation der Cu-Abscheidung  
a) Bodenbeschichtung  
b) strukturkonforme Abscheidung  
c) Seitenwandbeschichtung

## Anwendung der laserakustischen Prüfmethode LAwave® für die Halbleitertechnik

### Aufgabenstellung

Das laserakustische Prüfgerät LAwave® hat sich seit seiner Einführung als schnelles und zuverlässiges Prüfverfahren für dünne Schichten bewährt. Die Schwerpunkte der Anwendung lagen bisher auf der Prüfung von Hartstoffen mit Härten bis zum Diamant und Schichtdicken bis hinunter zu wenigen Nanometern. Solche Beschichtungen sind für die Werkzeugindustrie, den Maschinenbau oder für den Verschleißschutz von Festplattenoberflächen wichtig. In jüngerer Zeit konnten über den traditionellen Einsatzbereich hinaus interessante Anwendungen der laserakustischen Prüfmethode in der Halbleiterindustrie erschlossen werden.

### Dielektrische Xerogel-low-k-Schichten - Lösungsweg

Hochporöse Xerogel-low-k-Schichten werden als ein möglicher Weg zur Herstellung von Dielektrika mit  $k < 2$  angesehen, die eine weitere deutliche Reduzierung der Abmessungen von Halbleiterschaltkreisen erlauben würden. Dies setzt jedoch noch die Lösung wichtiger technologischer Probleme voraus. Die Porosität von über 50 % reduziert zwar die Dielektrizitätskonstante, verringert aber auch die Festigkeit dieser  $\text{SiO}_2$ -Schichten, was sich für das nachträgliche chemisch-mechanische Polieren als problematisch erweist. Die Einführung dieser Beschichtungen hängt somit davon ab, ob eine optimale Kombination von dielektrischen und mechanischen Eigenschaften erreicht werden kann.

Als Maß für die mechanischen Eigenschaften der hochporösen Schichtstruktur gilt der Elastizitätsmodul der

Schicht, der mit dem LAwave-Messgerät schnell und unkompliziert gemessen werden kann.

### Dielektrische Xerogel-low-k-Schichten - Ergebnisse

Abb. 1 zeigt laserakustische Messungen an dielektrischen Xerogel-low-k-Schichten auf Siliziumsubstrat. Es sind die Messkurven, die Schichtdicke  $d$ , der E-Modul  $E$  und die Dichte  $\rho$  für drei Schichten angegeben.

Die Messkurven sind die Dispersionskurven für akustische Oberflächenwellen, die mit dem laserakustischen Prüfgerät gemessen werden. Sie stellen die Phasengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz dar. Mit zunehmender Frequenz fallen sie ab, worin die Wirkung des im Vergleich zum Siliziumsubstrates sehr niedrigen E-Moduls der Schicht zum Ausdruck kommt.

Von besonderem Vorteil ist, dass mit der LAwave-Methode nicht nur der E-Modul, sondern auch die Dichte dieser Schichten bestimmen kann, was auf die deutlich messbare Krümmung des Kurvenverlaufes zurückzuführen ist. Die Dichte liefert die Porosität, die wichtigste Kenngröße der Xerogel-Schichten.

Es wurden Untersuchungen mit zwei im Fraunhofer IWS hergestellten laserakustischen Messplätzen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung für Elastizitätsmodul  $E$  und Dichte  $\rho$ , wenn man auch berücksichtigt, dass beide Messsysteme unterschiedlichen Gerätegenerationen angehören.

Die Dichte  $\rho$  der Schichten wurde auch mit Röntgenreflektometrie (XRR) bestimmt. Die Werte stimmen gut mit den laserakustischen Werten überein.

### Prüfung von Störschichten in Siliziumwafern - Lösungsweg

Eine spezielle Version des LAwave-Gerätes wurde für die Bestimmung der Tiefe von Störschichten in Halbleitermaterialien entwickelt. Diese beim Sägen der Wafer entstehende, defektreiche Randzone muss in einem aufwendigen mechanisch-chemischen Prozess vollständig beseitigt werden. Für die Optimierung und die Kontrolle der Technologie muss die Tiefe dieser Randzone bestimmt werden.

Ein Gerät für diese Anwendung wurde für einen bekannten Hersteller von Siliziumwafern gebaut. Es ist für Scheiben mit einem Durchmesser bis zu 300-Millimeter ausgelegt und besitzt einen großen x-y-Tisch, der die laterale Messung ermöglicht (Abb. 2).

### Prüfung von Störschichten in Siliziumwafern - Ergebnisse

Die hohe Defektdichte an der Oberfläche verursacht eine Dispersionskurve der akustischen Oberflächenwellen, die mit zunehmender Frequenz abfällt. Der negative Anstieg der Kurve ist um so steiler, je tiefer die gestörte Zone ist.

Der Abtrag durch Ätzen verringert die Neigung der Dispersionskurve. Für den Endzustand, der zusätzlich poliert worden war, wird eine Kurve gemessen, die parallel zur Frequenzachse verläuft, was einem unbeschichteten, vollständig homogenem Material entspricht.

Dieses Verhalten legt nahe, die Neigung der Dispersionskurve zur Bestimmung der Störtiefe zu nutzen. Dafür muss die Messmethode mit Proben bekannter Störtiefe kalibriert werden.

Die Dicke der Störschicht  $d$  kann ermittelt werden, indem man die Differenz  $d = D_0 - D$  bildet. Der Wert  $D_0$  bezeichnet die Ätztiefe, für welche die Phasengeschwindigkeit nicht mehr von der Frequenz abhängt ( $\Delta c/\Delta f = 0$ ). Das Diagramm ermöglicht es, eine Kalibrierkurve  $d = F(\Delta c/\Delta f)$  aufzustellen. Diese erlaubt es, die Störtiefe  $d$  aus dem Anstieg  $\Delta c/\Delta f$  der Dispersionskurve zu bestimmen.

Die Dispersionskurven sagen auch etwas über die Eigenschaften des Substrates aus. Extrapoliert man sie zum Nullpunkt der Frequenz, zeigen sie die Geschwindigkeit  $c_0$  des defektfreien Substratmaterials an, das für alle Ätzstufen den gleichen Wert besitzt. Dieser ist allerdings von der Orientierung des Kristalls abhängig. Die Werte von  $c_0$  unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Messrichtung, so dass auch die Kristallorientierung kontrolliert werden kann.

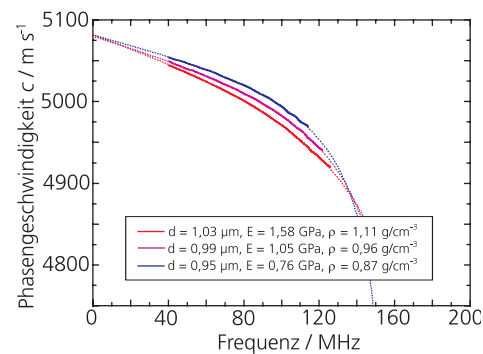


Abb. 1: Dispersionskurven von dielektrischen Xerogel-low-k-Schichten auf Silizium, E-Modul  $E$  und Dichte  $\rho$  der Schichten wurden aus den Kurven bestimmt, die Schichtdicke  $d$  wurde ellipsometrisch ermittelt



Abb. 2: Laserakustisches Prüfgerät für 300-mm-Wafer

### Ansprechpartner

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

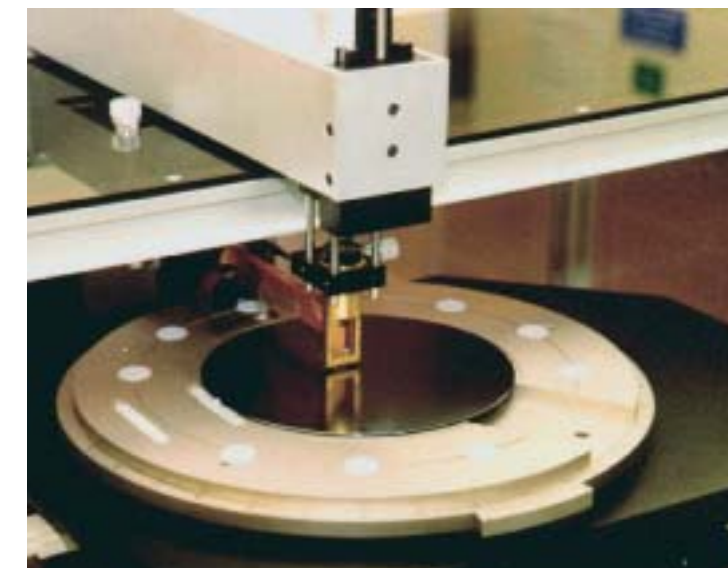


Abb. 3: Waferhalter für 300-mm-Wafer und laserakustische Prüfvorrichtung



## Kohlenstoffschichten als Antihafschichten

### Aufgabenstellung

Bei vielen Verarbeitungsverfahren ist das Anhaften des bearbeiteten Gutes am Bearbeitungswerkzeug oder an den Materialfluss leitenden Flächen ein wesentlicher die Qualität und / oder Produktivität einschränkender Faktor. Dieses Problem umfasst so unterschiedliche Anwendungsbereiche wie die Lebensmittelverarbeitung, die Druckindustrie und die Kunststoffverarbeitung. Daraus ergibt sich die Aufgabe, die Oberfläche so zu modifizieren, dass eine dauerhafte Antihafwirkung erreicht wird.

### Lösungsweg

Superharte amorphe Kohlenstoffschichten (Diamor®) zeigen Metallen gegenüber eine nur geringe Adhäsionsneigung, wie sie auch im niedrigen Reibungskoeffizienten ( $\approx 0,1$ , trocken gegen Stahl) zum Ausdruck kommt. Auf der Kombination von geringer Adhäsion und hohem Abriebwiderstand beruht die hervorragende Eignung dieser Schichten für die Trockenbearbeitung von z.B. Aluminiumlegierungen. Bei Flüssigkeiten oder Polymerschmelzen zeigen die reinen Kohlenstoffschichten dagegen kein ausgeprägtes Antihafverhalten. Der Benetzungswinkel für Wasser liegt mit  $\approx 60^\circ$  im mittleren Bereich, bei manchen Polymeren ist bei Erwärmung sogar eine Klebneigung festzustellen. Durch den Einbau von Fremdatomen können die Bindungsverhältnisse im Oberflächenbereich wesentlich modifiziert werden. Um eine solche Dotierung zu erreichen, wurde die Abscheidung der amorphen Kohlenstoffschichten mittels der Laser Arc-Technik (laser-gesteuerte gepulste Vakuumbogenabscheidung) nicht im Hochvakuum,

sondern in einer reaktiven Atmosphäre (z. B. Fluor, Stickstoff) von einigen Zehntel Pascal vorgenommen.

### Ergebnisse

Das unterschiedliche Verhalten der reinen und der dotierten Kohlenstoffschichten gegenüber einer Polypropylenoberfläche wird beim Vergleich der mittels MASIF-Messung (Measurement of Adhesion and Interaction Forces) gewonnenen Kraft-Abstandskurven bei Annäherung und bei Trennung deutlich: Bei der Annäherung der undotierten Kohlenstoffschicht ist ein kleiner "jump in" zu beobachten, die Oberflächen schnappen aufeinander zu. Umgekehrt ist zur Trennung eine beträchtliche Kraft von ca.  $0,015 \text{ N/m}$  erforderlich. Dagegen wirkt im Falle der F-dotierten Kohlenstoffschicht eine abstoßende Wechselwirkung zwischen den beiden Oberflächen. Diese durch die Fluordotierung erreichte geringe Adhäsionsneigung zeigt sich auch im zunehmendem Wasser-Benetzungswinkel: er steigt von  $60^\circ$  auf  $120^\circ$ . Wie Abbildung 1 a - c für eine laserstrukturierte Aluminiumoberfläche demonstriert, kann dieser Effekt durch Kombination mit einer geeigneten Mikrotopographie der Oberfläche weiter bis zum superhydrophoben Verhalten gesteigert werden.

Die aktuellen Entwicklungen konzentrieren sich auf die Minderung des mit der Dotierung verbundenen Härteverlustes, um so ein hydrophobes Oberflächensystem mit hoher Abriebfestigkeit zu schaffen.

## Partikelfilter für die industrielle Vakuumbogenbeschichtung

### Aufgabenstellung

Der Vakuumbogen stellt eine einfache und effektive Plasmaquelle für die Abscheidung dünner Schichten dar. Er zeichnet sich insbesondere durch einen hohen Ionisierungsgrad des produzierten Plasmas aus. Von Nachteil ist in der Regel, dass in einer Bogenentladung neben hochionisiertem Plasma auch schmelzflüssige Tröpfchen des Kathodenmaterials, sog. Droplets, produziert werden, die in die Schichten mit eingebaut werden. Dies führt meist zu einer erhöhten Schichtrauheit und hat bisher das Anwendungsspektrum dieses Verfahrens stark eingeschränkt.

Seit vielen Jahren werden Methoden zur Eliminierung der Droplets aus dem Plasma gesucht. Dabei wurden Plasmafilter entwickelt, mit denen völlig dropletfreie Schichten herstellbar sind. Die meisten der bekannten Filtermethoden sind aber relativ aufwendig im Aufbau und erfordern Sonderanlagen zum Betrieb mit stark eingeschränktem Anwendungsspektrum. Es galt, ein Filtermodul zu entwickeln, das einfach aufgebaut ist und an vorhandenen Bogenbeschichtungsanlagen genutzt werden kann.

### Lösungsweg

Auf der Grundlage eines elektromagnetisch wirkenden Lamellenfilters wurde ein Filtermodul entwickelt, optimiert und erprobt, das an industrielle Bogenbeschichtungsanlagen nachgerüstet werden kann. Abb. 1 zeigt ein solches Filtermodul für eine industrielle Vakuumbogen-Beschichtungsanlage.

### Ergebnisse

Mit dem entwickelten Lamellenfilter konnte eine erhebliche Reduzierung der Dropletbelastung der Schichten erreicht werden. Abb. 2a und 2b demonstrieren dies für Kupferschichten, die mit und ohne Plasmafilter hergestellt wurden. Mit dieser Filteranordnung konnte eine Plasmatransmission von ca. 20 % erreicht werden. Dies ist im Vergleich zur Transmission, die mit anderen Filterkonzepten erreicht werden, ein ausgezeichneter Wert. Mit dem kompakten Lamellenfilter ist es damit möglich, an kommerziellen Arc-Beschichtungsanlagen, den unikalen Vorteil des Vakuumbogens, die hohe Plasmaaktivierung, auch für die Abscheidung von Präzisionsschichten zu nutzen.

Mit dem vorgestellten Filter konnten ausgezeichnete Ergebnisse für Metallisierungen erreicht werden. Momentan wird an der Realisierung von Prozessen zur reaktiven Schichtabscheidung auf der Basis dieses Filterkonzeptes gearbeitet. Damit wird in Zukunft auch die Herstellung dropletarmer Hartstoffschichten möglich sein. Damit ergeben sich neue Perspektiven beispielsweise bei der Beschichtung hochpräziser Umformwerkzeuge.

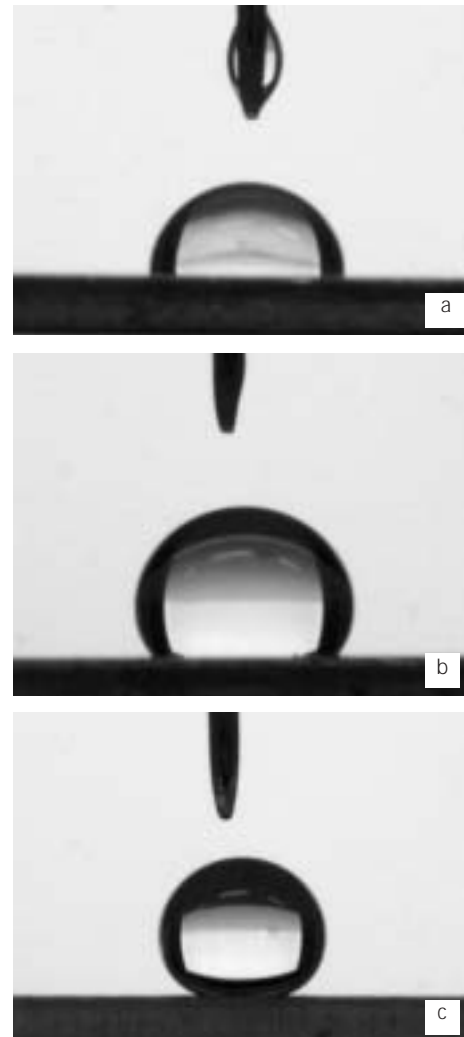


Abb. 1: Benetzung eines Aluminiumsubstrates durch einen Wassertropfen  
a) unbeschichtet (Benetzungswinkel  $88^\circ$ )  
b) mit dotiertem Kohlenstoff beschichtet (Benetzungswinkel  $124^\circ$ )  
c) mit dotiertem Kohlenstoff beschichtetes mikrostrukturiertes Aluminium (Benetzungswinkel  $> 150^\circ$ )

#### Ansprechpartner

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

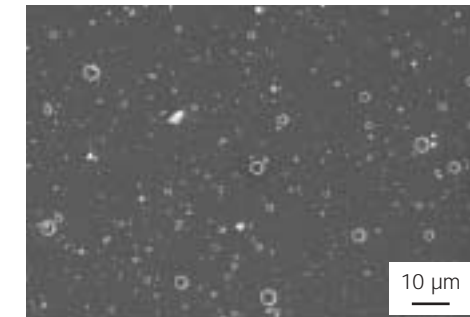


Abb. 2a: Kupferschicht, abgeschieden mit dc-Bogenverdampfung ohne Plasmafilterung (Schichtdicke 50 nm)



Abb. 2b: Kupferschicht, abgeschieden mit dc-Bogenverdampfung mit Plasmafilterung (Schichtdicke 50 nm)



Abb. 1: Filtermodul für industrielle Vakuumbogen-Beschichtungsanlagen. Der Filter kann an verschiedene Typen von Bogenverdampfern angepasst werden.

#### Ansprechpartner

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

## Atmosphärendruck-Plasma-CVD zur Beschichtung von Massengütern

### Aufgabenstellung

Angesichts der wachsenden Nachfrage nach wirtschaftlichen Technologien zur großflächigen Abscheidung funktionaler Schichten kommt den Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Prozessen (AP-PE-CVD) eine besondere Bedeutung zu. Ziel ist es, temperaturempfindliche Materialien wie Sonderstähle, Gläser oder Kunststoffe mit hochwertigen Funktionsschichten, die spezielle mechanische, elektrische oder optische Eigenschaften aufweisen, mit hohem Material-Durchsatz und kostengünstig zu beschichten.

Beispiele dafür sind:

- Oberflächenveredelung von Stahl mittels funktionaler Zwischenschichten zur Adhäsionsverbesserung nachfolgender Deckschichten und für den Korrosionsschutz,
- solarkatalytisch selbstreinigende Glasoberflächen sowie selektiv reflektierende Fenster zur Klimaregulation,
- kratzfeste / transparente Kunststoffoberflächen und Diffusionsbarrierschichten auf Lebensmittel-Verpackungsfolien.

Die bisher eingesetzten PVD- und Plasma-CVD-Techniken arbeiten ausschließlich im Unterdruckbereich. Die dazu notwendigen Vakuumanlagen führen zu erhöhten Investitions- und Betriebskosten, sie sind nur mit hohem Kosten- und Technologieaufwand auf größere Substratbreiten skalierbar und in verkettete Produktionslinien integrierbar. Bereits entwickelte und bei Atmosphärendruck einsetzbare Gasphasen-Schichttechnologien, wie die thermische CVD, erfordern sehr hohe Substrattemperaturen (> 600 °C) und sind deshalb nur für temperaturstabile Materialien einsetzbar.

Aufgabenstellung und technologische Herausforderung besteht daher in der

Entwicklung von kostengünstigen, skalierbaren Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Prozessen, die zur Hochratebeschichtung temperaturempfindlicher Materialien eingesetzt werden können. Dazu werden in Kooperation mit Herstellern von Plasmaquellen im IWS neuartige plasmachemische Hybrid-Beschichtungsverfahren entwickelt.

### Lösungsweg

Für die Plasmaerzeugung kommen im IWS sowohl thermische dc-Arc-Linienquellen als auch nichtthermische Mikrowellenquellen zum Einsatz. Vorteil der dc-Arc-Linienquelle (Abb. 4) ist eine sehr hohe Leistungsdichte. In dem erzeugten Plasmafaden von derzeit bis zu 300 mm Länge herrschen Temperaturen von > 10 000 K, die zu hohen Depositionsraten und besonderen Schichteigenschaften führen. Die Mikrowellenquelle (Abb. 3) zeichnet sich durch Bildung eines gleichmäßigen, großflächigen Volumenplasmas mit substratschonender Gastemperatur aus. Gleichzeitig ist die erreichbare Plasmaaktivierung infolge der hohen Elektronentemperatur so hoch, dass beliebige, auch chemisch sehr stabile Precursoren zur Beschichtung eingesetzt werden können.

Bei beiden Beschichtungsanlagen sind die Plasmaerzeugungszone von der Beschichtungszone räumlich getrennt (remote activation). Die Plasmaquelle wird von einem Trägergas schnell durchströmt, wodurch die im Plasmavolumen erzeugten aktiven Spezies in Richtung Substrat ausgetragen und dort mit den Precursoren vermischt werden. Damit wird eine Kontamination der Plasmaquelle vermieden und die Langzeitstabilität der Beschichtungsanlage gewährleistet.

Das Beschichtungsmaterial wird kontinuierlich, ohne mit den Reaktorwänden in Berührung zu kommen, über

den Reaktorkopf geführt. Der Einsatz von Gasschleusen garantiert eine Inertisierung der Beschichtungszone, so dass neben oxidischen auch sauerstofffreie Schichtmaterialien abgeschieden werden können.

Zur Optimierung der Plasmagas-, Precursor- und Inertisierungsgasströmungen wurden umfassende thermofluid-dynamische Modellierungen vorgenommen (Abb. 4).

Als wichtiges Werkzeug zur Prozessoptimierung dient die Charakterisierung des Plasmas durch optische Emissionsspektroskopie (Abb. 1) sowie in-situ-FTIR-Absorptionsspektroskopie (Abb. 4). Damit können Aussagen über Art und Energieinhalt der Plasmaspezies und die davon abhängigen plasmachemischen Reaktionen, wie zum Beispiel Precursoraufspaltung, abgeleitet werden. Zusammen mit der Schichtanalyse durch FTIR-Reflexionspektroskopie und UV-VIS-NIR-Spektroellipsometrie können Korrelationen zwischen Schichtstruktur und Prozessparametern aufgestellt werden. Während die FTIR-Reflexionspektroskopie Informationen zur Netzwerkstruktur, zu den Bindungsverhältnissen und zur Zusammensetzung der Schicht liefert, können mittels UV-VIS-NIR-Spektroellipsometrie Schichtdicke und optische Materialfunktionen, wie Brechungs- und Absorptionsindex, sowie daraus abgeleitete, festkörperphysikalische Kenngrößen, wie Bandlücke, Elektronenbeweglichkeit und Defektniveaus, ermittelt werden.

### Ergebnisse

Mittels Mikrowellen-AP-CVD konnte die SiO<sub>2</sub>-Beschichtung von temperaturempfindlichen Materialien, wie vergütetem Stahlblech oder Glas, hinsichtlich Schichteigenschaften optimiert werden. In Abhängigkeit von den Depositionsparametern werden wahl-

weise amorphe oder mikrokristalline Schichten abgeschieden, deren optische Eigenschaften denen von Quarzglas weitgehend entsprechen (Abb. 2). Die Ergebnisse der Schichtcharakterisierung durch FTIR-Reflexionspektroskopie und UV-VIS-Spektroellipsometrie zeigen, dass sich auf dem Substrat eine stöchiometrische SiO<sub>2</sub>-Schicht bildet (Abb. 2). Bei Schichten mit einer Dicke von über 150 nm besteht die Schicht hauptsächlich aus kompakten SiO<sub>2</sub>. Nur 10 % der Schichtdicke bilden eine Oberschicht aus optisch dünnerem (porösen) SiO<sub>2</sub>. Dünnere Schichten mit einer Dicke unter 150 nm weisen ein gradientenförmiges Schichtprofil auf, d.h. die Porosität nimmt allmählich in Richtung Schichtoberfläche zu.

Ein Beispiel für die Abscheidung nichtoxidischer Schichten ist die Herstellung von a-C:H-Schichten aus einfachen Kohlenwasserstoffen, wie Methan oder Ethen mittels DC-Arcjet-CVD. Die Schichten weisen eine hohe optische Transparenz und gute Haftfestigkeit auf.

Mit beiden Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Anlagen können Schichten auf Produkten aus beispielsweise Edelstahl, korrosionsgeschütztem Feinblech, Glas- oder Kunststoffen mit einer Depositionsrate von derzeit bis zu 80 nm s<sup>-1</sup> abgeschieden werden. Die Substrattemperatur liegt dabei unter 200 °C.

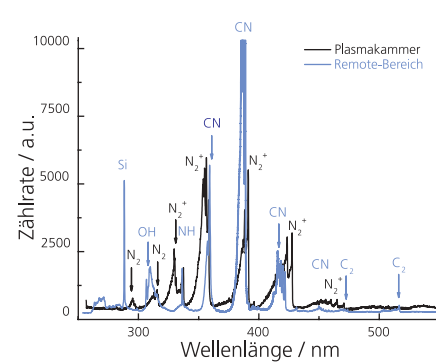


Abb. 1: Optisches Emissionsspektrum eines Mikrowellen-AP-CVD-Plasmas zur SiO<sub>2</sub>-Beschichtung: Vergleich des Plasmas in Quellennähe sowie in Substratnähe nach Precursorzumischung

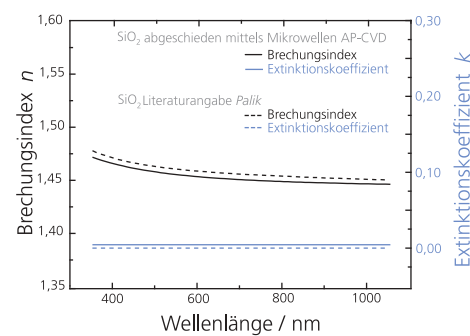


Abb. 2: Bestimmung der optischen Funktionen Brechungsindex und Extinktionskoeffizient einer SiO<sub>2</sub>-Schicht auf Edelstahl



Abb. 3: Mikrowellen-AP-CVD-Anlage: Für Atmosphärendruck-CVD nutzbare Plasmaflammen außerhalb der Quelle

### Ansprechpartner

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

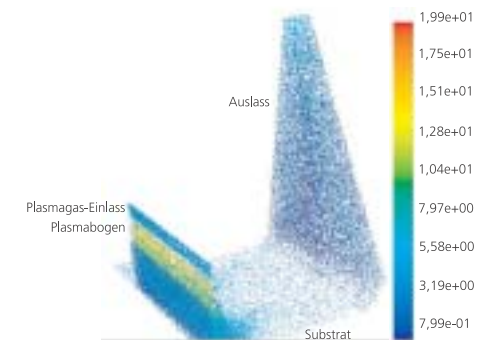


Abb. 4: Thermofluid-dynamische Modellierung der Gasgeschwindigkeiten eines dc-Arcjet-CVD-Reaktors



Abb. 5: Arcjet-CVD-Anlage während der Beschichtung von Stahlbändern



## Entwicklung spektroskopischer Sensoren zur Anlagensteuerung

### Aufgabenstellung

Die optimale Funktion von industriellen Anlagen steht oftmals im direkten Zusammenhang mit der Zusammensetzung der in ihr befindlichen Gasatmosphäre, deren Zusammensetzung in engen Grenzen kontrolliert werden muss. So basieren eine Reihe von Beschichtungsverfahren (z. B. CVD-Verfahren) oder Glüh- und Sinteranlagen auf Gasphasenprozessen, deren Zusammensetzung unmittelbar die Qualität der Produkte bestimmt. Weitere Beispiele betreffen Anlagen zur Erzeugung oder Reinigung von bestimmten Gasatmosphären, die herkömmlich durch Steuerung äußerer Parameter, wie Gasflüsse, Temperatur und Druck gefahren werden.

Durch nachgelagerte (stichprobenhafte) Qualitätsprüfung der Produkte werden die Steuerparameter bei Bedarf adjustiert, verbunden mit zwischenzeitlichen Qualitätseinbußen. Dieser Mangel kann nur behoben werden, wenn es gelingt, die Zusammensetzung der Gasatmosphäre on-line zu messen und durch Regelung zu stabilisieren. Dafür sind Multikomponenten-Gassensoren erforderlich, die sich hinsichtlich Robustheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit für den Einsatz in der Industrie eignen. Mit Hilfe der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) ist man in der Lage, selbst hochkomplexe Gasgemische qualitativ und quantitative simultan zu charakterisieren. Das Konzept einer auf infrarot-spektroskopischen Daten beruhenden Steuerung ist erstmals auf Anlagen zur Gasreinigung angewandt worden.



Abb. 1: Abgasreinigungsanlage mit integriertem FTIR-Gassensor

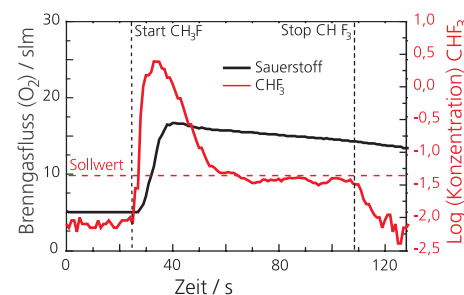


Abb. 2: FTIR-spektroskopisch geregelte Brenngasdosierung (dargestellt O<sub>2</sub>) zur Entsorgung eines CHF<sub>3</sub>-Abgases

### Ansprechpartner

Dr. Wulf Grählert  
Tel.: 0351 / 2583 136  
wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de

### Lösungsweg

Thermochemische Abgasentsorgungsanlagen kombinieren die chemische Zersetzung (oft Verbrennung) der zu entsorgenden Abgase mit einer Gaswäsche. Um die geforderte Entsorgungssicherheit zu gewährleisten, werden die notwendigen Brenngase im Überschuss gefahren. Die on-line-Überwachung der Zusammensetzung des gereinigten Abgases und die Rückkopplung auf die Parameter des Gasreinigungsprozesses ermöglicht dagegen eine optimale, d.h. auf die tatsächliche Abgaszusammensetzung abgestimmte Entsorgung. Damit wird die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit dieser im großen Maßstab beispielsweise in der Elektronikindustrie (Wafer-Fertigung) eingesetzten Abgasentsorgungsanlagen verbessert.

### Ergebnisse

In eine Abgasentsorgungsanlage wurde eine FTIR-Sensoreinheit zur in-situ-Messung der Abgasatmosphäre integriert (Abb. 1). Anhand des Absorptionsspektrums des Abgases wurde die Zusammensetzung des Abgases ermittelt und die Spektralbereiche, deren Absorptionscharakteristik direkt mit der Entsorgungseffizienz korrelieren, ausgewählt. So ist die Entsorgungseffizienz in Abhängigkeit von den aktuellen Betriebsparametern (u.a. O<sub>2</sub>-Fluss) infrarotspektroskopisch sehr einfach zugänglich. Darauf aufbauend konnte eine Regelstrecke erstellt werden, die in Abhängigkeit vom tatsächlichen Schadgasgehalt die Parameter des Entsorgungsprozesses einstellt (Abb. 2). Durch diesen Regelkreis wird eine effiziente Abgasreinigung - d.h. ein hoher Reinigungsgrad bei minimalem Aufwand - auch bei sich zeitlich stark ändernden Schadgaskonzentrationen kontinuierlich gewährleistet.

## Qualitätssicherung in der industriellen Hartstoffbeschichtung mittels Laser-Akustik

### Aufgabenstellung

Durch Beschichtung mit harten, dünnen Schichten gelingt es, die Lebensdauer von Werkzeugen und Komponenten wesentlich zu steigern und gleichzeitig Bearbeitungsqualität und Prozesssicherheit zu erhöhen. In der industriellen Hartstoffbeschichtung kommt es darauf an, die bei der Technologieentwicklung erreichten Schichtqualitäten im Routinebetrieb zuverlässig zu reproduzieren. Dazu ist es erforderlich, die abgeschiedenen Schichten selbst einer Nachkontrolle zu unterziehen. Ein in der industriellen Praxis einsetzbares Qualitätskontrollverfahren sollte das Beschichtungsergebnis schnell, zerstörungsfrei und zuverlässig analysieren.

### Lösungsweg

Bei der Optimierung und der routinemäßigen Kontrolle von superharten Kohlenstoff- und Diamantschichten hat sich das im Fraunhofer IWS entwickelte laser-akustische Verfahren bewährt. Auf diesen Erfahrungen aufbauend wurden die Möglichkeiten dieses Prüfverfahrens als Qualitätskontrollmittel für industrielle Hartstoffbeschichtungen evaluiert. Der laser-akustische Messplatz LAwave® der Fa. ALOtec, mit dem die IWS-Entwicklung in ein kommerzielles Gerät umgesetzt wurde, erlaubt es, den mechanischen Zustand eines Schicht-Substrat-Systems in weniger als einer Minute pro Messung reproduzierbar und zerstörungsfrei zu analysieren.

Das LAwave®-Messergebnis erscheint in Form der frequenzabhängigen Schallgeschwindigkeit (Dispersionskurve), die eine Art "Fingerabdruck" des Substrat-Schicht-Systems darstellt.

In Abb. 1 sind gemittelte Messkurven von unbeschichteten und beschichteten Substraten dargestellt, wobei die drei erkennbaren Geschwindigkeitsbereiche durch den Kobaltgehalt im Substrat bestimmt sind. Schichteigenschaften wie Elastizitätsmodul, Dichte und Dicke der abgeschiedenen Schicht beeinflussen die Form der Messkurven. Diese Kenngrößen können deshalb durch Vergleich mit berechneten Kurven über eine Fit-Prozedur aus der Dispersionskurve abgeleitet werden. Für die Prüfpraxis genügt vielfach eine vereinfachte Auswertung, die eine charakteristische Messgröße (z. B. Anstieg der Dispersionskurve) verwendet.

### Ergebnisse

Die Benutzung der LAwave®-Technik als Qualitätskontrollmittel wurde erfolgreich am Beispiel der Beschichtung von Wendeschneidplatten (Abb. 2) demonstriert. Damit steht eine effektive Methode zur Verfügung, sowohl den Ausgangszustand der Substrate als auch das Beschichtungsergebnis zu kontrollieren.

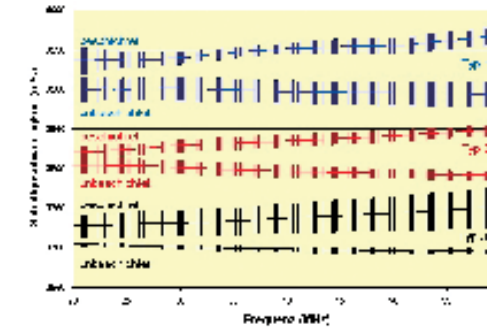


Abb. 1: Laser-akustische "Fingerabdrücke" für Werkzeuge aus Wolframkarbid mit unterschiedlichem Kobaltgehalt (unbeschichtet und beschichtet)



Abb. 2: Mit Wendeschneidplatten beladene Beschichtungskammer

### Ansprechpartner

Dr. Thomas Schülke  
Tel.: 001 / 517 / 432 81 73  
tschuelke@fraunhofer.org

## FuE-Angebot: Thermische Beschichtungsverfahren

**Redaktion:** Im Fraunhofer IWS Dresden wurde in den letzten Jahren das laserunterstützte atmosphärische Plasmaspritzen (LAAPS) als neues Hybridverfahren entwickelt und patentiert. Wie ist heute der Stand?

**Dr. Nowotny:** Erst durch den Aufbau neuer Anlagentechnik war es uns in den vergangenen beiden Jahren möglich, das Prinzip und die Vorteile des laserunterstützten Plasmaspritzens in praktische Anwendungen umzusetzen. Ein neuer, laserintegrierter Innenspritzbrenner ermöglicht erstmalig auch die Anwendung des LAAPS an Innenflächen bei einem minimalen Bohrungsdurchmesser von 70 mm. Insbesondere bei Schichten aus metallischen Hartlegierungen liegen nun Erfahrungen vor, die zeigen, dass die Schichten auch extreme Beanspruchungen ertragen. Das Beschichten selbst geht aber wesentlich schneller und ist preiswerter als mit dem Laserstrahl-Auftragschweißen allein.

**Redaktion:** Und nun wird das Laser-Auftragschweißen nicht mehr praktiziert?

**Dr. Nowotny:** Doch, ganz im Gegenteil. Auf dem Gebiet des Laser-Auftragschweißens verfügen wir mit den im IWS entwickelten und patentierten, modular aufgebauten Koaxialdüsen über Systemtechnik, die von Firmen und Forschungsinstituten rege nachgefragt wird. Im Unterschied zum laserunterstützten Spritzen wird das Auftragschweißen dort angewendet, wo die höchste Präzision der Beschichtung oder ein 3D-Strukturaufbau gefragt sind. Wir konnten allein im vergangenen Jahr wieder 6 solcher Systeme mit den zugehörigen Technologien in die Praxis des Reparierens von Umformwerkzeugen, Flugzeugtriebwerken und stationären Gasturbinen überführen.

Die Auftraggeber kamen aus Deutschland, der Schweiz, Holland, den USA und Japan.

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

**Dr. Nowotny:** Bei der Melato-Technologie (Metal Laminated Tooling) handelt es sich um ein neues Verfahren zur schnellen Herstellung größerer Werkzeuge und Formen aus Stahl. Die CAD-Modelle der Werkzeuge werden in parallele Schnittebenen zerlegt, die dann auf Blechtafeln übertragen und mit dem Laser ausgeschnitten werden. Diese Ausschnitte werden anschließend gestapelt, gefügt und stellen so, Blech um Blech, das Werkzeug dar. Beispielsweise lassen sich auf diese Weise voll funktionsfähige Prägwerkzeuge in nur 10 % der bisher benötigten Zeit herstellen. Die Technologie wird in einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt entwickelt. Gegenwärtig können reale Werkzeuge gefertigt werden, die sich auch bereits im Praxistest bei Industriepartnern bewährt haben.



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





Dr. Steffen Nowotny  
Abteilungsleiter  
(Tel. 2583 241)



Dr. Lutz-Michael Berger  
Gruppenleiter Thermisches Spritzen  
(Tel. 2583 330)



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

### Verschleißschutz und funktionale Beschichtungen

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

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

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



Plasmaspritzen einer Welle

### 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:

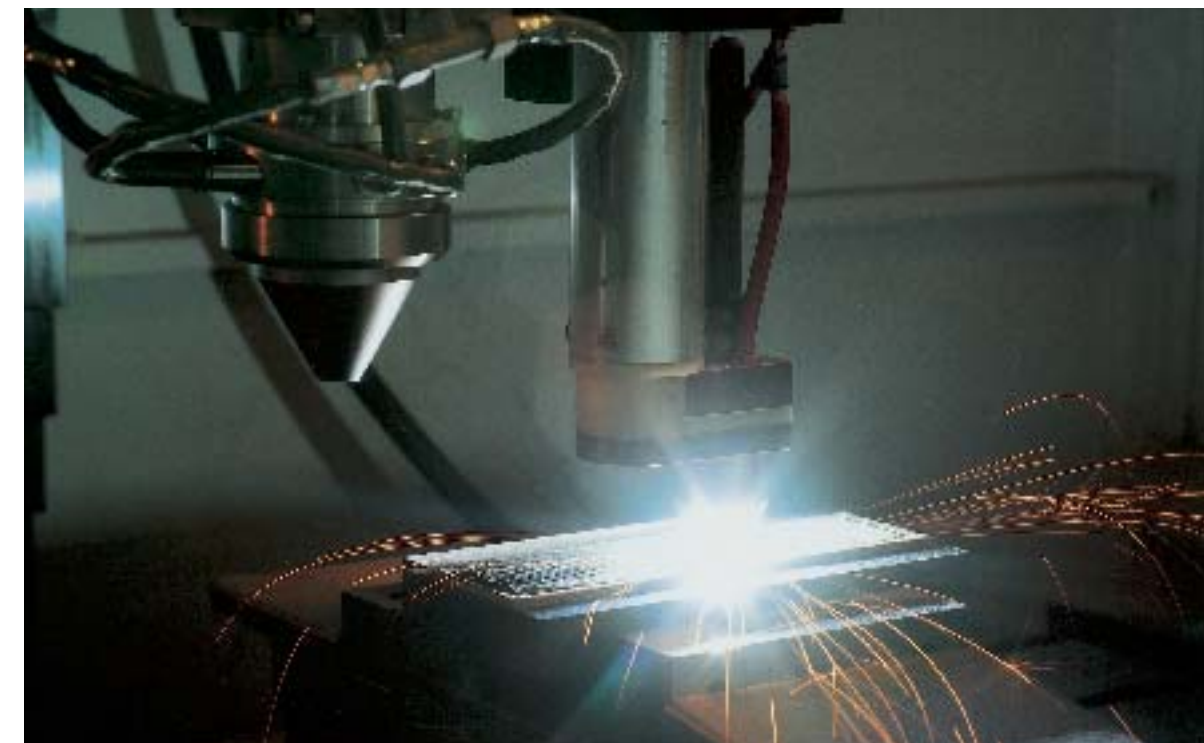
- schnelle und flexible Bauteil-Digitalisierung und Datenbearbeitung,
- präzise Reparatur und Beschichtung von Bauteilen und Werkzeugen, auch mit komplexer Form,
- Fertigung von metallischen und hartstoffhaltigen Mustern und Prototypen direkt aus den CAD-Daten des Auftraggebers,
- systemtechnische Komponenten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



Verschiedene im IWS entwickelte Pulverdüsen

### Beispiele aus den Arbeiten 2002

1. Fortschritte bei der Fertigung lamellierter Werkzeuge 54
2. Generieren von Titan- und Aluminiumstrukturen durch Laser-Pulver-Auftragschweißen in kontrollierter Atmosphäre 55
3. KOAXn: Pulverdüsen zum Präzisionsauftragschweißen auch in extremen Schweißlagen 56
4. Innenbeschichtungskopf für das laserunterstützte atmosphärische Plasmaspritzen (LAAPS) 57
5. Thermische Spritztechnik für anspruchsvolle Schichtsysteme 58



Prozess des Plasma-Pulver-Auftragschweißens

## Fortschritte bei der Fertigung lamellierter Werkzeuge

### Aufgabenstellung

Ziel des vom BMBF geförderten Verbundprojektes ist die Entwicklung und Qualifizierung einer neuen Prozesskette zur schnellen Fertigung von komplex geformten Werkzeugen aus Blechlamellen (MELATO - Metal Laminated Tooling). Dafür wird die gesamte Kette vom Schneiden über das Paketieren und Fügen der Bleche bis zum Nachbehandeln und Nachbearbeiten der Werkzeuge qualifiziert.

### Lösungsweg

Das FuE-Ziel soll mittels einer durchgängigen Lösung für das Schneiden, Paketieren und Fügen von Stahlblech-Ausschnitten nach dem Prinzip des Laminated Object Manufacturing erreicht werden. Die gewünschten Gebrauchseigenschaften werden durch die spanende Endbearbeitung und thermische Oberflächenbehandlung der laminierten Werkzeuge eingestellt. Die Nutzung und Integration verschiedener laserbasierter Verfahren (Schneiden, Schweißen, Auftragschweißen) ermöglicht eine hohe Flexibilität des Fertigungsablaufs und eine schnelle geometrische Modifizierbarkeit der Werkzeuge.

### Ergebnisse

Im ersten Bearbeitungsabschnitt wurden die anlagentechnischen Voraussetzungen geschaffen und die Fertigungsgrundlagen weiterentwickelt. Speziell entwickelte Softwaretools ermöglichen nunmehr, CAD-Modelle in beliebiger Richtung mit beliebiger Blechdicke zu slicen, die erzeugten Segmente platzsparend auf einer Blechplatte zu verteilen und das Schneidprogramm

unmittelbar aus diesen Daten zu generieren.

Zur Verbesserung der Qualität der Lamellenwerkzeuge wurde darüber hinaus ein Konzept zum konturangepassten Slicen entwickelt. Während alle zur Zeit verfügbaren Layer-Technologien Bauteile in nur einer Baurichtung (meist Z-Richtung) generieren können, ist es damit möglich, die Slice-Richtung partiell an die Topologie des Werkzeuges anzupassen (Abb. 1). Die Treppenstruktur und folglich der Nachbearbeitungsaufwand wird dadurch minimiert oder, in Kombination mit 3D-Laserschneiden, ganz vermieden. Gleichzeitig verbessern sich die Bearbeitungsbedingungen für die Fräsnachbearbeitung. Das lamellierte Werkzeug kann direkt mittels HSC geschlichtet werden.

Mit der Fertigung lamellierter Werkzeuge für spezielle Anwendungsgebiete wurde begonnen. Schwerpunkt war die Erstellung von Prägwerkzeugen. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen beispielhaft ein Matrizenwerkzeug mit den Abmessungen  $700 \cdot 500 \cdot 210 \text{ mm}^3$ . Hier wurde mit 2 Slice-Richtungen gearbeitet. Die inneren relativ flachen Bereiche wurden in X-Richtung gesliced und die steilen Bereiche in Z-Richtung. Die Blechstärke beträgt 2 mm.

Die lasergeschnittenen Querschnitte des Werkzeuges können in einem Rahmen verspannt und durch Fräsen und Polieren nachbearbeitet werden. Anschließend erfolgte die Erprobung durch Tiefziehen von Prototypen. Die Vermeidung der aufwendigen Herstellung des Rohteilblocks durch Gießen und die Einsparung des großen Fräsvolumens sind entscheidende Vorteile der Lamellentechnik.

## Generieren von Titan- und Aluminiumstrukturen durch Laser-Pulver-Auftragschweißen in kontrollierter Atmosphäre

### Aufgabenstellung

Die Reparatur von Werkzeugen und Bauteilen durch Laser-Pulver-Auftragschweißen von Kobalt- und Nickelbasispulvern wird in der Industrie zunehmend angewendet. Insbesondere die geringe Temperaturbeanspruchung der Bauteile und die hohe Endkonturnähe der aufgetragenen Beschichtung wiegen die im Vergleich mit dem WIG-Hand- oder Plasma-Pulver-Auftragschweißen höheren Kosten des Verfahrens auf. Im Rahmen verschiedener industrieller Forschungsprojekte war zu untersuchen, ob die genannten Vorteile auch bei der Reparatur von Triebwerkskomponenten aus Titan und Einsätze für Spritzgussformen aus Aluminium erzielt werden können.

### Lösungsweg

Die hohe Affinität von Titan- und Aluminium zu Sauerstoff erfordert eine konsequente Abschirmung des Schmelzbades von Luft. Kann dies nicht realisiert werden, sind Bindefehler und Poren sowie eine starke Aufhärtung innerhalb der Beschichtung die Folge.

Die Beschichtungsversuche erfolgten mit einem Festkörperlaser mit 3 kW-Ausgangsleistung. Für den Transport der pulverförmigen Zusatzwerkstoffe in das Schmelzbad kommt die im IWS entwickelte Koaxialpulverdüse zum Einsatz, die eine lokale Schutzgasabschirmung erlaubt. Die Beschichtung von Titan erfordert Sauerstoffgehalte  $< 10 \text{ ppm}$ . Deshalb wurde für die Beschichtungsversuche an kleineren Bauteilen eine Kammer mit einstellbarer Atmosphäre gefertigt und erprobt. Die Beschichtung von Bauteilen mit bis zu  $800 \text{ mm} \cdot 500 \text{ mm}$  Größe kann zukünftig in der Vakuumkammer einer VPS-Anlage erfolgen.

### Ergebnisse

Die unter Schutzgasatmosphäre erzeugten Beschichtungen aus Titan weisen nahezu keine Fehler und eine hohe Endkonturnähe auf. Im Vergleich zum Grundgefüge wird in der Schicht ein Härteanstieg von nur etwa 10 % gemessen, basierend in erster Linie auf einem sehr feinkörnigen Gefüge infolge der Selbstabschreckung. Die mechanische Endbearbeitung der hergestellten Baukörper bereitet keine Probleme.

Bei der Beschichtung der Aluminiumlegierungen ist das Ergebnis stark vom Verhältnis des aufgetragenen Volumens zur Bauteilgröße abhängig. Beim 3D-Strukturaufbau erschwert die gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminium eine hohe Konturtreue der Beschichtung, da sehr schnell größere Bereiche als gewollt anschmelzen und die Schmelze stark überhitzt. Möglicherweise kann hier eine temperaturgesteuerte Laserleistungsregelung Verbesserungen bringen. Einzelspuren mit Spurbreiten von 3 bis 5 mm und einer Höhe von 0,5 bis 1,5 mm sind nahezu fehlerfrei herstellbar. Die Härtesteigerung in der Schicht ist vernachlässigbar. Das Verfahren wird im Hinblick auf geeignete Verfahrensstrategien für mehrlagige Beschichtungen weiterqualifiziert. Darüber hinaus wird Magnesium als Grundwerkstoff in die Untersuchungen einbezogen.

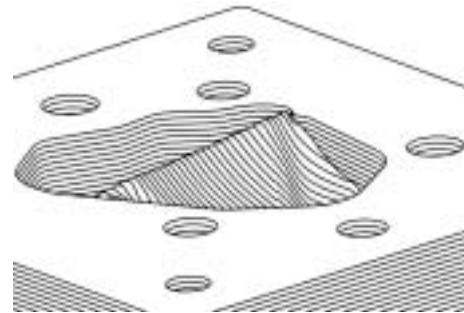


Abb. 1: Konturangepasstes Slicen

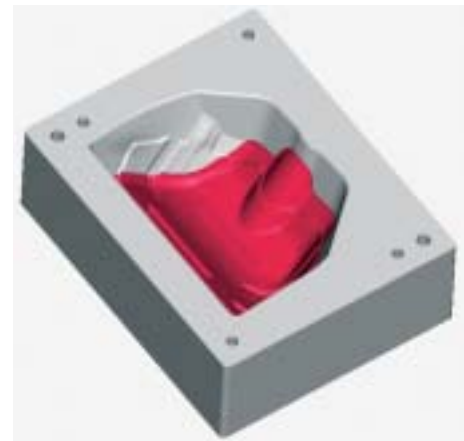


Abb. 2: 3D-CAD-Matrizenwerkzeug



Abb. 3: Matrizenwerkzeug

### Ansprechpartner

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

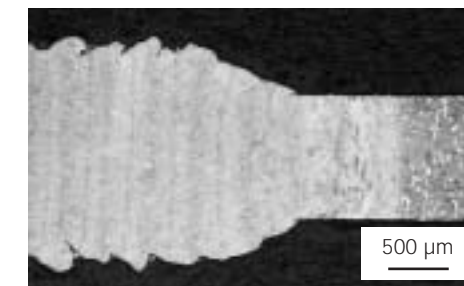
Abb. 2: Al-Modell,  
a) mit LPA generiert  
b) mechanisch überarbeitet

Abb. 1: Schliffbild Ti-Legierung

### Ansprechpartner

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



## KOAXn: Pulverdüsen zum Präzisionsauftragschweißen auch in extremen Schweißlagen

### Aufgabenstellung

Das Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen mit Koaxialpulverdüsen hat sich zur Reparatur von Dampf-, Gas- und Flugzeugturbinenkomponenten sowie im Werkzeug- und Formenbau etabliert. Es kommen CO<sub>2</sub>-, Nd:YAG- und Diodenlaser mit bis zu 6 kW Leistung zum Einsatz. Für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete bedarf es robuster Bearbeitungsköpfe, die leicht an den jeweiligen Anwendungsfall adaptierbar sein müssen. Im industriellen Einsatz sollen die Düsenstippen außerdem schnell ausgetauscht werden können. Oftmals bestehen auch Forderungen nach besonders kleinen und leichten Düsen, um auch Stellen mit eingeschränkter Zugänglichkeit zu erreichen oder komplexe Auftragsschweißungen in CNC-Maschinen oder Robotersystemen zu ermöglichen. Weiterhin muss für das Präzisionsauftragschweißen in extremen Schweißlagen die Ausbildung eines stabilen und möglichst kleinen Pulverfokus in jeder beliebigen Position gewährleistet werden.

### Lösungsweg

Für die in der Industrie zum Einsatz kommenden unterschiedlichen Laserarten, Fabrikate und Optiken wurde eine neue konstruktive Lösung gefunden. Die Pulverdüse besteht nun aus den drei Modulen Pulverzufuhr / Pulververteilung, wassergekühlte, austauschbare Düsenstippen und Halte- / Justiereinrichtung. Durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen konnte das Gewicht der Koaxialpulverdüsen reduziert werden. Unter Beibehaltung des modularen Grundkonzepts wurden die Außenabmessungen verringert. Für das Auftragschweißen in extremen Schweißlagen erfolgte eine Segmentierung der Pulverführung in der Düse.



Abb. 1: Pulverdüsenentwicklung, KOAX 8 (links), KOAX 9 für Nd:YAG (rechts), KOAX 10 für Diodenlaser (hinten)



Abb. 2: KOAX 10, kombiniert mit Gelenkarmroboter, zum Beschichten von Freiformflächen

#### Ansprechpartner

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

### Ergebnisse

Abb. 1 zeigt die heute verfügbaren unterschiedlichen Düsenarten und -größen. Alle für das Laserauftragschweißen benötigten Medien wie Pulver, Schutzgas und Kühlwasser werden mit nach oben geneigten Schnell- und Schraubverschlüssen an die Pulverdüse angeschlossen. Damit ist eine optimale Zuführung der Medien gewährleistet. Die schnell austauschbaren Düsenstippen können leicht an verschiedene Anwendungen angepasst werden. So sind Varianten mit zusätzlicher Kühlung, verschiedenen Abständen zwischen Bearbeitungsebene und Düsenstippen sowie unterschiedliche Winkel zur Ausbildung des Pulverfokus realisiert worden.

Das Gewicht der kleinsten verfügbaren Düse aus Aluminium beträgt 290 g gegenüber 1500 g bei den größeren und robusteren Messing-Düsen. Besonders für Präzisionsbeschichtungen mit geringer Laserleistung und Optiken, die hohen Beschleunigungen ausgesetzt sind, ist dies von Bedeutung. Die Verkleinerung der Pulverdüse bei gleicher Funktionalität gewährleistet außerdem eine einfachere Integration des Laserauftragschweißens in vorhandene Anlagen sowie eine Erhöhung der Zugänglichkeit für komplexe Beschichtungsaufgaben. Abb. 2 zeigt eine Roboterlösung zum Auftragschweißen von Freiformflächen. Durch die Aufteilung der Pulverführung in der Düse sowie die Segmentierung des Düsenstippen-Innenen kann ein konstanter Pulverfokus in jeder beliebigen Schweißposition realisiert werden. Selbst Über-Kopf-Schweißungen sind damit möglich.

## Innenbeschichtungskopf für das laserunterstützte atmosphärische Plasmaspritzen (LAAPS)

### Aufgabenstellung

Verschiedene Bauteile aus den Bereichen der Automobilindustrie sowie des Formen- und Werkzeugbaus müssen an innenliegenden Flächen wirkungsvoll vor Verschleiß oder chemischem Angriff geschützt werden. Mit den klassischen thermischen Beschichtungsverfahren einschließlich der verfügbaren Systemtechnik bestehen jedoch oftmals Einschränkungen hinsichtlich der Zugänglichkeit, oder die geforderten Schichteigenschaften können nicht in vollem Umfang eingestellt werden. Es bestand somit die Aufgabe, einen Innenbeschichtungskopf für die industrietaugliche Umsetzung des LAAPS-Verfahrens zu entwickeln. Insbesondere sollte dieses Gerät modular aufgebaut, das heißt mit verschiedenen Spritzbrennern kombinierbar sein und eine flexible Anpassung an verschiedene Innendurchmesser sowie Variationen der Spritzparameter ermöglichen.

### Lösungsweg

In der hier vorgestellten Lösungsvariante ist die spritztechnische Basis ein modifizierter Plasmabrenner vom Typ F1 mit einer Leistung von 20 kW. Zur Überlagerung von Spritz- und Laserstrahl wurde ein spezielles optisches System entwickelt und mit dem Plasmabrenner gekoppelt. Geometrisch ist hierbei eine off-axis-Anordnung beider Strahlen realisiert worden. Das Optikkonzept ist so ausgelegt, dass ohne größeren Aufwand eine Verbindung zu verschiedenen Standard-Spritzbrennern erfolgen kann, wodurch der Bearbeitungskopf variabel für unterschiedliche Applikationen einsetzbar ist.

### Ergebnisse

Der Laser-Spritzbrenner ist stationär ausgeführt, das heißt, er taucht während des Beschichtungsvorganges in das rotierende Werkstück ein. Die größtmögliche Eintauchtiefe beträgt 300 mm, der minimale Innendurchmesser 70 mm. Die Laseroptik ist für eine maximale Nd:YAG-Laserleistung von 4 kW ausgelegt. Der kleinstmögliche Spritzabstand beträgt 35 mm. Der Durchmesser des Spritzstrahls liegt hier bei 5 mm und wird durch den Laserbrennfleck vollständig überdeckt. In gewissen Grenzen ist eine Variation von Spritzabstand und Arbeitsflechtdurchmesser möglich. Die optischen Komponenten sind durch einen Quergasstrom wirkungsvoll vor den reflektierten Spritzteilchen geschützt. In Verbindung mit der Kühlung des gesamten Systems ist damit eine hohe Langzeitstabilität gewährleistet. Die laufenden FuE-Arbeiten konzentrieren sich auf die Verarbeitung verschiedener Metallpulver auf Ni-, Co-, Mo- und Al-Basis mittels des neuen Kopfes. Die Verarbeitung von Oxidkeramik und karbidischen Hartstoffen konnte demonstriert werden, allerdings ist das Hybridverfahren für diese Werkstoffgruppen weniger geeignet.



Abb. 1: Detailansicht von Plasmakopf und Laserstrahl-Austrittsfenster mit Cross-Jet



Abb. 2: Gesamtansicht des Beschichtungskopfes, bestehend aus 20 kW Plasmabrenner, Nd:YAG-Laseroptik und integrierten Medienzuführungen

#### Ansprechpartner

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

## Thermische Spritztechnik für anspruchsvolle Schichtsysteme

### Aufgabenstellung

Die ständig steigenden Anforderungen an moderne Maschinen und Anlagen hinsichtlich Lebensdauer, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit erfordern den Einsatz von modernen Oberflächentechnologien bei ihrer Fertigung. Die Verfahrensgruppe des thermischen Spritzens (Plasmaspritzen in verschiedenen Varianten, Hochgeschwindigkeitsflammspritzen [HVOF], Flammspritzen, u.a.) ermöglicht eine effektive Modifikation von Bauteiloberflächen entsprechend ihrem Einsatzgebiet.

Thermisch gespritzte Schichten (in der Regel mit Schichtdicken im Bereich 100 - 400  $\mu\text{m}$ ) zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität der Beschichtungswerkstoffe (Metalle, Legierungen, Keramiken, Hartmetalle, Polymere) aus. Darüber hinaus kann die Technologie auch zur Bauteilfertigung selbst eingesetzt werden (Sprayforming). Typische klassische Einsatzgebiete sind der Verschleiß- und der Korrosionsschutz sowie Wärmedämmung und elektrische Isolation. Zunehmend werden multifunktionelle Schichtsysteme entwickelt, die z.B. Verschleißschutz mit weiteren Eigenschaften kombinieren.



Abb. 1: Anlage zum atmosphärischen Plasmaspritzen in einer Schallschutzkabine mit Vorrichtung zum Wellenhandling und 6-Achs-Roboter

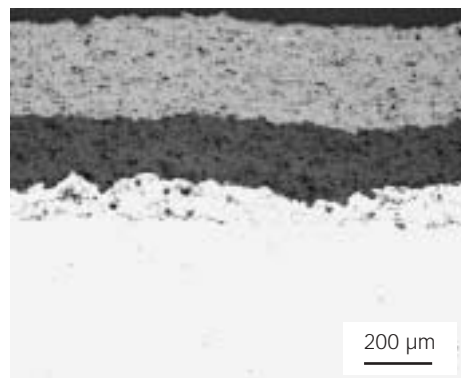


Abb. 2: Lichtmikroskopische Aufnahme des Querschliffes einer APS-gespritzten Probe zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit. Substrat: Stahl, Bondcoat: NiAl, Isolationsschicht:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Funktionsschicht:  $\text{TiO}_2$ .

### Ansprechpartner

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

### Lösungsweg

Im IWS existieren Anlagen zum atmosphärischen Plasmaspritzen (APS) und zum Vakuumplasmaspritzen (VPS), die in den Abbildungen 1 und 4 dargestellt sind. Beide Anlagen sind mit einem Brenner des Typs F6 und einem 6-Achs-Handlingsystem sowie einem Drehtisch ausgerüstet. Die APS-Anlage verfügt darüber hinaus noch über ein Handlingsystem für Wellen bis zu 3 m Länge und kann mit einem speziellen Brenner zur Innenbeschichtung betrieben werden.

Entsprechend den spezifischen Anforderungen verschiedener Schichtsysteme können Argon, Wasserstoff, Helium und Stickstoff als Plasmagase verwendet werden. Gleichzeitig ist der Kessel der VPS-Anlage für das Laserauftragschweißen oxidationsempfindlicher Metalle und Legierungen nutzbar. Neben der technologischen Weiterentwicklung des Plasmaspritzens durch Hybridverfahren mit Laserunterstützung besteht im Rahmen von Kooperationen innerhalb des Fraunhofer-Institutszentrums Dresden die Möglichkeit, Beschichtungslösungen beginnend vom Werkstoff bis zur Schicht zu entwickeln. Ein besonderer Schwerpunkt sind dabei Beschichtungslösungen aus Werkstoffen, die noch nicht zur Palette kommerziell verfügbarer Materialien gehören. Dazu gehören beispielsweise TiC-Basis-Hartmetalle, nichtoxidische und oxidische Keramiken. Die Erweiterung der Funktionalität und der Einsatzmöglichkeiten bekannter Schichten ist gleichfalls ein Schwerpunkt der Entwicklungen.

### Ergebnisse

Titanoxidschichten mit multifunktionalen Eigenschaften (Verschleißschutz, elektrische Leitfähigkeit, Festkörperschmierstoffeigenschaften, photokatalytische Eigenschaften) bildeten einen der Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten des Jahres 2002. Titanoxid ist ein etablierter Werkstoff für thermisch gespritzte Beschichtungslösungen, der in den letzten Jahren neue Aufmerksamkeit gefunden hat. Neben einer guten Verschleißbeständigkeit und der für keramische Werkstoffe ungewöhnlichen Eigenschaft der elektrischen Leitfähigkeit standen Festkörperschmierstoffeigenschaften und photokatalytische Eigenschaften im Mittelpunkt. Eine Besonderheit dieses Werkstoffes besteht darin, dass der Wasserstoff als Plasmagaskomponente gleichzeitig zu einer Reduktion und damit zum Sauerstoffverlust, verbunden mit der Bildung von Punktdefekten im Kristallgitter, führt, die für den spezifischen elektrischen Widerstand der Schicht verantwortlich sind.

In mehreren Versuchsreihen wurde der Einfluss des Wasserstoffanteiles auf die Mikrostruktur, die Mikrohärtigkeit, die elektrische Leitfähigkeit und die Abrasionsverschleißbeständigkeit APS- und VPS-gespritzter Schichten aus einem kommerziellen Titanoxidpulver untersucht. Abbildung 2 zeigt den Sandwichtaufbau einer Probe zur Prüfung der elektrischen Leitfähigkeit. Abbildung 3 zeigt die Struktur einer

VPS-gespritzten Schicht. Es wurde festgestellt, dass der Wasserstoffgehalt im Plasma keinen nennenswerten Einfluß auf die Schichthärte und die Verschleißbeständigkeit hat, während sich der spezifische elektrische Widerstand signifikant verringert. VPS gespritzte Schichten aus kommerziellem Titanoxidpulver weisen einen spezifischen elektrischen Widerstand im Bereich von 0,01 - 0,1  $\Omega\text{ cm}$  auf, während der der APS-Schichten eine Größenordnung größer ist.

Die Arbeiten dienen als Grundlage für die Entwicklung neuer Beschichtungslösungen unter Verwendung spezieller Titansuboxidpulver und oxidationsstabiler Werkstoffe gleicher Struktur im System  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ .

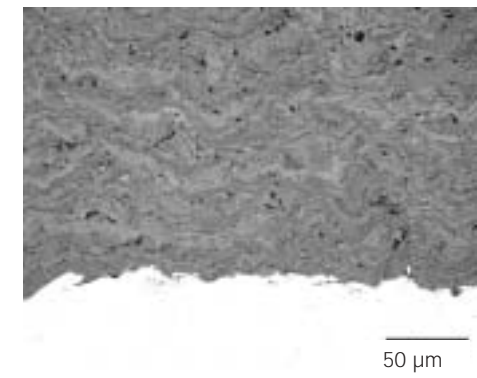


Abb. 3: VPS-gespritzte  $\text{TiO}_2$ -Schicht.

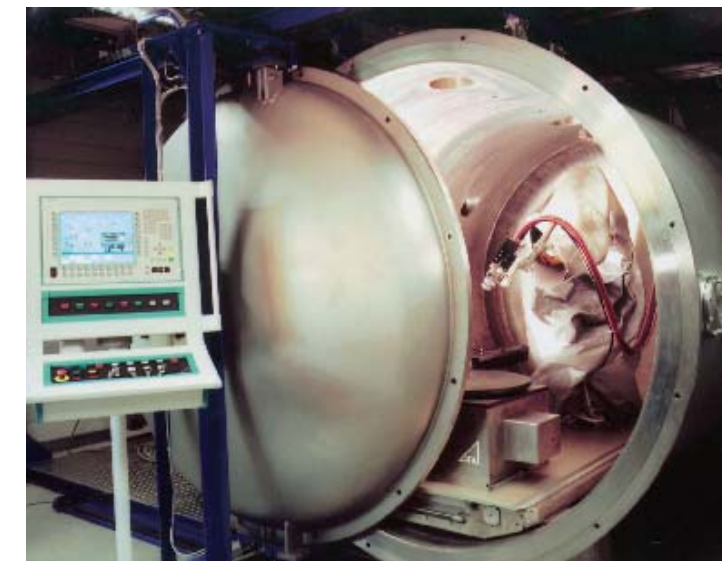


Abb. 4: Vakuum-Plasmaspritzanlage mit Drehtisch und 6-Achs-Roboter



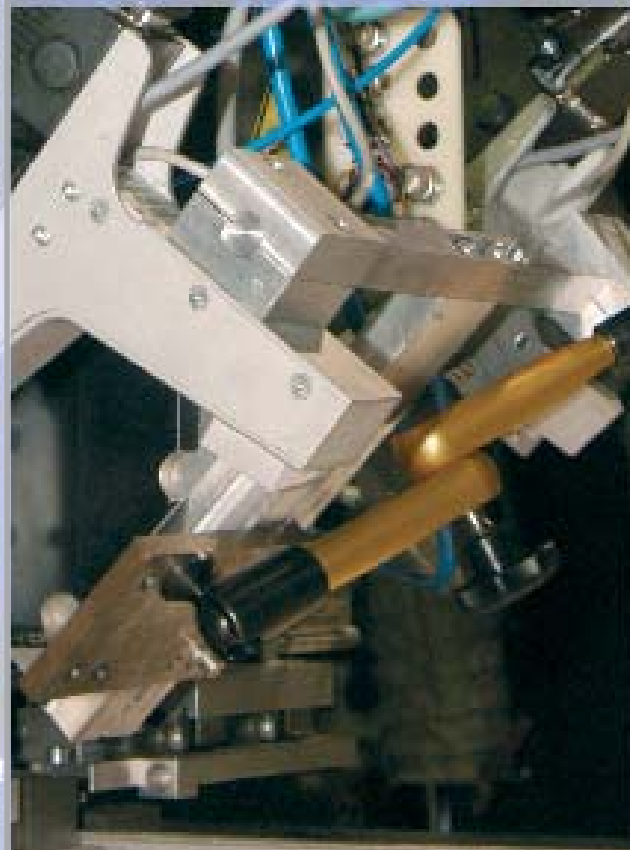
## FuE-Angebot: Füge- und Randschichttechnologien

**Redaktion:** Im vergangenen Jahr erreichten die Aktivitäten zur Entwicklung von Laserstrahlschweißverfahren für Flugzeug-Rumpfstrukturen einen neuen Höhepunkt. Wie beurteilen Sie diesen? (Darf man schon zum Erfolg gratulieren?)

**Prof. Brenner:** Im Juli 2002 fiel der Startschuß für ein vom Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst und der Firma Airbus Deutschland GmbH, dem deutschen Partner im europäischen Airbus-Konsortium, geförderten Großprojekt. Ziel des Projektes ist es, Technologien zum Fügen von großformatigen und schadenstoleranten Flugzeug-Rumpfstrukturen zu entwickeln. Kernstück des Projektes ist die Konzipierung und Beschaffung einer bisher unikalen Laserstrahlschweißanlage für das simultane 3D-Fügen von Versteifungselementen auf Bauteile von bis zu 10 m Länge und 3 m Breite mittels zweier Hochleistungslaser höchster Strahlqualität. Nach einer europaweiten Ausschreibung konnte die Vergabe an einen deutschen Systemhersteller noch im Jahr 2002 erfolgen. Wir erwarten eine Inbetriebnahme im ersten Quartal 2004. Dann ist der Zeitpunkt gekommen, die schon bis zum jetzigen Zeitpunkt auf einer kleinen Anlage entwickelte Technologie und vor allem viele neue kreative Ideen in besserer Qualität in die Praxis umzusetzen. (Sie sehen also, zum Gratulieren ist es noch etwas zu früh.)

**Redaktion:** Das war aber nicht der einzige Erfolg im vergangenen Jahr, denn weitere Technologietransfers zum induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen konnten realisiert werden. Wie sehen Sie die weiteren Perspektiven dieser Technologie?

**Prof. Brenner:** Ja, auch im vergangenen Jahr konnten wir zwei technologische Varianten für Bauteile eines Pkw-Getriebes bzw. eines Antriebsstranges erfolgreich in die Großserie überführen. Die Basistechnologie dazu wurde vor einigen Jahren im Fraunhofer IWS Dresden entwickelt. Zusammen mit renommierten Sondermaschinenherstellern wie Arnold Ravensburg und EFD Induction Freiburg sind wir in der Lage, entsprechende hochmoderne Anlagenkonzepte und Technologien in der Industrie umzusetzen. Durch den ungebremsten Trend zum Kompakt- und Leichtbau bei vertretbaren oder sogar reduzierten Produktionskosten wird sich die Hinwendung zu immer hochfesteren Werkstoffen verstärken, die besonders vorteilhaft mit dieser Technologie zu fügen sind. Wir prognostizieren deshalb eine zunehmende Marktbreite für diese Technologie. In diese Erwartung fügt sich ein, daß wir im Jahr 2003 wieder zwei Sondermaschinen in die industrielle Großserie überführen werden. Um der zu erwartenden Entwicklung gewappnet zu sein, haben wir neue Grundlagenuntersuchungen gestartet, die weitere Werkstoffe, Bauteilgeometrien und Halbzeuge umfassen.



*Solange sich ein Mensch einbildet  
etwas nicht tun zu können,  
solange ist es ihm unmöglich es zu tun.  
Spinoza*



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



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

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

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

- Entwicklung von Randschichthärtetechnologien mit Hochleistungs-Diodenlasern, CO<sub>2</sub>-Lasern, Nd:YAG-Lasern und / oder Induktion,
- Randschichtveredelung von Entwicklungs- und Prototypmustern.



Teil der Hauptantriebswelle einer Drehmaschine, gehärtet mit Hochleistungsdiodenlaser



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

### Schweißen schwer schweißbarer Werkstoffe

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

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



Laserstrahlschweißen eines Schaltrades für Pkw-Handschaltgetriebe, 16MnCr5 einsatzgehärtet

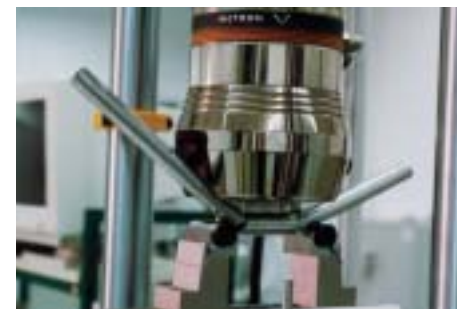


Dr. Bernd Winderlich  
Gruppenleiter Werkstofftechnik /  
Werkstoffcharakterisierung  
(Tel. 2583 224)

### 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 umfangreichen, modernen Geräteausrüstung auf dem Gebiet der strukturellen, mikroanalytischen und mechanischen Werkstoffcharakterisierung bieten wir an:

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



Prüfung von Pkw-Scheibenwischergestängen aus Aluminium

### Beispiele aus den Arbeiten 2002

1. Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen von Axial- und Radialrundnähten an rotationssymmetrischen Bauteilen mit hoher Steifigkeit 64
2. Realisierung neuer Pkw-Türkonzepte durch Laserstrahlschweißen 65
3. Laserstrahlhybridschweißen von tragenden Bauteilen aus höchstfesten Feinkornbaustählen 66
4. Neue Software zur Parameteroptimierung beim Laserstrahlhärten ersetzt Experimente 67
5. Punktschweißen mittels Hochleistungs-Diodenlaser 68
6. Strahlteileroptik für Hochleistungs-Diodenlaser 69
7. Schmelzbadkonvektion beim Wärmeleitungsschweißen mit Laser 70
8. Bandförmige Schweißzusatzwerkstoffe - eine Alternative zur Verbesserung der Schweißbarkeit 71
9. Struktur- und Eigenschaftscharakterisierung lasergasnitrierter Titanlegierungen 72
10. Untersuchung der mikrostrukturellen Prozesse beim Laserschockhärten von krz-Metallen 74
11. Untersuchung der Thermozyklertestbeständigkeit von (Ti,Al)N-Verschleißschutzschichten 75



## Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen von Axial- und Radialrundnähten an rotationssymmetrischen Bauteilen mit hoher Steifigkeit

### Aufgabenstellung

Das Fügen fertig bearbeiteter Zahnräder und Wellen für Fahrzeuggetriebe gewinnt in der Automobilbranche zunehmend an Bedeutung (Abb. 1). Dabei werden vorzugsweise CO<sub>2</sub>-Laser mit hoher Strahlqualität eingesetzt, die verzugsarmes Schweißen erlauben. Hohe zu übertragende Drehmomente und Anforderungen an die Kompaktheit der Getriebebauteile sind mit einem Anstieg der Steifigkeit der Komponenten verbunden. Dadurch wird rissfreies Schweißen extrem erschwert.

### Lösungsweg

Die Entstehung von Rissen beim Laserstrahlschweißen ist vielfach nicht vordergründig auf die geringe Zähigkeit der Schweißnaht wegen des vergleichsweise hohen Kohlenstoffäquivalents der legierten Einsatzstähle zurückzuführen, sondern auf das Auftreten von Eigenspannungen beim Schweißen. Konstruktive Änderungen zur Absenkung der Bauteilsteifigkeit sind aufgrund der Komplexität der Bauteilfunktion und des Fertigungsprozesses nur eingeschränkt möglich.

Erfahrungsgemäß stellt die Ofenvorwärmung bei konventionellen Schweißtechniken einen Ausweg aus dieser Situation dar. Jedoch stehen aus

betriebswirtschaftlicher Sicht die sehr kurzen Schweißzeiten von wenigen Sekunden im drastischen Widerspruch zu den langen Erwärmungszeiten in Durchlauföfen (ca. 1 Stunde). Eine erfolgreiche und effektive Lösung stellt das induktiv unterstützte Laserstrahlschweißen dar, das sich durch folgende Faktoren auszeichnet:

- Die induktive Kurzzeiterwärmung ermöglicht eine lokale Absenkung der Fließgrenze des Werkstoffes im Fugestellenbereich und begünstigt somit den Abbau von Eigenspannungen.
- Durch die gezielte Erzeugung von thermischen Dehnungsdifferenzen vor dem Schweißen können sich ausbildende Schweißeigenspannungen teilweise ausgeglichen werden.
- Die Erzeugung gezielt inhomogener Temperaturfelder im vorgewärmten Bauteil verhindert ein Anlassen ein-satzgehärteter Zahnflanken und Lagerlaufflächen.

### Ergebnisse

Durch die Kopplung einer lokalen induktiven Kurzzeiterwärmung mit dem Laserstrahlschweißen konnte die Technologie des prozesssicheren Fügens einer 6-Gang-Haupttrieb-welle in Zusammenarbeit mit einem Sondermaschinenhersteller sowie einem Hersteller von Induktionsanlagen erfolgreich in die Großserienfertigung übertragen werden. Dabei werden sowohl Radial- als auch Axial-schweißnähte erzeugt (Abb. 2 und 3).



Abb. 3: Laserschweißprozess einer Radialrundnaht im Laborbetrieb



Abb. 1: Antriebswelle eines 6-Gang-Pkw-Getriebes  
unten: Einzelteile  
oben: gefügter Zustand

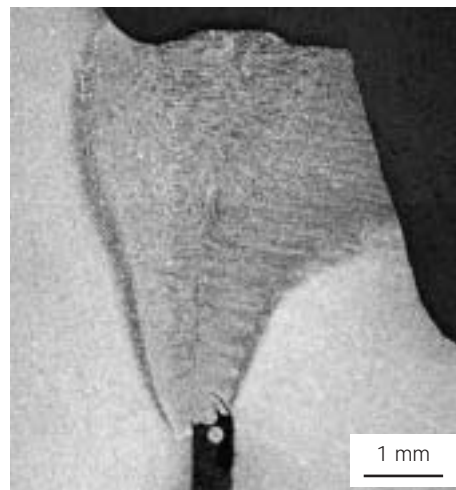


Abb. 2: Schliffbild einer rissfreien Axialrundnaht

#### Ansprechpartner

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

## Realisierung neuer Pkw-Türkonzepte durch Laserstrahlschweißen

### Aufgabenstellung

Aluminium als Konstruktionswerkstoff findet in der Automobilindustrie bereits seit Jahren eine immer breitere Anwendung. Es ersetzt nach und nach Einzelbauteile, die bisher aus Stahl hergestellt wurden.

Im Zuge weiterer Anstrengungen im Leichtbau werden zukünftig funktionsoptimierte Leichtbaustrukturen zur Realisierung kompletter Fahrzeugkomponenten benötigt. Der Fokus für Gewichtsersparnis liegt zunächst auf der Karosserie. Hier bieten Türen und Klappen aufgrund ihrer Substituierbarkeit die Möglichkeit modellspezifisch Leichtbau umzusetzen. Konventionelle Fügeverfahren wie das Falzen des Außenblechs um 180° um das Innenteil einer Tür lassen sich nicht rissfrei auf Al-Legierungen hoher spezifischer Festigkeit übertragen. Deshalb wurde untersucht, inwieweit laserbasierte Fügeverfahren in Kombination mit einem neuartigen Nahtdesign einsetzbar sind.

### Lösungsweg

Zur Realisierung solcher Leichtbaustrukturen wurde in einem neuen Konzept das bisher mehrteilige Türinnenteil durch ein einteiliges Aluminiumguss-Innenteil ersetzt. Die bei konventionellen Verfahren notwendige 180°-Falzung des Außenblechs wird auf eine 90°-Biegung reduziert (Abb. 2). Der entstehende Flansch kann durch geeignete spanntechnische Konzepte mit dem Gussteil fügetechnisch in Form einer Stirnkehlnaht verbunden werden, wodurch eine dichte, optisch

ansprechende und steife lasergeschweißte Verbindung entsteht. Dieses Konzept trägt zu einer Reduzierung der Fertigungsschritte bei und bietet damit einen neuen Ansatz bei der Fertigung und Konstruktion von Türen und Klappen.

### Ergebnisse

Unter Einsatz eines 4,4-kW Nd:YAG-Lasers wurde die 3D-Kontur der Prototypür (Abb. 1) mit einem Roboter geschweißt und damit der Nachweis zur technischen Machbarkeit derartiger Leichtbaukonzepte vollzogen. Bei Einhaltung gewisser Randparameter lassen sich porenarme und auswurffreie Laserschweißnähte erzeugen (Abb. 3). Wird der Laserstrahl mittels eines quer zur Vorschubrichtung positionierten Twinspots geformt, und Schweißzusatz zugeführt, lassen sich Spalten von bis zu 0,6 mm überbrücken und gleichzeitig Guss- und Blechkante hervorragend verrunden. Die Gewichtsersparnis einer solchen funktionsoptimierten Leichtbaukomponente liegt im Bereich einiger Kilogramm, was zu einer Minimierung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs führt.



Abb. 1: geschweißte Aluminium-Leichtbautür



Abb. 2: Nahtkonzept zum Schweißen einer Al-Leichtbautür  
(links: konventionelle Falztechnik, rechts: neuartiges Türdesign)

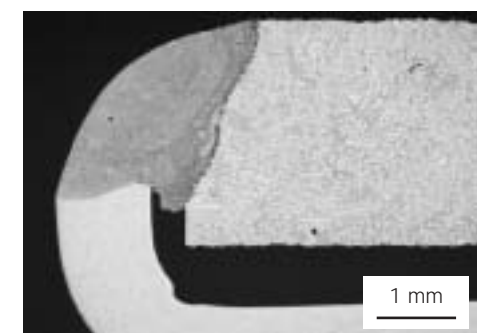


Abb. 3: Querschliff einer lasergeschweißten Aluminiumguss-Blech-Verbindung

#### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Dirk Dittrich  
Tel.: 0351 / 2582 583  
dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de

## Laserstrahlhybridschweißen von tragenden Bauteilen aus höchstfesten Feinkornbaustählen

### Aufgabenstellung

Die zunehmende Forderung nach Leichtbaukonstruktionen auch im Bereich des Stahlbaues erfordern den Einsatz von höchstfesten Feinkornbaustählen und deren schweißtechnische Verarbeitbarkeit. Dafür werden heute noch weitgehend handgeführte MSG-Schweißverfahren verwendet. Allerdings führt der dadurch notwendige mehrlagige Nahtaufbau nicht nur zu einer hohen Wärmeeinbringung und damit Verzug, sondern auch zu einem undefinierten Anlassen überschweißter Lagen mit den damit verbundenen Konsequenzen hinsichtlich der Dauerschwingfestigkeit.

Ziel der Untersuchungen war es, ein automatisierbares Verfahren zum einlagigen Schweißen von Stahlbauteilen aus hoch- und höchstfesten Feinkornbaustählen (S 690, S 890, S 960, S 1100) zu entwickeln, das den spezifischen Bedingungen im Stahlbau (Kantenvorbereitung, Fugespalte, Spann-technik, Verzug usw.) gerecht wird.

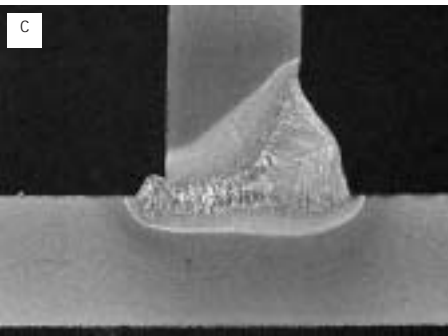
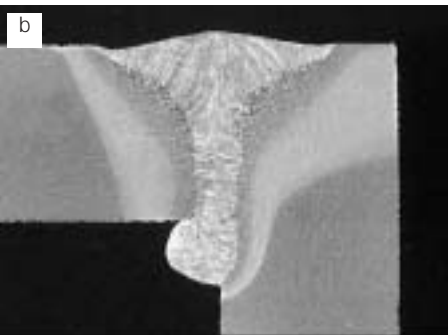
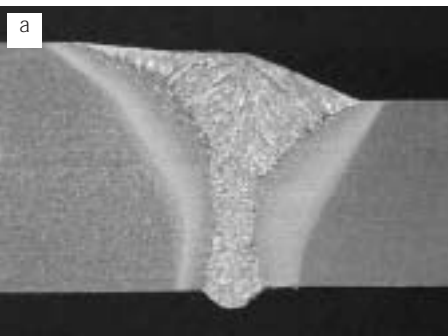


Abb. 1: Querschnitte Nd:YAG-Laser-MIG-Hybridgeschweißter Stoßkonfigurationen Werkstoff S 1100, Schweißgeschwindigkeit 1,4 m / min, Laserleistung 4 kW, Blechdicke 6 mm, Spaltmaß 0,5 mm  
a) Stumpfstoß mit Dickenprung 8 mm auf 6 mm  
b) Eckstoß  
c) Kehlnaht an T-Stoß



Abb. 2: Hybridschweißprozess an Ecknähten

### Lösungsweg

Sogenannte Laserstrahlhybridschweißverfahren sind eine Alternative, um sowohl Nachteile des normalen Laserschweißens (Spaltüberbrückbarkeit, präzise Kantenvorbereitung) als auch der MSG-Schweißverfahren (geringe Einschweißtiefen, Mehrlagigkeit, geringe Schweißgeschwindigkeit) zu überwinden. Durch die Zufuhr von Zusatzwerkstoff über einen MIG-Prozess kann darüber hinaus mit weniger Laserleistung (hier 4 kW bei 8 mm Blechdicke) gearbeitet und die Schweißzonenzusammensetzung den Anforderungen der höchstfesten Feinkornbaustähle angepasst werden.

### Ergebnisse

Für das Laserstrahlhybridschweißen wurden für die o. a. Feinkornbaustähle sowohl für den Stumpfstoß (Abb. 1 a), als auch für den Eckstoß (Abb. 1 b) und die Kehlnaht (Abb. 1 c) Parametersätze im Blechdickenbereich 3 - 8 mm erarbeitet. Die Parametersätze konnten so optimiert werden, dass Fugespalte zwischen 0 mm und 1 mm mit ein und demselben Parametersatz verschweißt werden können. Hierdurch kann der Einsatz einer zusätzlichen Sensorik zur Spaltweitenerkennung vermieden werden. Wie Abb. 1 a zeigt, können Bleche mit einem Blechdickensprung von bis zu 2 mm verschweißt werden. Der Hybridschweißkopf kann ohne Anpassarbeiten für alle genannten Stoßgeometrien eingesetzt werden.

## Neue Software zur Parameteroptimierung beim Laserstrahlhärten ersetzt Experimente

### Aufgabenstellung

Beim Randschichthärten mit Laserstrahlung werden Eigenschaften und Tiefe der Härtespur nicht nur durch die Materialeigenschaften beeinflusst, sondern auch durch die Geometrie des Bauteils und deren Wärmeableitungsbedingungen. Jede Geometrieänderung entlang der Spur (Bauteildicke, Querschnitt, Bohrungen etc.) erfordert somit im allgemeinen eine Anpassung der Prozessparameter. Die Bestimmung dieser Parameter mithilfe von Experimenten ist zwar möglich, jedoch aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten gerade bei großen oder kompliziert geformten Bauteilen unwirtschaftlich.

### Lösungsweg

Als aussichtsreichste Lösung wurde die numerische Simulation per Finite-Differenzen-Methode (FDM) erkannt. Dabei wird durch zyklische Simulation eines Härtevorgangs mit anschließender automatischer Auswertung und Parameteranpassung das Ergebnis den Sollwerten angepasst.

Zur Überprüfung dieses Ansatzes wurde eine entsprechende Software für zweidimensionale Probleme beim Laserstrahlhärten entwickelt (Abb. 1). Nach Eingabe der Randbedingungen wie Bauteilgeometrie, Laserparameter, Werkstoffdaten und gewünschter Härte-tiefe werden die Prozessparameter automatisch optimiert. Als Ergebnis liefert die Software direkt das komplette CNC-Programm für den Härtevorgang zur Bearbeitung des Bauteils auf einer CNC-Maschine.

### Ergebnisse

Die Möglichkeit der automatischen Parameteroptimierung wurde anhand von komplex geformten Probekörpern überprüft (Beispiel s. Abb. 2). Bei allen Tests war das System in der Lage, Parametersätze zu finden, deren Ergebnisse innerhalb der geforderten Toleranz für die vorgegebene Härte-tiefe von  $1 \pm 0,2$  mm lagen. Auch Probleme, die bei experimenteller Optimierung nur mit sehr hohem Aufwand zu bewältigen sind, wie etwa eine konstante Härte-tiefe an spitzwinkligen, gekrümmten Ecken (Abb. 3), konnten somit innerhalb von wenigen Minuten Rechenzeit gelöst werden. Die Software wird bereits im Fraunhofer IWS und der Alotec GmbH für zweidimensionale Probleme (Kurvenscheiben, flache Bauteile) eingesetzt. Die erzielten Erkenntnisse und Algorithmen bilden weiterhin die Grundlage für die Entwicklung eines industrietauglichen Systems, das direkt in eine CAM-Software eingebunden werden kann.



Abb. 3: Ergebnis der Optimierung an einer gekrümmten, spitzwinkligen Bauteillecke. Deutlich sichtbar ist die konstante Einhärtetiefe trotz stark absinkender Wärmeableitung

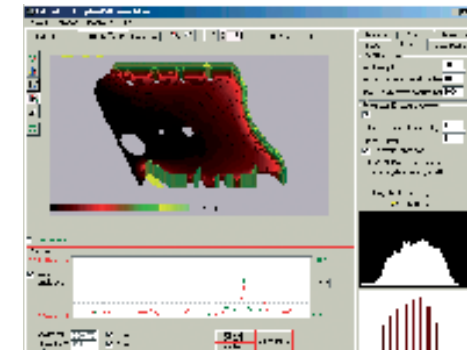


Abb. 1: Die Software ProFeT (Prediction of Optimal Feed Rates for Transformation Hardening) simuliert und optimiert Parameter beim Laserstrahlhärten



Abb. 2: Härteprozess-Testkörper, enthält Problemgeometrien wie konkave und konvexe Krümmungen, spitzwinklige Ecken, Bohrungen und Stege

### Ansprechpartner

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

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Gunther Göbel  
Tel.: 0351 / 2583 360  
gunther.goebel@iws.fraunhofer.de



## Punktschweißen mittels Hochleistungs-Diodenlaser

### Aufgabenstellung

Das Widerstandspunktschweißen wird in allen Bereichen der blechverarbeitenden Industrie, vor allem in der Serien- und Massenfertigung, angewandt. Anwendungsgrenzen des konventionellen Punktschweißens werden hauptsächlich bestimmt durch die elektrischen Eigenschaften der zu schweißenden Materialien. Die notwendige beidseitige Zugänglichkeit der Schweißstelle ist ein wesentlicher Nachteil bei der Bearbeitung komplizierter 3D-Bauteile. Weiterhin ist das Schweißen von beschichteten Blechen sowie von Nichteisenwerkstoffen nur bei erhöhtem Verschleiß der Kupferelektroden möglich.

Das Punktschweißen mit dem Diodenlaser stellt ein Verfahren dar, das diese Grenzen überwindet, aber auch für herkömmliche Punktschweißaufgaben eine sinnvolle Alternative ist.

### Lösungsweg

Für eine stabile Prozessführung ist eine sichere Einspannung der Schweißteile

von besonderer Wichtigkeit. Mittels pneumatischem Druckzylinder wird über eine Kupferlochmaske das Bauteil gespannt. Die Spannkraft kann stufenlos an die Besonderheiten der zu schweißenden Bauteile angepasst werden. Die Kupferlochmaske wirkt als Wärmesenke prozessstabilisierend und gibt dem Schweißpunkt eine definiert kreisrunde Form. Abb. 2 zeigt den Schweißprozess mit einem 2,5 kW-Diodenlaser.

Mit dem Diodenlaserstrahl wird durch Wärmeleitung ein Schmelzbad erzeugt, welches das zu oberst liegende Blech vollständig durchdringt. In Abhängigkeit von den Prozessparametern kann der Anteil des aufgeschmolzenen Materials des Grundbauteils eingestellt werden. Abb. 1 zeigt im geätzten Schliff einen Schweißpunkt in verzinkten Blechen.

### Ergebnisse

Der Laserstrahl als berührungsloses Werkzeug bringt unabhängig von den elektrischen Eigenschaften der Schweißteile sehr gut reproduzierbare Ergebnisse. Es können neben beschichteten Blechen auch Nichteisenmetalle sowie Kunststoffe verschweißt werden. Die Schweißstelle wird nur einseitig bearbeitet, was die Bearbeitung von 3D-Konturen stark vereinfacht. Durch die Wahl geeigneter Verfahrensparameter sind sehr geringe Nahtüberhöhungen bzw. -einzüge realisierbar. Eine temperaturgeregelte Wärmebehandlung der Schweißstelle (Vorwärmen, Anlassen) mittels Laserstrahlung ist sehr einfach zu integrieren. Den hohen Anschaffungskosten der Lasertechnik stehen geringe Wartungskosten gegenüber. Verschleißteile gibt es praktisch nicht, was besonders für die Serien- und Massenfertigung von Bedeutung ist.



Abb. 1: Querschliff eines Diodenlaserschweißpunkts in verzinkten Blechen, Prozesszeit 1 s, Laserleistung 500 W



Abb. 2: Laserpunktschweißen von verzinkten Blechen mit pneumatischen Einspannung

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Jan Hannweber  
Tel.: 0351 / 2583 360  
jan.hannweber@iws.fraunhofer.de

## Strahlteileroptik für Hochleistungs-Diodenlaser

### Aufgabenstellung

Für einige Anwendungen zum Härten, Schweißen oder Löten ist es erforderlich, Diodenlaserstrahlung von zwei Seiten simultan auf das Bauteil zu bringen. Vorteile der simultanen Wärmebehandlung sind unter anderem der geringere Verzug und beanspruchungsgerechte Geometrien der Bearbeitungszonen.

Bisher mussten dafür zwei separate Hochleistungsdiodenlaser simultan verwendet werden. Für den Betrieb der zwei Laser sind zwei Netzteile und zwei Kühler notwendig. Weiterhin müssen zwei Laserköpfe durch die CNC-Bearbeitungsmaschine bewegt und angesteuert werden. Wenn es möglich ist, mit nur einem Hochleistungsdiodenlaser die gleichen Anforderungen an das System zu erfüllen, lassen sich die Kosten für Lasierzubehör und Handling senken.

### Lösungsweg

Es wurde eine Optik entwickelt, mit welcher der Laserstrahl in zwei Teilstrahlen zerlegt wird (Abb. 1). Die Strahlteilung erfolgt mit Hilfe eines Dachkantenprismas. Dabei kann das Strahlteilungsverhältnis durch mechanische Justage des Prismas beliebig gewählt werden. Mit Hilfe von justierbaren Spiegeln werden die Teilstrahlen anschließend gezielt auf ihre getrennten oder nebeneinander liegenden Bearbeitungspositionen am Bauteil geführt. Die Einstrahlwinkel zum Bauteil können durch Wahl des Dachkantenwinkels am Prisma, die Winkelstellung der Spiegel sowie mechanische Verschiebemöglichkeiten eingestellt werden.

### Ergebnisse

Die Strahlteileroptik wurde unter Verwendung eines 2,5 kW-Hochleistungsdiodenlasers mit einer Spezialoptik ( $f = 300$  mm) getestet. Aufgrund der Wasserkühlung aller optischen Komponenten ist die Eignung für Langzeitprozesse sowie für die Serienproduktion im Industrieinsatz auch für Laserhöherer Leistungsklassen gegeben.

Die Leistungsfähigkeit der Strahlteileroptik wurde anhand verschiedener Applikationen zum Laserstrahlhärten wie z.B. Messern, Schneidwerkzeugen, Kugelführungen, Führungsschienen, Federn und Zahnrädern nachgewiesen (Abb. 2). Dabei konnte gezeigt werden, dass - analog zum Härten mit zwei Lasern - beanspruchungsgerechte Härtezonengeometrien generiert werden können. Wesentliche Vorteile sind die geringe Baugröße und das einfache Handling des Bearbeitungskopfes sowie die gute Justierbarkeit der optischen Komponenten.



Abb. 1: Strahlteileroptik für Hochleistungsdiodenlaser (Laborsystem)

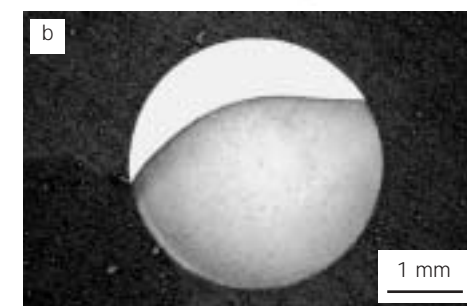


Abb. 2: Realisierbare Härtezonengeometrien bei Verwendung der Strahlteileroptik  
a) Schneidwerkzeug  
b) Feder  
c) Führungsschiene

### Ansprechpartner

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

## Schmelzbadkonvektion beim Wärmeleitungsschweißen mit Laser

## Aufgabenstellung

Beim Laserstrahlschweißen und -umschmelzen verursachen die durch hohe Temperaturgradienten an der Schmelzbadoberfläche bedingten Oberflächenspannungsdifferenzen eine Schmelzbadkonvektion (Marangoni-Strömung), die erheblichen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Schmelzbad und die Form der Schweißnähte haben kann. Oberflächenaktive Elemente wie Schwefel oder Sauerstoff können den Charakter dieser Strömung und damit Berandung und Oberfläche der Schweißnaht deutlich modifizieren. Zur Voraussage des Einflusses der Marangoni-Strömung und oberflächenaktiver Elemente auf Temperaturfeld und Schweißnahtform

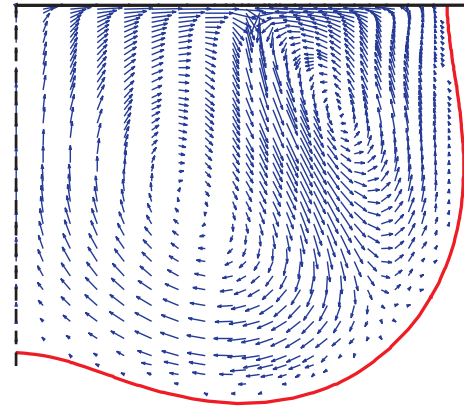


Abb. 1: Marangoni-Strömung im Laserschmelzbad für einen Chrom-Nickel-Stahl mit einer Oberflächenkonzentration von 0,015 Gew.-% Schwefel (zweidimensionale Modellrechnung). Zur Verdeutlichung des Strömungsverlaufs wurde ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsbetrag und Pfeillänge verwendet.

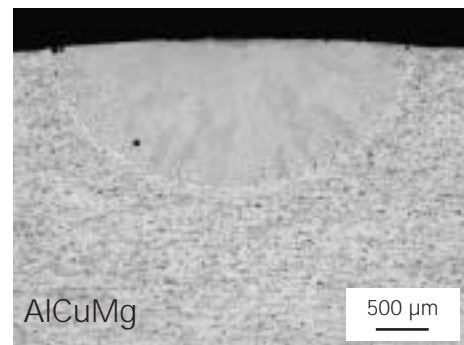


Abb. 2: Schweißnahtform in AlCuMg im Vergleich mit einer ohne Berücksichtigung der Marangoni-Strömung berechneten Schmelzbadgeometrie

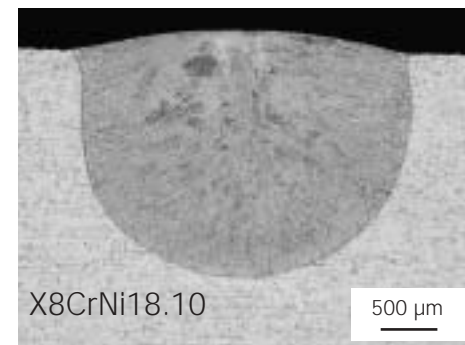


Abb. 3: Vergleich der Schweißnahtform in X8CrNi18.10 mit der durch die Strömung in Abb. 1 hervorgerufenen Schmelzbadgestalt. Das zweidimensionale Modell kann natürlich nur Tendenzen wiedergeben

beim Wärmeleitungsschweißen sind Modellberechnungen des Wärme- und Massetransports im Schmelzbad notwendig.

## Lösungsweg

Diese Modellrechnungen wurden - zunächst nur zweidimensional - mit dem FEM-Programm FIDAP für verschiedene Temperaturabhängigkeiten der Oberflächenspannung durchgeführt, wie sie für Metalle mit unterschiedlichen Schwefelkonzentrationen an der Oberfläche aus der Literatur bekannt sind.

## Ergebnisse

Der Einfluss der Marangoni-Strömung auf die Schweißnahtgeometrie ist in der Regel nur bei Werkstoffen mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit (z. B. Al-Legierungen) vernachlässigbar, bei denen der Wärmetransport überwiegend durch Wärmeleitung erfolgt (Abb. 2). Durchgängig negative Temperaturkoeffizienten der Oberflächenspannung (typisch für reine Metalle) führen zu einer Verbreiterung und Abflachung des Schmelzades. Bei bestimmten Schwefelkonzentrationen wird die maximale Oberflächenspannung bei einer mittleren Temperatur (zwischen Maximaltemperatur und Schmelztemperatur) erreicht. Als Folge zeigt das Strömungsbild komplexe Wirbelstrukturen (Abb. 1), die sich dann in der Schweißnahtform widerspiegeln (Abb. 3).

Die hier vorgestellten Arbeiten laufen vorerst von Juni 2001 bis Juni 2003 und werden im Rahmen einer Marie Curie Development Host Fellowship von der EU gefördert.

## Ansprechpartner

Dr. Edzo Zoestbergen  
Tel.: 0351 / 2583 428  
edzo.zoestbergen@iws.fraunhofer.de

## Bandförmige Schweißzusatzwerkstoffe - eine Alternative zur Verbesserung der Schweißbarkeit

## Aufgabenstellung

Höherfeste aushärtbare Aluminiumlegierungen (beispielsweise AlSi1Mg) werden in immer stärkerem Maße als Leichtbau-Konstruktionswerkstoffe eingesetzt. Ihre Schweißbarkeit ist jedoch nur begrenzt gegeben und ohne den Einsatz eines geeigneten Schweißzusatzwerkstoffes nicht möglich. Typische Beispiele hierfür sind die Legierungen AlSi5 und AlSi12, welche als Draht dem Schweißprozess zugeführt werden. Solche Zusatzwerkstoffe sind jedoch schwer umformbar. Dies macht auch die Zugabe weiterer Legierungselemente, welche die Eigenschaften der Schweißnähte günstig beeinflussen könnten, kaum möglich. Noch wesentlich schwieriger gestaltet sich der umformtechnische Weg zur Bandherstellung, vor allem bei Dicken unter 1 mm, welche für das Laserschweißen notwendig werden.

## Lösungsweg

Mit dem Verfahren der Rascherstarrung lassen sich metallische Schmelzen direkt in ein bandförmiges Produkt überführen. Das Schema dieses Verfahrens zeigt Abb. 1. Der Schmelztiegel, welcher mit einer schlitzförmigen Düse verbunden ist, wird in einem geringen Abstand über einer Kühlwalze positioniert. Nach dem Erschmelzen des als Gussstab oder Granulat zugegebenen Vormaterials wird die Schmelze über die schlitzförmige Düse auf die sehr schnellrotierende Kühlwalze gedrückt und erstarrt in vorgegebener Breite und in einer durch Auspressdruck und Drehzahl der Walze bestimmten Dicke. Die Herstellung von Bändern im Dickenbereich über 200 µm lag bislang jenseits der verfahrenstechnisch gesetzten Grenzen dieser Rascherstarrungstechnologie. Dennoch wurden mittels dieses Verfahrens Versuche zur Erzeugung von Bändern aus schweißtechnisch interessanten Legierungsvarianten auf der Basis AlSi12 durchgeführt.

## Ergebnisse

Mit der Methode der Rascherstarrung lassen sich jetzt prinzipiell Bänder der ausgewählten Al-Legierungen in einem Dickenbereich von 150 - 300 µm herstellen (Abb. 2). Bei Banddicken von etwa 200 µm bildet sich noch eine relativ gleichmäßige und für den Schweißprozess ausreichende Kontur aus. Bei noch größeren Banddicken wird diese jedoch zunehmend durch längere Erstarrungszeiten beeinträchtigt. Die Bänder zeigen sich trotz ihres hohen Legierungsgehaltes noch ausreichend duktil. Bedingt durch die rasche Erstarrung haben sie ein sehr homogenes und feinkörniges Gefüge (Abb. 3).

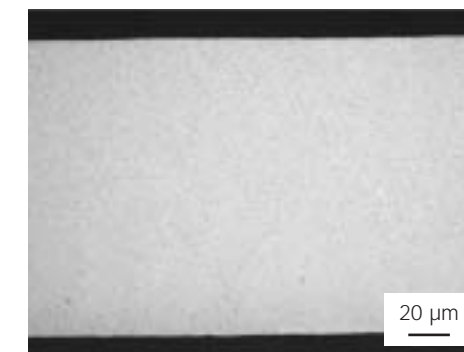


Abb. 3: Querschliff eines rascherstarrten Bandes, feinkristalliner, homogener Gefügebau

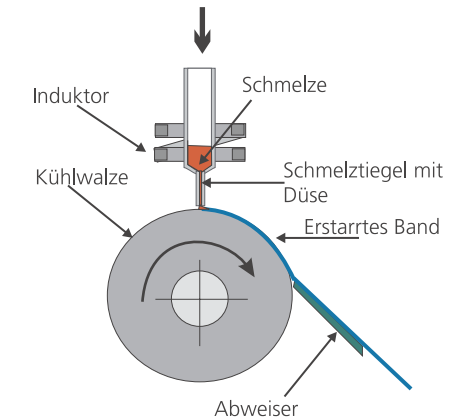


Abb. 1: Prinzip des genutzten Rascherstarrungsverfahrens



Abb. 2: Mittels Rascherstarrung hergestelltes Band, Bandbreite 5 mm, Werkstoff AlSi12

## Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Volker Fux  
Tel.: 0351 / 2583 243  
volker.fux@iws.fraunhofer.de



## Struktur- und Eigenschaftscharakterisierung lasergasnitrierter Titanlegierungen

### Aufgabenstellung

Titanlegierungen besitzen hohe spezifische Festigkeiten, weisen hohe Dauerschwingfestigkeiten auf, sind korrosionsbeständig und verfügen über eine hohe Biokompatibilität. Ein spezifischer Nachteil der Titanlegierungen ist ihre schlechte Verschleißbeständigkeit. Das Lasergasnitrieren bietet die Möglichkeiten letztere für eine Vielzahl von tribologischen Belastungsdaten zu verbessern. Die industrielle Anwendbarkeit dieses Verfahrens wird jedoch insbesondere für zyklisch beanspruchte Bauteile erschwert oder gar verhindert, weil das Lasergasnitrieren mit hohen Stickstoffgehalten zur Rissbildung und zum Abfall der Dauerschwingfestigkeit führt. Die zugrundeliegenden mikrostrukturellen Ursachen und deren

Zusammenwirken mit spannungsmechanischen Einflussfaktoren sind bisher nicht geklärt. Aus diesem Grund sollten die während des Lasergasnitrierens in Titanwerkstoffen ablaufenden mikrostrukturellen Prozesse durch den Einsatz hochauflösender strukturanalytischer Methoden (REM, TEM, EDX) detailliert untersucht werden.

### Lösungsweg

Die Untersuchungen wurden an der technisch vielseitig genutzten ( $\alpha+\beta$ )-Titanlegierung Ti-6Al-4V durchgeführt, die in Form von 7 mm dicken Blechen zur Verfügung stand. Zur Erzielung einer hohen Reproduzierbarkeit und Kontrollierbarkeit des Bearbeitungsprozesses wurden zum Lasergasnitrieren eine im IWS entwickelte Schutzgasglocke und ein 6 kW-CO<sub>2</sub>-Laser eingesetzt. Um die am REM und TEM verfügbaren hochauflösenden Abbildungs-, Beugungs- und Analysetechniken zur Charakterisierung der überwiegend submikroskopischen Erstarrungs- und Umwandlungsstrukturen einsetzen zu können, wurden spezielle elektrolytische und ionenstrahlgestützte Präparationsverfahren zur Herstellung artefaktfreier Präparate erarbeitet. Zur Aufklärung der Struktur-/Eigenschaftsbeziehungen wurden außerdem die Bildung und die Ausbreitung von Rissen bei statischer Belastung mittels Schallemissionsanalyse sowie das Ermüdungsverhalten in Biegewechselbelastungstests analysiert.

### Ergebnisse

Wie am Beispiel der Abb. 1 zu erkennen ist, weisen die lasergasnitrierten Randzonen Mikrorisse und - insbesondere bei Verwendung höherer Stickstoffgehalte im Prozessgas - auch Makrorisse auf. Die Mikrorissbildung steht im engen Zusammenhang mit einer dünnen, durchgängig geschlossenen Titannitrid-Schicht (TiN), die sich an der Oberfläche der lasergasnitrierten Proben bildet. Die Mikrorisse verlaufen bevorzugt entlang der Korngrenzen der TiN-Schicht und breiten sich für höhere Stickstoffgehalte auch in die unterhalb dieser Schicht liegenden Materialbereiche aus, wodurch Makrorisse entstehen. Die Makrorisse verlaufen nahezu unabhängig von den Gefügebestandteilen durch die lasergasnitrierte Zone. Der Verlauf der Makrorisse legt nahe, dass die Rissausbreitung hauptsächlich von dem bei der Schnellabkühlung erzeugten Eigenspannungszustand bestimmt wird.

Wie Abb. 2 verdeutlicht, kann die Neigung zur Rissbildung deutlich verringert werden, wenn die Proben nach dem Lasergasnitrieren unter Argon umgeschmolzen werden. Die beim Umschmelzen entstehenden Schichten sind auch dann frei von Makrorissen, wenn das vorangegangene Lasergasnitrieren mit sehr hohen Stickstoffgehalten im Prozessgas durchgeführt worden war. Aus der REM-Untersuchung der kantenscharfen ionenstrahlpolierten Querschliffe (Abb. 2b) geht eindeutig hervor, dass die unter reinem Argon umgeschmolzenen Randschichten an der Oberfläche keine durchgängige TiN-Schicht aufweisen und

deshalb die zahlreichen feinen Mikrorisse im oberflächennahen Bereich fehlen. Dies wird als eine Ursache dafür angesehen, dass sich in den umgeschmolzenen Randschichten keine Makrorisse bilden. Das nachträgliche Umschmelzen wirkt sich positiv auf das Ermüdungsverhalten der lasergasnitrierten Titanproben aus. So konnte die Ermüdungsfestigkeit einer mit 60 % Stickstoffgehalt lasergasnitrierten Probe durch die Umschmelzbehandlung um ca. 30 % erhöht werden. Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Dauerschwingfestigkeit werden in einer Optimierung der nachträglichen Umschmelzbehandlung gesehen.

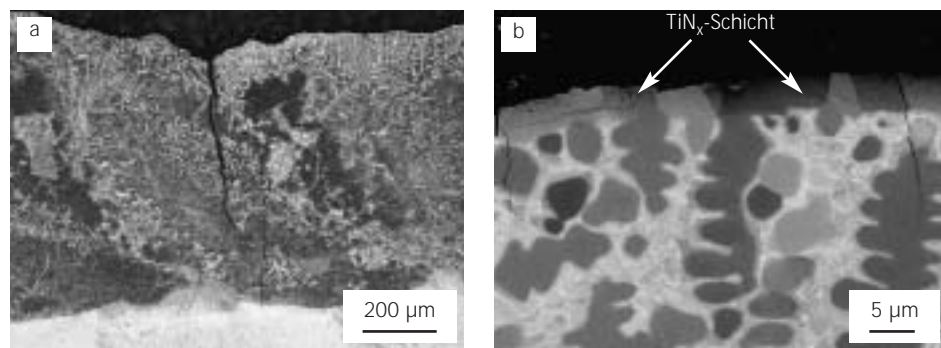


Abb. 1: Lasergasnitrieren mit hohen Stickstoffgehalten. Beachte die Makro- (a) und Mikrorisse (b) in der lasergasnitrierten Randzone  
a) LM-Übersicht (metallographischer Querschliff)  
b) REM-Detail (ionenpolierter Querschliff)

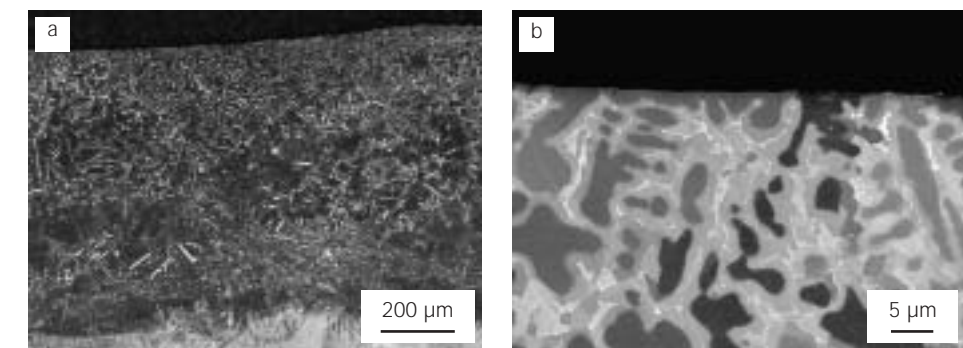


Abb. 2: Vermeidung von Rissen durch eine nachträgliche Umschmelzbehandlung der mit hohen Stickstoffgehalten lasergasnitrierten Titanproben  
a) LM-Übersicht (metallographischer Querschliff)  
b) REM-Detail (ionenpolierter Querschliff)

### Ansprechpartner

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

## Untersuchung der mikrostrukturellen Prozesse beim Laserschockhärten von krz-Metallen

### Aufgabenstellung

An der Materialbehandlung mit laserinduzierten Druckstößen, dem sogenannten Laserschockhärten, besteht seit Jahren ein großes Interesse, weil dieses Verfahren für die Randschichtverfestigung von Bauteilen und insbesondere zum Einbringen von Druckeigenspannungen genutzt werden kann. Allerdings ist der Kenntnisstand bezüglich der bei der Laserschockbehandlung im Werkstoff ablaufenden mikrostrukturellen Prozesse sehr lückenhaft. Mit dem Schließen dieser Wissenslücke soll ein grundlegender Beitrag zum Verständnis lasererschockinduzierter Strukturänderungen erbracht werden, der einerseits Rückschlüsse auf die technische Anwendbarkeit des Laserschockhärtens ermöglicht und andererseits die Klärung metallphysikalischer Fragestellungen erlaubt.

### Lösungsweg

Im IWS wurden Proben aus reinem Eisen, Molybdän, Niob und Tantal untersucht. Diese wurden mit ns-Pulsen eines Excimerlasers (AG Dr. Lang, ATZ-EVUS, Außenstelle Vilseck) unter Verwendung unterschiedlicher Laser- und Ablationsbedingungen (direkte und beschränkte Ablation) bearbeitet. Durch den Einsatz sich gegenseitig ergänzender Untersuchungsmethoden (Lichtmikroskopie, REM, TEM) und die Erarbeitung spezieller Präparationstechniken wurde eine experimentelle Vorgehensweise erarbeitet, die zur vergleichenden Darstellung und Charakterisierung der in den unterschiedlichen Metallen ablaufenden mikrostrukturellen Prozesse geeignet ist. Diese Vorgehensweise wurde angewandt, um die in den verschiedenen krz-Metallen hervorgerufenen Veränderungen des Gefüges und der Mikrostruktur eingehend zu untersuchen.

### Ergebnisse

Zur Erzielung markanter und weitreichender Randschichtverfestigungen ist beim Laserschockhärten die gleichzeitige Verwendung einer strahlungsabsorbierenden Schutzschicht und einer plasmaeinschließenden Deckschicht (Wasser) erforderlich. In Abhängigkeit vom Material liegt unter diesen Prozessbedingungen die maximale Härtesteigerung zwischen 20 % und 60 % und die maximale Reichweite der Verfestigungszone zwischen 0,5 mm und 1,0 mm (Abb. 1).

Bei der Laserschockbearbeitung von krz-Metallen tritt außer Versetzungsgleit- und Versetzungsvervielfachungsprozessen auch mechanische Zwillingsbildung als Verformungsmechanismus auf. Den Verformungszwillingen kann weder eine eigenschaftsverbessernde (Härtesteigerung) noch eine eigenschaftsdegradierende (Rissbildung) Rolle zugeschrieben werden. Die schockinduzierte Verfestigung der Randschicht beruht hauptsächlich auf einer Erhöhung der Versetzungsdichte. Für die Laserschockbehandlung mit ns-Pulsen ist charakteristisch, dass die Defektstruktur nicht nach der Belichtung mit einem Laserpuls stabilisiert ist. Zur Erzeugung stabilisierter Mikrostrukturen und optimaler Verfestigungszustände sind in Abhängigkeit vom Material Mehrfachbelichtungen zwischen 6 und 24 Laserpulsen notwendig (Abb. 2).

Aus der TEM-Untersuchung lasererschockbehandelter Molybdänproben konnten neuartige Erkenntnisse über die Entstehung und das Wachstum der Zwillinge beim schockinduzierten Verformungsprozess gewonnen werden. Diese Erkenntnisse erlauben die kritische Bewertung existierender theoretischer Modellvorstellungen und liefern neue Erkenntnisse zur Kopplung von Versetzungsgleitprozessen und mechanischer Zwillingsbildung.

## Untersuchung der Thermozyklertestbeständigkeit von (Ti,Al)N-Verschleißschutzschichten

### Aufgabenstellung

Hartmetallwerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung werden zur Standzeiterhöhung mit (Ti,Al)N-Verschleißschutzschichten versehen. Neben der mechanischen Beanspruchung wirken insbesondere beim unterbrochenen Schnitt hohe thermozyklische Belastungen auf diese Schichten. Diese Einsatzbedingungen führen zur Rissbildung, Delamination und zum Abplatzen der Schutzschicht und begrenzen damit die Einsatzdauer des Werkzeuges. Durch systematische Thermozyklertests sollte die Schädigungswirkung einer rein thermomechanischen Schichtbeanspruchung untersucht werden.

### Lösungsweg

Mit einer im IWS Dresden entwickelten laserbasierten Prüfanordnung wurden an (Ti,Al)N-Schichten thermozyklische Schichtbeanspruchungen durch wiederholte Oberflächenbestrahlung mittels Leistungslaser und gleichzeitige Temperaturmessung mit einem Hochgeschwindigkeitspyrometer durchgeführt. Die Charakterisierung der verursachten Schichtschädigungen erfolgte durch REM-Untersuchungen und spezielle Schichtpräparationen mittels Focused-Ion-Beam-Technik (FIB).

### Ergebnisse

Es wurden in Abhängigkeit von der Belastung qualitativ verschiedene Schichtschädigungen beobachtet, wobei auch für diese (Ti,Al)N-Schichten die bereits an anderen Schichtsystemen gefundene Abfolge der

Schädigungsstufen "Vertikalrissbildung → Delamination → Schichtabplatzung" nachgewiesen werden konnte. Gezielte Schichtpräparationen mittels FIB-Technik ermöglichten die Unterscheidung der Schädigungsstufen "Vertikalriss ohne Delamination" (Abb. 2) und "Vertikalriss mit Schichtdelamination" (Abb. 3). Die Auftragung der Untersuchungsbefunde in Form eines Schädigungsdiagrammes (Abb. 1) liefert eine anschauliche Darstellung der beobachteten Schichtschädigung in Abhängigkeit von den Belastungsparametern "maximale Schichttemperatur" und "Zyklenzahl". In das Schädigungsdiagramm können empirische Grenzlinien eingezeichnet werden, bei deren Überschreitung erste leichte Schichtschädigungen (grüne Linie) bzw. totales Schichtversagen (rote Linie) auftritt. Unter Nutzung theoretischer Modelle für die Schichtschädigung können aus der Lage dieser Grenzlinien quantitative Aussagen zu Schichtfestigkeit und -haftung abgeleitet werden.

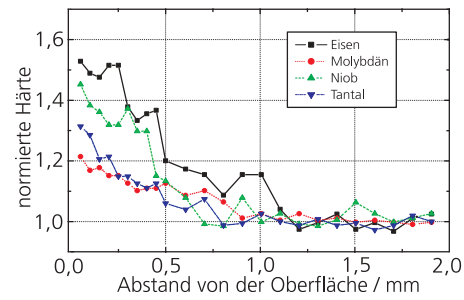


Abb. 1: Vergleichende Darstellung der Stärke und Reichweite der schockinduzierten Verfestigung, ermittelt durch Mikrohärtemessungen am Querschliff unterschiedlicher krz-Metalle

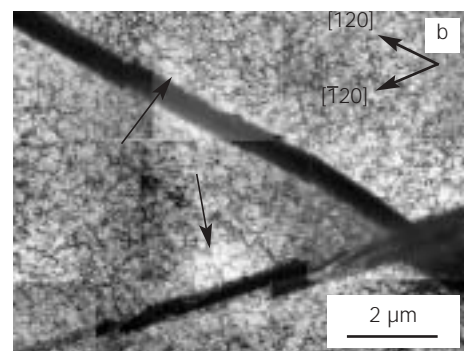
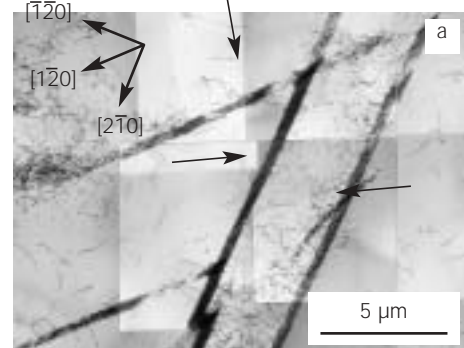


Abb. 2: TEM-Übersichtsaufnahmen der schockinduzierten Mikrostruktur von Molybdänproben, die mit einem Puls (a) bzw. mit 24 Pulsen (b) laserbearbeitet wurden. Beachte die planaren Gleitbänder vom Typ {211} und die Erhöhung der Versetzungsdichte mit zunehmender Anzahl von Laserbelichtungen.

### Ansprechpartner

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

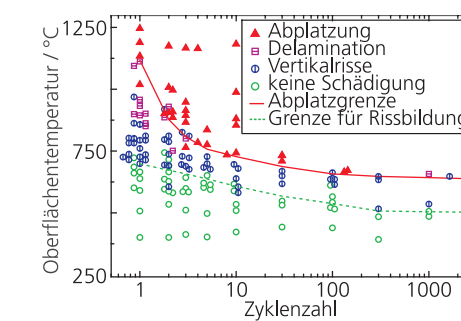


Abb. 1: Schädigungsdiagramm der (Ti,Al)N-Schutzschicht

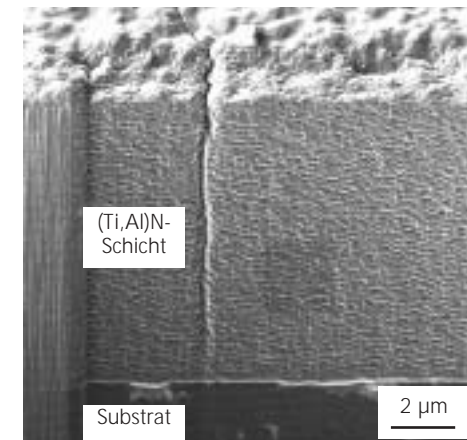


Abb. 2: Durch Thermozyklierung verursachter Vertikalriss in der Schicht

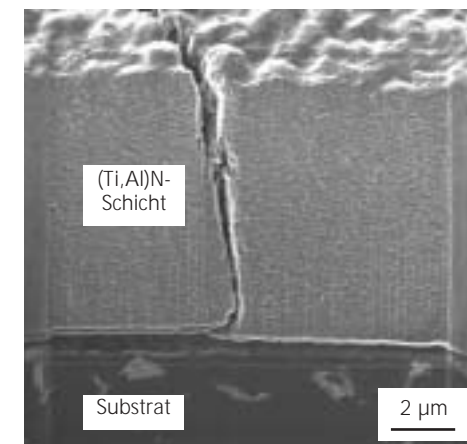


Abb. 3: Durch Thermozyklierung verursachte Vertikal- und Delaminationsrisse

### Ansprechpartner

Dr. Gunter Kirchoff  
Tel.: 0351 / 2583 225  
gunter.kirchoff@iws.fraunhofer.de



## FuE-Angebot: Laserabtragen und -trennen



**Redaktion:** Die Aktivitäten zur Mikrobearbeitung und Mikrostrukturierung wurden im letzten Jahr weiter vorangetrieben. Welche konkreten Projekte verfolgen Sie zurzeit?

**Dr. Morgenthal:** Die Einsatzmöglichkeiten der Mikromaterialbearbeitung nehmen mit dem zunehmenden Engagement der Mikrosystemtechnik gravierend zu. Durch die Entwicklung von frequenzvervielfachten Nd:YAG-Lasern, wie sie in unserem Institut zum Einsatz kommen, ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Diese liefern sehr hohe Energien in extrem kurzen Zeiten. Hiermit sind Mikrobearbeitungen sehr temperaturempfindlicher Materialien möglich. Unsere Anwendungen dieser Lasertypen für den industriellen Einsatz reichen von der Automobilindustrie, Biotechnologie, Medizintechnik bis zur Halbleiterindustrie. Beispielhaft seien hier das Strukturieren von Niederhaltern für die minimalinvasive Chirurgie und von Sensoren sowie das Vereinzeln von Silizium-Wafern genannt.

**Redaktion:** Und beim Bau einer mobilen Anlage für die rutschhemmende Ausrüstung von polierten Natursteinplatten sind Sie auch weiter voran gekommen. Wann werden hier erste Anlagen einsatzbereit sein?

**Dr. Morgenthal:** Nachdem bereits seit mehr als 5 Jahren polierte Natursteinplatten mittels Laser rutschhemmend strukturiert werden und mittlerweile in mehreren Unternehmen IWS-Lizenzen genutzt werden, haben wir im vergangenen Jahr die Verträge mit einem namhaften Natursteinhersteller unterschrieben, der zukünftig den Bau und die Vermarktung der mobilen Rutschhemmungsanlagen übernehmen wird. Der erste Prototyp wurde mittlerweile etwas verkleinert, schließlich gibt es auch kleinere Hotelfoyers, die wir zukünftig rutschhemmend entsprechend den gesetzlichen Vorschriften ausrüsten wollen.



*Phantasie ist wichtiger als Wissen.*  
Johann Wolfgang von Goethe



Dr. Lothar Morgenthal  
Abteilungsleiter  
(Tel. 2583 322)



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

#### Laserstrahlschneiden

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

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



Laserstrahlgeschchnittene Elektrobleche

#### Systemtechnik / Fertigungstechnik

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

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



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



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

#### Abtragen und Reinigen

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

Wir bieten an (Arbeiten vor Ort möglich):

- Beratung und Konsultationen, Machbarkeitsstudien,
- technologische Voruntersuchungen einschließlich Anlegen von Musterflächen mittels Excimer-, Nd:YAG- und TEA-CO<sub>2</sub>-Laser,
- Durchführung von Applikationsuntersuchungen,
- Strukturaufklärung und Nachweisführung (Metallographie / Petrographie, Spektroskopie, REM / EDX).



Rutschhemmende Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge durch Lasermikrostrukturierung



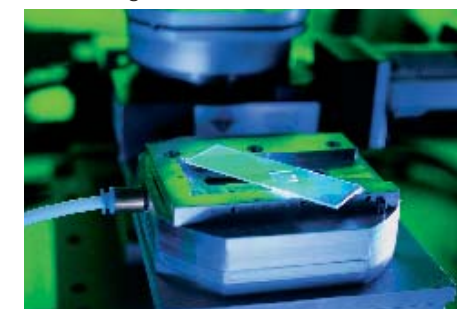
Dipl.-Ing. Udo Klotzbach  
Gruppenleiter Mikrofertigung und Beschriften  
(Tel. 2583 252)

#### Mikrostrukturieren mittels Laser

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

Wir bieten an:

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



Präzisionsgravieren von Glas mit frequenzverdreifachtem Nd:YAG-Laser

#### Beispiele aus den Arbeiten 2002

1. Programmierumgebung für mobile Remote-Laser-Systeme 80
2. Optischer Sensor für die Schweißnahtlagedetektion 81
3. Laserstrahlschneiden von Schattenmasken mit CO<sub>2</sub>-Lasern im cw-Betrieb 82
4. Prototyp einer mobilen Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge 83
5. Laserstrahlreinigen zur Fügestellenvorbereitung 84
6. Trennung transparenter Firnis-schichten an den originalen Eichenholzpaneelen des Grünen Gewölbes Dresden mittels Laser 85
7. Schneiden einer Mo-Maske zur Ionenbestrahlung von Implantaten 86
8. Strukturierung von Niederhaltern für die minimalinvasive Herzchirurgie mittels frequenzvervielfachtem Nd:YAG-Laser 87



## Programmierungsumgebung für mobile Remote-Laser-Systeme

### Aufgabenstellung

Das enorme Potential eines Laserstrahls kann beim Schweißen und Schneiden mit konventionellen Handlingsystemen wegen der begrenzten Dynamik der bewegten Maschinenkomponenten häufig nicht voll ausgenutzt werden. Das führt folgerichtig zum Einsatz von Strahlablenksystemen, mit denen durch leichte Kippspiegel die Strahlbewegung mit extrem hoher Dynamik und Bahngenauigkeit ausgeführt werden kann (Abb. 1). In Kombination mit einem Industrieroboter kann die Strahlablenkung in einem großen Arbeitsraum mit beliebiger Orientierung realisiert werden.

Vorraussetzung für den erfolgreichen Einsatz derartig kombinierter Systeme ist eine effektive Programmierung für die komplexe Steuerung der bis zu neun Bewegungsachsen.

### Lösungsweg

Ausgehend von der für Beschriftungssysteme schon eingesetzten Bearbeitung "on the fly", d. h. Beschriftung bei gleichförmiger und meist einachsiger Bewegung der Produkte, wurde im IWS ein neuartiges Steuerungskonzept entwickelt, das beliebige dreidimensionale Bewegungen des Strahlablenksystems während der Bearbeitung zulässt (Abb. 2). Die vom Industrieroboter geführte Strahlablenkoptik muss wegen der hohen Dynamikanforderungen von einem eigenen Mikrorechner angesteuert werden. Die Bahnplanung für eine robotergeführte Bewegung der Strahlablenkoptik und damit für die kombinierte Strahlablenkbewegung muss folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Die Sollkontur muss aus einem CAD-System heraus in den Bahnplaner importierbar sein bzw. es müssen über ein Teach-In-Verfahren Sollkon-

turdaten für den Bahnplaner erzeugt werden.

- Für die Bewegung des Laserstrahls müssen strahlspezifische Anforderungen erfüllt werden, wie eine definierte resultierende Strahlgeschwindigkeit, ein geeigneter Anstellwinkel sowie eine möglichst gleichbleibender Bearbeitungsabstand.
- Die Bewegungen müssen so erfolgen, dass die relevanten kinematischen und dynamischen Grenzparameter des Bewegungssystems eingehalten werden und die Bewegung für eine minimale Bearbeitungszeit optimiert wird.

### Ergebnisse

Das am IWS entwickelte und an prototypischen Anwendungen erfolgreich erprobte Bahnplanungssystem ist ein interaktives Werkzeug, welches relevante Bewegungsparameter für die Prozessoptimierung visualisiert. Diese Visualisierung ist gleichzeitig Basis für eine spätere algorithmische Unterstützung, ohne auf interaktive und werkstatorientierte Konzepte verzichten zu müssen.

Zum Programm für die geometrisch vorgegebene Sollkontur des Bauteils kann der Nutzer interaktiv wesentliche technologische Parameter der Laserbearbeitung wie Strahlgeschwindigkeit, Vor- und Nachlauf, Rampenfunktionen sowie Startpunkt und Abfahrriechung bei geschlossenen Konturen ergänzen. Nachfolgend können aus einer vordefinierten Bewegung des Systems ausgewählte Optimierungskriterien visualisiert werden. Durch iteratives Vorgehen können dann die Steuerprogramme für den Roboter und die Strahlablenkung auf Grenzwertüberschreitungen getestet und weiter optimiert werden.

## Optischer Sensor für die Schweißnahtlagedetektion

### Aufgabenstellung

Der Einsatz von Lasern mit hoher Strahlqualität und die Forderung nach immer höheren Schweißgeschwindigkeiten führt dazu, dass der Laserstrahl im Arbeitspunkt auf dem Bauteil auf immer kleinere Durchmesser fokussiert wird. Daraus entwickelt sich dann zunehmend das Problem, mit diesem auf wenige Zehntel Millimeter Durchmesser fokussierten Laserstrahl den Fügspalt der zu verbindenden Bauteile genau zu treffen.

Für eine große Zahl von zu schweißenden Bauteilen (Zahnräder, Wellen, usw.) genügt es, die genaue Startposition für die Schweißnaht zu detektieren, da der weitere Nahtverlauf dann an den Bauteilen hinreichend geometrisch stabil ist. Für derartige Anwendungen sucht die Industrie nach robusten, preiswerten und integrationsfähigen Lösungen zur Detektion von Bauteilreferenzkanten, die eine exakte Positionierung der Schweißnaht ermöglichen.

### Lösungsweg

Der im IWS entwickelte Sensor arbeitet als optischer Messtaster und besteht aus einem Diodenlaser mit telezentrischer Kollimationsoptik sowie einem Photoempfänger mit integriertem Verstärker und Mikrocontroller zur Datenerfassung und -bewertung. Der Sensor-Laserstrahl wird über eine Strahlweiche in die Strahlführung der Schweißmaschine eingespiegelt und durch die Schweißfokussieroptik auf dem Werkstück abgebildet. Für die automatische Aufnahme einer Füge-

spaltlage wird dann die Bearbeitungsoptik mit aktivem Sensorlaserstrahl im Bereich der zu erwartenden Fügspaltposition verfahren und mit dem Photoempfänger die Intensität der reflektierten Strahlung gemessen. Intensitätsänderungen werden durch den Mikrocontroller nach mehreren Parametern bewertet und zur Erzeugung von Triggerimpulsen für Aktionen der CNC- oder SPS-Steuerung der Schweißanlage genutzt.

Das gesamte Sensorsystem ist in ein kompaktes Gehäuse integriert (Abb. 1, 2).

### Ergebnisse

Das Sensorsystem kann vorteilhaft für die automatische Fügspalterkennung an reflektierenden Oberflächen, wie sie mechanisch bearbeitete Teile in der Regel aufweisen, eingesetzt werden. Ein spezieller Anwendungsfall des Sensorsystems ist die Detektion der Fügspaltlage für das Schweißen von Umfangsnähten an Rohren.

Bisher haben sich mehrere Sensorsysteme im industriellen Serieneinsatz bewährt, so u. a. in einer Laserschweißanlage mit induktiver Vorwärmung für das Laserschweißen von Motorabtriebswellen (Firma Visteon, Düren) und zum Laserschweißen von Getriebebauteilen (Firma Ford, Köln) (Abb. 3).

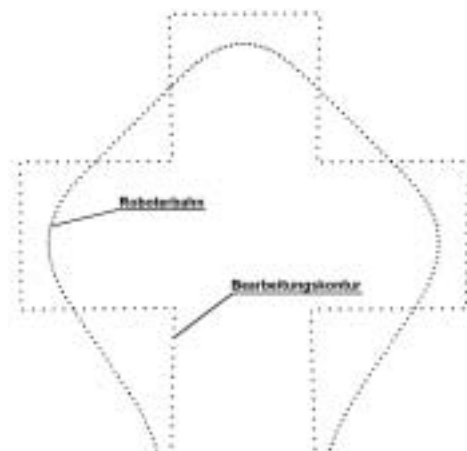


Abb. 1: Vergleich zwischen Roboterbewegung und ausgeführter Schweißbahn des Laserstrahlablenksystems

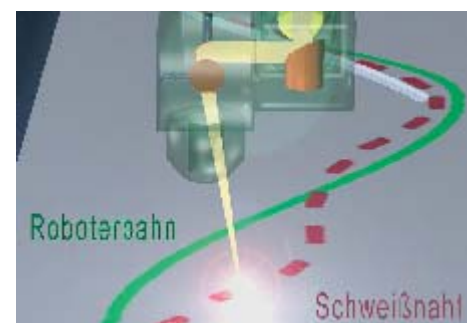


Abb. 2: Beispiel für Bearbeitungskontur mit verrundeter Roboterbahn

#### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Veiko Fleischer  
Tel.: 0351 / 2583 413  
veiko.fleischer@iws.fraunhofer.de

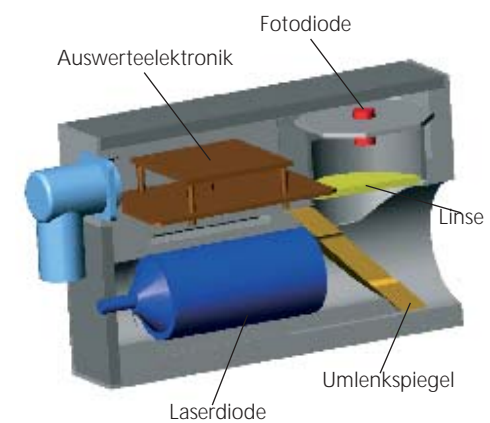


Abb. 1: Schematische Darstellung des Sensorsystems NFP-2



Abb. 2: Sensorsystem NFP-2

#### Ansprechpartner

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

## Laserstrahlschneiden von Schattenmasken mit CO<sub>2</sub>-Lasern im cw-Betrieb

### Aufgabenstellung

Schattenmasken aus Metall mit Öffnungsdurchmessern im Millimeterbereich werden in unterschiedlichen Industriezweigen eingesetzt. Wegen der hohen Anforderungen an die Form- und Maßgenauigkeit sowie an die Regelmäßigkeit der Maskenstruktur werden diese Masken vielfach durch chemisches Ätzen oder Laserabtragen mit gepulsten Lasern gefertigt. Der Entwicklungstrend zu kleinen Stückzahlen mit variablen Bohrungsgeometrien verlangt nach alternativen Fertigungstechnologien, die die geforderte hohe Präzision bei geringen Bearbeitungszeiten (d. h. geringen Teilekosten) realisieren können.

### Lösungsweg

Für eine zeit- und kostenoptimierte Herstellung von Schattenmasken mit mehreren Tausend präzisen kreisrunden oder sechseckigen Bohrungen mit Durchmessern bis zu 1 mm wurde deshalb im IWS eine auf dem Einsatz eines cw-CO<sub>2</sub>-Lasers basierende Schneidtechnologie entwickelt und erprobt. Die hohe geforderte Maß- und Formgenauigkeit der Maskenöffnungen und der Maskenstruktur sicherte eine Schneidanlage mit Lineardirektantrieben und direkten Meßsystemen an den Vorschubachsen. Mit optimierten Prozessparametern konnten eine hohe Prozesssicherheit und Schnittqualität erzielt werden. Für die Minimierung der Teiletaktzeit wurden Einstechregime, Fahrwege und Abarbeitungsreihenfolge entsprechend der Maskenstruktur optimiert. Der infolge von thermischen Spannungen entstehende Verzug der Maske konnte durch eine geeignete Schneidfolge und eine spezielle Maskenauflage auf

ein Minimum reduziert werden (Abb. 2).

### Ergebnisse

Für unterschiedliche Maskenwerkstoffe und Materialdicken wurden optimierte Schneidparameter ermittelt. So konnte beispielsweise eine Schattenmaske aus 0,5 mm dickem Edelstahl 1.431 mit 5101 Sechsecken (Abb. 1) in einer Schneidzeit von etwa einer halben Stunde gefertigt werden. Die so hergestellten Masken erfüllten alle Anforderungen für den Einsatz als Schattenmasken in der Präzisionsbeschichtung zur Herstellung von Multilayer-Röntgenspiegeln.

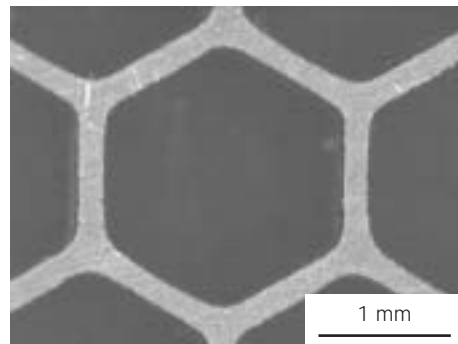


Abb. 1: Laserstrahlgescchnittene Schattenmaske (Ausschnitt)

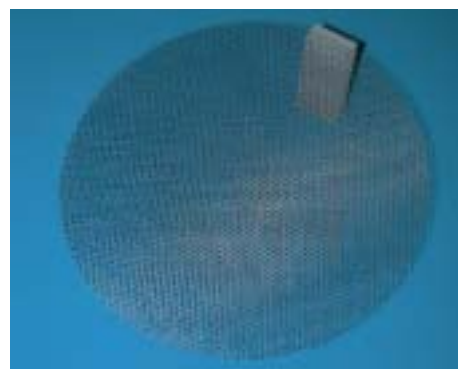


Abb. 2: Laserschneidanlage Schattenmaske (gesamt)

#### Ansprechpartner

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

## Prototyp einer mobilen Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge

### Aufgabenstellung

Das im IWS entwickelte Verfahren zur rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge durch Lasermikrostrukturierung ist bereits erfolgreich in die industrielle Produktion bei der Fliesenfertigung überführt worden. Derzeit sind bereits fünf Anlagen an verschiedenen Produktionsstandorten in Deutschland und Italien im Einsatz. Weiter entwickelt wird das Verfahren demnächst auch zur nachträglichen Behandlung bereits verlegter Beläge eingesetzt werden.

### Lösungsweg

Nach dem vor zwei Jahren erarbeiteten Konzept einer mobilen Anlage, wurde zunächst ein Technologieträger realisiert. Damit konnte die Umsetzung des Verfahrens nachgewiesen werden. Allerdings erwies sich der Technologieträger aus verschiedenen Gründen für den Praxiseinsatz als noch nicht geeignet. Dies betraf besonders die Anlagengröße und den Arbeitsbereich. Auf Basis neuester Entwicklungen auf dem Gebiet der Laserstrahlquellen wurde ein neues Konzept erarbeitet und realisiert.

### Ergebnisse

Die im Prototypen der mobilen Anlage zum Einsatz kommende Strahlquelle ist ein diodengepumpter Nd:YVO<sub>4</sub>-Slab-Laser. Dieser zeichnet sich aus durch ein  $M^2 < 1,2$ , Pulsdauern im Bereich von 10 ns, Pulsfolgefrequenzen bis 45 kHz und Pulsspitzenleistungen bis

170 kW. Durch die sehr gute Strahlqualität ist bei einem Fokussdurchmesser von 120 µm ein Arbeitsbereich von 460 · 630 mm<sup>2</sup> realisierbar. Die Baugröße der Laserstrahlquelle und der notwendigen Peripherie beträgt lediglich ein Drittel im Vergleich zu der im Versuchsträger eingesetzten. Somit konnte das Bauvolumen der Gesamtanlage auf circa die Hälfte des ersten Konzeptes reduziert werden. Der Prototyp der mobilen Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge zeichnet sich durch die folgenden Eigenschaften aus:

- kompakte Abmessungen
- Arbeitsbereich 460 · 630 mm<sup>2</sup>
- keine Einschränkungen der Bearbeitung an Kanten und Ecken
- Bearbeitungskapazität ≤ 6 m<sup>2</sup> / h
- batteriebetriebener Fahrtrieb

Die Anlage ist so ausgelegt, dass Schnittstellen für die Automatisierung vorgesehen sind.

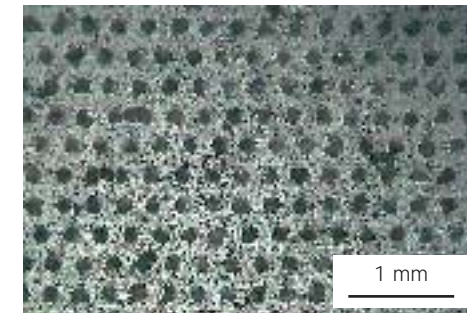


Abb. 1: Feinsteinzeugoberfläche, mit diodengepumptem Nd:YVO<sub>4</sub>-Slab-Laser strukturiert



Abb. 2: Prototyp der mobilen Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge

#### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Jan Hauptmann  
Tel.: 0351 / 2583 236  
jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



## Laserstrahlreinigen zur Fügestellenvorbereitung

### Aufgabenstellung

Zunehmende Schweißgeschwindigkeiten, Einsatz von Werkstoffen mit höherer Festigkeit zur Senkung der Bauteilgröße und -masse sowie die Forderung nach höchster Prozesssicherheit bei automatisierten Schweißprozessen sind Gründe, jede Fehlermöglichkeit auszuschalten. Eine gründliche Reinigung der Fügepartner vor dem Schweißprozess ist dafür eine wichtige Voraussetzung. Dabei ist die Tendenz erkennbar, nur die Funktionsflächen partiell zu reinigen und auf das Waschen des gesamten Bauteiles zu verzichten. Sollen vormontierte Baugruppen gefügt werden, ist dies besonders relevant, da dort unabhängig vom Reinigungszustand der einzelnen Baugruppen durch die Montage zusätzliche Verunreinigungen auf die Fügestellenbereiche gelangen können.

Für die Realisierung einer automatischen Getriebebeschweißanlage stellte der Auftraggeber, Maschinenfabrik Arnold in Ravensburg, die zusätzliche Aufgabe, den zum Schweißen vorgesehenen cw-CO<sub>2</sub>-Laser RS DC 035 während der kurzen Positionierzeiten der Fügepartner zum Reinigen einzusetzen. Oberflächentopographieveränderungen im Bereich von eng tolerierten Presssitzen waren dabei unzulässig.

### Lösungsweg

Das Laserstrahlreinigen verlangt im Wirkungsbereich eine konstante hohe Laserstrahlintensität bei kurzen Wechselwirkungszeiten. Die prinzipielle Lösung liegt in der Anwendung eines

Scannersystemes, das den Wirkfleck des Laserstrahles mit hoher Geschwindigkeit senkrecht zur Vorschubrichtung bewegt. Aus der Geometrie des Bauteiles und der Sinusschwingung des Scanners ergibt sich jedoch, dass in Abhängigkeit vom Auslenkwinkel des Scannerspiegels ständig wechselnde Laserstrahlintensitäten und Wechselwirkungszeiten auftreten. Dieses Problem wurde durch eine scannerpositionsabhängige Laserleistungssteuerung gelöst.

Da bei den abzutragenden Verschmutzungen neben einer gleichmäßigen Grundverschmutzung, z. B. durch Kühlschmierstoffreste, auch sporadische Anhäufungen vorkommen, besteht zusätzlich die Notwendigkeit, vor dem Laserstrahlreinigen für eine "Homogenisierung" der Verschmutzung zu sorgen. Für die Alternative, eine quantitative Erkennung der Schmutzverteilung und eine darauf basierende zusätzliche Beeinflussung der Laserstrahlintensität, existieren bisher keine ausgereiften wirtschaftlichen Lösungen. Diese Homogenisierung wird durch einen Druckluftstrom im zu reinigenden Bereich realisiert.

### Ergebnisse

Die Beseitigung der Verschmutzungen im Fügestellenbereich wurde auf spektroskopischem Wege und mittels Tapetest nachgewiesen. Die Ergebnisse korrelieren miteinander, so dass mit dem Tapetest auch eine einfache vor Ort auszuführende Kontrollmöglichkeit gegeben ist. Durch erfolgreiche Probe-schweißungen wurde der Reinigungseffekt verifiziert. Die Technologie wird z. Zt. an zwei industriellen Schweißanlagen eingeführt.

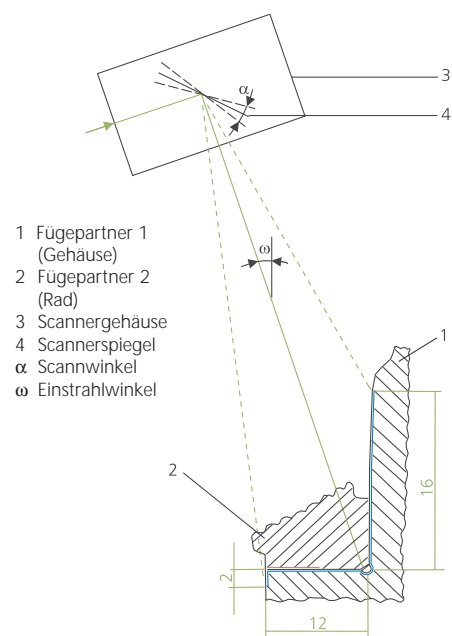


Abb. 1: Prinzipdarstellung der Strahlführung zum Laserstrahlreinigen, des zu reinigenden Bereiches am Gehäuse (-) sowie der Fügestelle (-)



Abb. 2: Prozessfoto (links oben: Flachdüsen-system)

#### Ansprechpartner

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

## Trennung transparenter Firnissschichten an den originalen Eichenholzpaneelen des Grünen Gewölbes Dresden mittels Laser

### Aufgabenstellung

Im Rahmen des Wiederaufbaues des Dresdener Residenzschlosses werden gegenwärtig die erhaltenen Originalteile des Interieurs des Grünen Gewölbes restauriert. Dabei bestand die Aufgabe, an den Eichepaneelen einen alkohollöslichen Harzfirnis aus dem Jahre 1890 von dem gealterten getrockneten originalen Leinölfirnis von 1723 abzunehmen. Eine herkömmliche Abnahme mit Lösemittel erbrachte auf Grund der in der abzunehmenden Schicht verteilten Erdpigmente, der sehr dünnen originalen Leinölfirnissschicht und der offenporigen Holzoberfläche keine befriedigenden Ergebnisse. Es sinkt z. B. ein Teil des in Lösung gegangenen Harzes in die offenen Poren ab und lässt diese dunkel erscheinen. Ein Auswaschen der Poren mit Lösemittel ist aufgrund der dann notwendigen intensiven Anwendung des Lösemittels nicht vertretbar, da es zum Anquellen der sehr dünnen Ölung kommt (in der Querschlifftbetrachtung erst bei 500-facher Vergrößerung und mit UV-Anregung in der Fluoreszenz zu erkennen).

### Lösungsweg

Der für die Teilaufgabe verantwortliche Restaurator, Dipl.-Rest. K. Püschner, bezog bei der Suche nach Alternativen auf Grund der medienfreien und berührungslosen Arbeitsweise des Lasers auch die Laserfreilegung in die Untersuchungen mit ein. Schwellenwertbestimmungen, insbesondere die Schwellintensität für den Abtrag des Harzfirnisses und die Reaktionsschwellen von Leinölfirnis und Holz zeigten im vorliegenden Fall zunächst die prinzipielle Erfolgsaussicht der Laserstahlfreilegung an. Danach erfolgte der spektroskopische Nachweis des Erhaltenes der Leinölfirnissschicht und das Anlegen von Musterflächen zur Entscheidung über das weitere Restaurierungskonzept.

### Ergebnisse

In diesem Fall wurden dem Laser eindeutig Vorteile bei der Finisabnahme bescheinigt. Mit dem aufgezeigten Lösungsweg wurde erstmals das Laserabtragen für die Trennung von zwei transparenten Firnissschichten praktiziert. In der Zwischenzeit sind alle Paneele durch den Restaurator Püschner mit den in den Untersuchungen im IWS erarbeiteten Parametern erfolgreich bearbeitet worden. Man kann allerdings für die Laseranwendung keine einheitliche Anwendungsrezeptur erstellen. Der problemorientierte Test mit wissenschaftlicher Untersuchung sollte generell einer Anwendung an empfindlichen Kunstobjekten vorausgehen.



Abb. 1: Firnisabnahme mit Nd:YAG-Laser



Abb. 2: Vergleich Vorzustand (untere Bildhälfte) Lösungsmittelfreilegung (oben links) Laserstrahlfreilegung (oben rechts)

#### Ansprechpartner

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

## Schneiden einer Mo-Maske zur Ionenbestrahlung von Implantaten

### Aufgabenstellung

Künstliche Gelenke können die Lebensqualität von Patienten mit Gelenkabnutzungserscheinungen wesentlich verbessern. Voraussetzung für erfolgreiche und langlebige Implantate sind sowohl eine gute Bioverträglichkeit als auch eine feste Verankerung des Implantatmaterials im umliegenden Knochen. Diesem Ziel dienen Forschungen zur Oberflächenmodifizierung von Implantatmaterialien wie den überwiegend eingesetzten Titanlegierungen am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Forschungszentrums Rossendorf (FZR). Die dort entwickelte Technologie basiert auf Bestrahlung mit einem geeigneten Ionenstrahl, so dass mit Natriumionen fest verankerte Hydroxylapatitschichten in mehreren Reaktionsschritten erzeugt werden. Da das Material Hydroxylapatit ein wesentlicher Bestandteil von Knochengewebe ist, kann so ein besseres Einwachsen des Implantats realisiert werden.

Für die Forschung ist der Nachweis der Wirkung der Oberflächenmodifizierung von wesentlicher Bedeutung. Insbesondere will man untersuchen, welche minimalen modifizierten Flächenanteile und Übergänge zu nicht bestrahlten Bereichen für eine Reaktion von Zellen eine Wirkung haben. Dafür ist eine lateral strukturierte Ionenbestrahlung erforderlich.

### Lösungsweg

Durch die Verwendung geeignet strukturierter Ionenmasken kann mit einem homogenen Ionenstrahl eine lateral selektive Bestrahlung realisiert werden. Wegen der hohen Ionendichte und der oft schweren Elemente sind Lackmas-

ken, die in der Halbleiterindustrie verwendet werden, ungeeignet. Als Maskenmaterial kommen hier vor allem Metalle mit hoher Ordnungszahl in Frage. Eine frei programmierbare Bearbeitung solcher meist hochschmelzender Materialien für Einzelstücke bzw. Kleinserien kann am kostengünstigsten mittels Laser und Scannertechnik durchgeführt werden.

Für die Maske waren kleinste Durchbrüche mit Abmessungen bis zu 30 µm im Durchmesser gefordert. Am IWS wurde dazu ein diodengepumpter Festkörperlaser mit Frequenzverdreifung (355 nm) eingesetzt. Sowohl die kurzen Pulsdauern von 15 ns als auch die UV-Wellenlänge dieses Lasertyps erlauben eine schädigungsarme Arbeitsweise, mit der eng benachbarte Mikrostrukturen in dünnen Metallfolien erzeugt werden können.

### Ergebnisse

Mit dem direkt schreibenden Verfahren wurde auf der Basis eines CAD-Files, der die gewünschten Strukturen enthielt, die in den Abbildungen dargestellte Maske aus einer 40 nm dicken Mo-Folie ausgeschnitten. Aufgrund der schädigungsarmen Arbeitsweise durch geringen Eintrag von Wärme in die Randbereiche der eng benachbarten Teilelemente konnte eine für die Applikation günstige Maske hergestellt werden.

## Strukturierung von Niederhaltern für die minimalinvasive Herzchirurgie mittels frequenzvervielfachtem Nd:YAG-Laser

### Aufgabenstellung

Seit Anfang 2000 werden in zunehmendem Maße total endoskopische Bypass-Operationen mit Hilfe von Telemanipulatorsystemen durchgeführt. Das Verringern des chirurgischen Zugangs zum Herzen (Knopfloch-Chirurgie) und der im Vergleich zur konventionellen Chirurgie stark verkleinerte Arbeitsraum führen dazu, dass die derzeit zur Verfügung stehenden Instrumente und Operationshilfsmittel diesen erhöhten Anforderungen für den minimal-invasiven Einsatz nur noch bedingt gerecht werden können.

Das Ziel dieser Arbeiten war die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung eines endoskopisch einführbaren Stabilisators, der für die notwendige lokale Immobilisation des betreffenden Herzareales sorgt. Hauptaugenmerk musste hierbei auf eine minimalste Traumatisierung des betreffenden Gewebes gelegt werden. Eine Strukturierung der Finger erweist sich aus mehreren Gründen als nützlich. Auf der einen Seite kann eine aufgeraute Oberfläche ein seitliches Weggleiten verhindern, was wichtig für die Qualität der Immobilisation ist. Auf der anderen Seite wird durch Einhaken in das Endothelgewebe des Epikards ein Formschluss ermöglicht. Dadurch wird eine Reduzierung der auf das Herz einwirkenden Kraft erreicht.

### Lösungsweg

Eine geeignet dimensionierte Pylonstruktur als Oberfläche der Fingerbaugruppe soll die Schädigung des Gewebes verhindern. Um die Parameter für die gewählte Struktur zu ermitteln, wurden Tests zur Ermittlung des optimalen Lasers durchgeführt. Es wurde die Laserleistung angepasst, die Anzahl der Wiederholungen und die Pulsfrequenz aufeinander abgestimmt. Für eine Strukturierung des Niederhalters ist es notwendig, die Finger exakt im Fokus des Lasers zu positionieren. Nach der Bearbeitung durch den Laser wurde die Oberfläche geschlichtet. Dies bedeutet ein kurzes Aufschmelzen und führt zu einer erheblichen qualitativen Verbesserung. Abschließend wird die Pylonstruktur in einem Ultraschallbad mit Aluminiumkorund als Schleifmittel behandelt.

### Ergebnisse

Wichtigstes Kriterium bei der Auswahl der Struktur ist, dass der Finger nach der Modifikation Umfangskräfte aufnehmen kann. Für die Anwendung eines Formschlusses kam so von vier zur Auswahl stehenden Varianten nur die Pylonen-Struktur in Frage. Zum Einsatz kam ein frequenzvervielfachter Nd:YAG-Laser. Die erzielten Parameter der Pylonen entsprechen den gesetzten Zielen, wobei sich die Rauheit durch Modifikation der Struktur und der Laserparameter noch variieren lässt. Die mittels Laserbearbeitung erzeugte Pylonenstruktur stellt eine qualitativ hochwertige Lösung für die Strukturierung des Niederhalters dar.

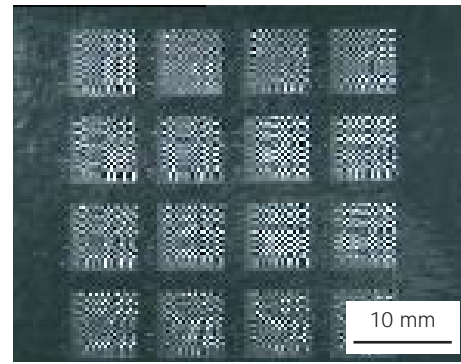


Abb. 1: Ionenstrahlmaske bestehend aus 4 x 4 Arrays von Mikrostrukturen

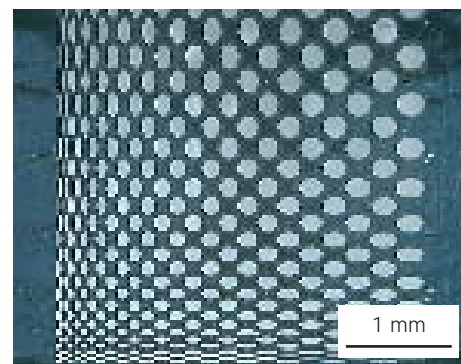


Abb. 2: Ansicht eines Arrays der Maske

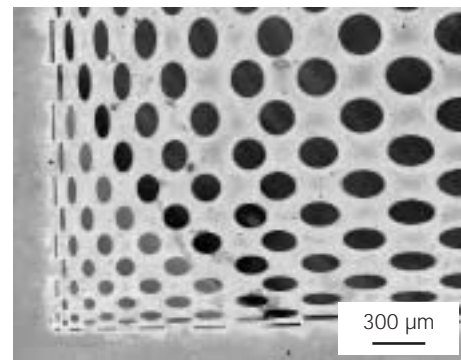


Abb. 3: Maske im Bereich der kleinsten Strukturen (REM-Aufnahme)

#### Ansprechpartner

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



Abb. 1: Finger mit Pylonstruktur



Abb. 2: Niederhalter für minimalinvasive Herzchirurgie

#### Ansprechpartner

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



## FuE-Angebot: Multimedia / Simulation

**Redaktion:** Im Fraunhofer IWS Dresden gibt es neben den fünf Abteilungen noch zwei Arbeitsgruppen rund um die Themen Modellierung, Simulation und Weiterbildung. Ziel der hier tätigen Wissenschaftler ist es unter anderem, durch Entwicklung von Modellen das Prozessverständnis bei den im IWS gepflegten technologischen Verfahren zu verbessern. Auf diese Weise sollen Bearbeitungsergebnisse vorausberechnet und die Prozessführung optimiert werden. Im vergangenen Jahr wurde das BMBF-Verbundprojekt SIMKOPP abgeschlossen, in dem eine Softwareplattform für die Prozessoptimierung unterschiedlicher Beschichtungsverfahren geschaffen wurde. Welche Ergebnisse wurden dabei erzielt?

**Dr. Lepski:** Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung von Software zur Vorausberechnung von Bearbeitungsergebnissen bei verschiedenen industrierelevanten Beschichtungsverfahren, um letztlich in der Produktionsvorbereitung die Prozessoptimierung von der teuren Produktionsanlage auf eine "virtuelle Maschine" zu verlagern. So wurde z. B. im IWS die Software SIMKOPP-LAVA zur Simulation der Schichtbildung beim Laser-Pulver-Auftragschweißen entwickelt, die innerhalb weniger Minuten auf einem PC das zu erwartende Bearbeitungsergebnis (Schweißraupengeometrie, Aufmischung, Temperaturverteilung in der Prozesszone, Pulverausnutzungsgrad etc.) vorausberechnet und Hinweise zur schrittweisen Prozessoptimierung gibt.

**Dr. Völlmar:** Im gleichen Verbundprojekt wurde im IWS auch das Programm SIMCOAT zur Simulation der Vakuumbogenbeschichtung entwickelt. Für beide Verfahren sind die entscheidenden Grundsatzprobleme gelöst, wenn auch einige Modelle noch weiter entwickelt werden müssen. Bis zur Bereit-

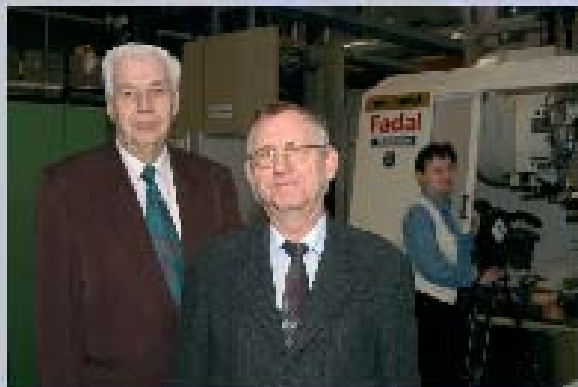
stellung einer robusten, produktionstauglichen Software ist jedoch noch viel Detailarbeit zu leisten, am besten in Zusammenarbeit mit potenziellen Anwendern.

**Redaktion:** Da gibt es also noch Forschungsbedarf. Andererseits wurde das Projekt "Laserlexikon auf CD-ROM" vollendet. Wie ist die Resonanz bei den Kunden?

**Dr. Völlmar:** Mit der Auslieferung der ersten CD-ROM "Laserlexikon" im März 2002 steht Anwendern ein multimediales, html-basiertes Hilfsmittel zur Verfügung, mit dem sie sich schnell und unter Nutzung zahlreicher Animationen und Videoclips über verschiedene Fachbegriffe rund um den Laser informieren können. Auf diese Weise wird dem zunehmenden Bedarf in diesem Bereich Rechnung getragen. Damit steht neben der CD-ROM "Lasersicherheit" aus dem Fraunhofer IWS Dresden ein weiteres Hilfsmittel zur Verfügung, das insbesondere die Firmen der Automobil- und Automobilzulieferindustrie zur Qualifizierung der an Laseranlagen tätigen Personen unter Nutzung moderner Multimedia- und Internet-Techniken verwenden können.

**Redaktion:** Dies sind zwei Beispiele aus dem Bereich E-Learning. Gibt es dazu im IWS weitere Aktivitäten?

**Dr. Völlmar:** Das BMBF-Projekt "Medi@Train" verfolgt das Ziel, neue Multimedia-Technologien, die sich noch in Entwicklung befinden, in praxisorientierte Trainingsprogramme für Unternehmen umzusetzen. Die dabei erreichten Ergebnisse werden wir im Februar 2003 zusammen mit anderen Fraunhofer-Instituten auf der Messe "Learntec" in Karlsruhe demonstrieren.



*Es gibt nichts Praktischeres  
als eine gute Theorie.  
Immanuel Kant*



**Dr. Siegfried Völlmar**  
Gruppenleiter Multimedia  
(Tel. 2583 434)

#### 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)

#### Prozess-Simulation und Softwareentwicklung für die Lasermaterialbearbeitung

"Probieren geht über Studieren", sagt der Volksmund, doch bei modernen Hochtechnologien kann Probieren sehr teuer werden. Ein möglichst tiefgehendes Verständnis der in der Prozesszone ablaufenden Vorgänge erleichtert nicht nur die Weiterentwicklung und Optimierung von Verfahren der Lasermaterialbearbeitung und Beschichtung, sondern spart auch Kosten in der Produktionsvorbereitung. Daher gehört im IWS zur Verfahrensentwicklung und -weiterentwicklung in zunehmendem Maße auch die Prozessmodellierung bis hin zur Entwicklung 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 2002

1. LAVA - Simulationssoftware zum Laser-Pulver-Auftragschweißen 92
2. SimCoat - ein Simulationsprogramm zur Optimierung von Schichtabscheidungsprozessen in industriellen Anlagen 94
3. "Virtuelle Tagungsbesuche" via Internet 95
4. Multimediale Darstellungen für Wissenschaft, Technik und Ausbildung 96







## LAVA - Simulationssoftware zum Laser-Pulver-Auftragschweißen

## Aufgabenstellung

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes zur Prozess-Simulation komplexer oberflächentechnischer Produktionsprozesse (SIMKOPP) wurde das Programmsystem LAVA zur Simulation des Laser-Pulver-Auftragschweißens entwickelt. Ziel war eine "virtuelle Beschichtungsanlage", die den Beschichtungsprozess simuliert und das für einen bestimmten Prozessparameter zu erwartende Bearbeitungsergebnis vorausberechnet. Dazu gehören die Schweißraupengeometrie, das Temperaturfeld in der Prozesszone und alle daraus ableitbaren Schlussfolgerungen über Beschichtungsrate, Energieverbrauch, Pulverausnutzungsgrad, Anbindungsfehler, unerwünschte Substrataufschmelzung usw.

Dabei sollte die grafische Nutzeroberfläche auch für die Simulation anderer Oberflächenbearbeitungsverfahren anwendbar sein und die Arbeit in verteilten Rechnernetzen über das Internet unterstützen.

## Lösungsweg

Die entwickelte Software besteht aus zwei eigenständigen Programmen, dem eigentlichen Simulationsmodul und einem universell einsetzbaren Ein-/Ausgabemodul, das die benötigten Eingabemaschinen vom jeweiligen Simulationsmodul anfordert und die Eingabedaten dann, wenn nötig auch via Internet, an das Simulationsmodul schickt. Von diesem erhält es nach Ende der Rechnung die Ergebnisse und stellt sie grafisch dar. Das Simulationsmodul kann darüber hinaus auch mit externen Grafikprogrammen über ASCII-Dateien kommunizieren.

Beim Laser-Pulver-Auftragschweißen wird der pulverförmige Zusatzwerkstoff durch eine Düse auf das Substrat geblasen, während des Fluges von dem Laserstrahl vorgewärmt und spätestens auf dem Substrat aufgeschmolzen.

Das Programm simuliert zunächst die Flugbahnen der Pulverteilchen und ihre Wechselwirkung mit dem Laserstrahl und berechnet die Temperaturverteilung der Partikel vor dem Eintauchen in das Schmelzbad (Abb. 1) sowie die mit diesem Prozess verbundene Schwächung des Laserstrahls. Die so berechneten Energie- und Massestromdichten bilden die Eingangsgrößen für die selbstkonsistente Berechnung von Temperaturfeld und Schweißraupengeometrie. In der Regel können nur jene Pulverteilchen eine feste Verbindung mit dem Substrat eingehen, die vom Schmelzbad aufgenommen werden. Nicht aufgeschmolzene Partikel kühlen das Schmelzbad und vermindern so dessen Fähigkeit zur Pulveraufnahme. Die Raupengeometrie hängt folglich - außer von Oberflächenspannung und Schwerkraft - auch empfindlich vom Temperaturfeld ab, das seinerseits durch die Raupengeometrie beeinflusst wird. Beide müssen daher gemeinsam iterativ berechnet werden.

Das Temperaturfeld wird halbanalytisch unter Verwendung der Rosenthal-Lösung der Wärmeleitungsgleichung aus einer Verteilung von Oberflächenquellen bestimmt, die aus den externen Energieströmen zu berechnen ist. Das bietet Rechenzeitvorteile gegenüber rein numerischen Verfahren.

## Ergebnisse

Das Programm liefert die folgenden Ergebnisdaten:

- Pulverteilchentemperaturen in Abhängigkeit von Partikelflugbahn und -größe,
- Schwächung des Laserstrahls durch den Pulverstrom,
- laserinduziertes Temperaturfeld im Werkstück ohne Pulver,
- Temperaturverteilung in Substrat und Raupe,
- Substratanschmelzung und Aufmischung,
- lokale Maximaltemperaturen als Grundlage für die Bestimmung von Umwandlungszonen,
- Schweißraupengeometrie,
- Pulverausnutzungsgrad,
- Bewertung des Ergebnisses bezüglich Bearbeitungsqualität und -ökonomie und daraus abgeleitete Korrekturvorschläge.

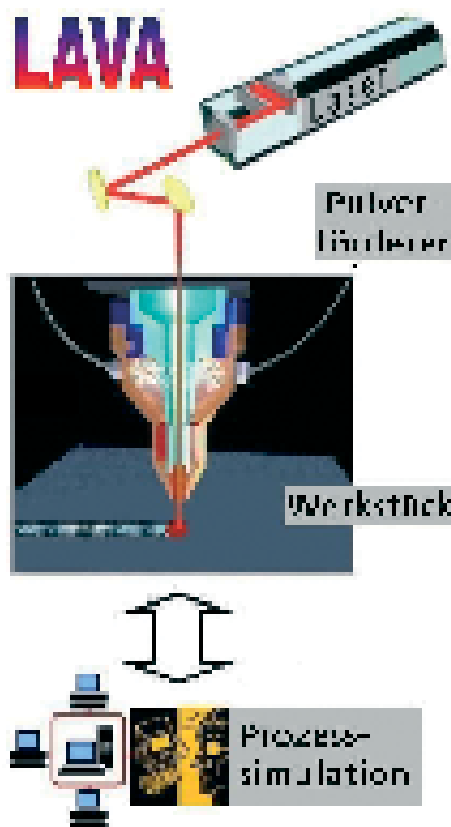
So erkennt das Programm folgende Mängel und ihre möglichen Ursachen:

- Pulververdampfung im Laserstrahl,
- Überhitzung der Schmelze,
- ungenügende Energiezufuhr,
- Pulvermangel oder -überschuss,
- unzureichende Pulverausnutzung,
- zu hohe Aufmischung.

Die so genannte "inverse Simulation", d. h. die Bestimmung der zur Erzielung eines vorgegebenen Resultates erforderlichen Prozessparameterwerte, ist mit LAVA nicht möglich. Das Programm kann aber die Ergebnisse mit Vorgabewerten vergleichen und daraus Korrekturvorschläge ableiten, die eine schrittweise Prozessoptimierung erlauben. Diesem Ziel dient auch die Option, einzelne Prozessparameter zu variieren, um damit funktionale Abhängigkeiten zu ermitteln, z. B. den Zusammenhang zwischen Aufmischung und Laserleistung bei konstanten Werten der übrigen Parameter (Abb. 2).

Das oben beschriebene E/A-Modul gestattet zwei- und dreidimensionale grafische Darstellungen (z. B. der in Abb. 3 wiedergegebenen Temperaturverteilung auf der Werkstückoberfläche), die auf dem Bildschirm beliebig verschoben, gedreht und in ihrer Größe verändert werden können. Optional ist auch eine Ergebnisdarstellung mit externen Programmen wie Microcal ORIGIN® oder Microsoft EXCEL® möglich, um die spezifischen Darstellungsmöglichkeiten dieser Softwareprodukte auszunutzen. Ein Beispiel dafür ist die in Abb. 4 dargestellte Temperaturverteilung in der Substratebene, die zeigt, dass die Schmelztemperatur des Substrats im Idealfall nur in einem schmalen sichelförmigen Bereich an der Raupenfront leicht überschritten wird.

Für einen Routineeinsatz des hier vorgestellten Programms LAVA in der Produktion müssen allerdings noch weitere Modelle zur Anlagen- und Bauteilbeschreibung integriert werden. Dies soll in der nächsten Zeit in Zusammenarbeit mit interessierten Unternehmen geschehen.



## Ansprechpartner

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

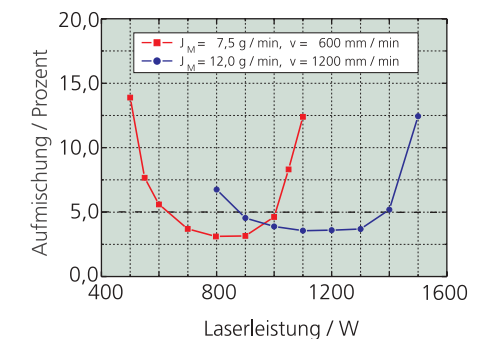


Abb. 2: Abhängigkeit des Aufmischungsgrades von der Laserleistung für zwei Kombinationen von Pulvermassenstrom  $J_M$  und Vorschubgeschwindigkeit  $v$

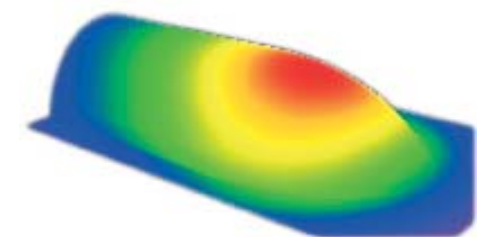


Abb. 3: Dreidimensionale Falschfarbendarstellung des Temperaturfeldes auf der Oberfläche der Schweißraupe

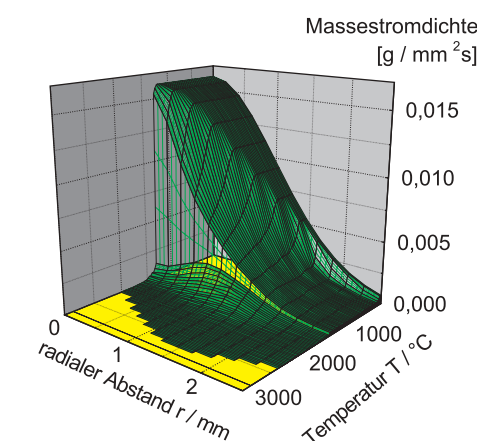


Abb. 1: Radiale Massestromdichteverteilung der Teilchen mit einer Mindesttemperatur  $T$  beim Erreichen der Werkstückoberfläche

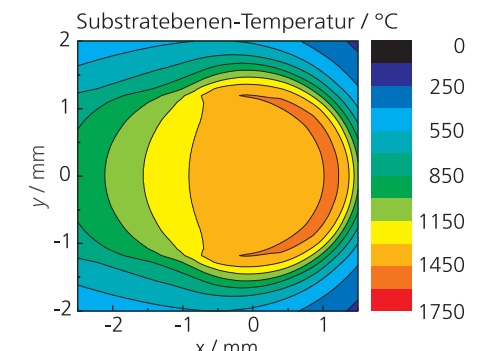


Abb. 4: Temperaturverteilung in der Substratebene unter dem Laserschmelzbad: Die Schmelztemperatur des Substrats von 1450 °C wird nur in einem schmalen sichelförmigen Bereich an der Raupenfront überschritten



## SimCoat - ein Simulationsprogramm zur Optimierung von Schichtabscheidungsprozessen in industriellen Anlagen

### Aufgabenstellung

Als dominierendes Verfahren zur industriellen Abscheidung tribologischer, harter Schutzschichten hat sich die Vakuumbogenbeschichtung durchgesetzt. In der industriellen Beschichtungspraxis müssen sehr viele Bauteile in einem Produktionszyklus beschichtet werden. Dadurch kommt es zwangsläufig zu Abschattungs- und Projektionseffekten und daraus resultierenden inhomogenen Beschichtungsraten bei dreidimensionalen Geometrien. Um den experimentellen Aufwand bei der Optimierung der Beschichtungsbedingungen möglichst gering zu halten und Fehlchargen auszuschließen, muss deshalb der Beschichtungsprozess in einer virtuellen Anlage möglichst realistisch simuliert werden.

### Lösungsweg

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts SIMKOPP ist ein Programmsystem entwickelt worden, das die produktionsnahe Optimierung von Beschichtungstechnologien erlaubt. Entsprechend den komplexen Verhältnissen in den technischen Anlagen ist das Programmsystem sehr graphisch ausgerichtet. Grundlage des Vorgehens sind zum einen experimentell abgesicherte Resultate zur Ausbreitung der zur Beschichtung eingesetzten Plasmen des Vakuumbogens und zum anderen die Befunde zur Schichtbildung beim Wirkmechanismus Subplantation, der bei den vorliegenden Plasmapartikeln relativ hoher Energie dominierend ist.

Als Fallbeispiel ist die Beschichtung mit Kohlenstoff ausgewählt worden, da mit diesem Element je nach Beschichtungsbedingungen ein breites Eigen-

schaftsspektrum erzeugt werden kann. Beispielsweise können in einem Arbeitszyklus sowohl weichere als auch extrem harte Schichten als Multischichtsystem auf Bauteile aufgebracht werden. Für den praktischen Einsatz als Simulationsprogramm sind Schnittstellen zum Import komplexer geometrischer Bauteile und zur Erarbeitung von Bestückungsvorschriften vorhanden.

Das entwickelte Programmsystem wird als "SimCoat2D" für Beschichtungen ebener Substrate und als "SimCoat3D" für Beschichtungen dreidimensionaler Bauteile angeboten. Demonstrationsbeispiele sind im Internet unter <http://www.Simcoat.de> zu finden. Als Beispiele für die Beschichtung einer ebenen Bauteiloberfläche sind hier die im Zeitablauf in 60 Einzelschritten entstandene Multischichtstruktur einer Kohlenstoffschicht und die berechnete Verteilung der Diamantbindungen in Falschfarben dargestellt dargestellt. Die Details der Simulationen werden in der abschließenden Veröffentlichung in der JOT, Heft 1 (2003) beschrieben.

### Ergebnisse

Als Ergebnis der Entwicklungsarbeiten werden die beiden Simulationstools SimCoat2D und SimCoat3D angeboten. Diese sind sehr allgemein konfiguriert und zur Simulation einer breiten Klasse von Beschichtungsanlagen geeignet. Die Schnittstellen zum Import von Bauteilgeometrien oder zur Erarbeitung von Batchdateien können anwendergerecht modifiziert werden. Die Implementierung der Spezifika weiterer Schichtsysteme ist möglich.

## " Virtuelle Tagungsbesuche " via Internet

### Aufgabenstellung

Zur Verbreitung des sehr rasch zunehmenden Wissens, also wissenschaftlicher Ergebnisse und wirtschaftlicher Realisierungen, sind neue Wege und Methoden unabdingbar notwendig. Große Entfernungen und enge terminliche Begrenzungen erschweren häufig die Teilnahme an den Präsenz-Veranstaltungen.

Die gestiegenen Möglichkeiten des Internets und die wachsende Akzeptanz der moderner Medientechnik bieten sich an, eine "virtuelle Teilnahme" an Tagungen, Workshops und Seminaren zu realisieren. Damit können Veranstaltungen jeder Art für alle nutzbar sein, immer und überall.

### Lösungsweg

Moderne Wissensvermittlung erfolgt heutzutage durch intelligente Kombination von klassischen Vortragsmitteln mit Animationen komplexer Vorgänge, Audio- und Videotechnik. Im IWS ist ein hochgradig automatisiertes Bearbeitungsverfahren zur schnellen und kostengünstigen Umsetzung dieser Inhalte in Webanwendungen entwickelt worden. Mit Hilfe verschiedener ineinandergreifender Werkzeuge zur Datenerfassung und Datenbearbeitung kann in wenigen Arbeitsschritten aus einer Vorlesung oder aus Tagungsvorträgen eine im Internet streamfähige Anwendung erstellt werden. Das Wesentliche, in diesem Fall der mündliche Vortrag und das begleitende graphische Material, werden miteinander so gekoppelt dargeboten, dass der wissenschaftliche Zusammenhang jederzeit nachvollzogen werden kann.

Die Software ist am Beispiel der weltgrößten Laseranwender-Konferenz ICALEO mit 170 Vorträgen getestet und angewendet worden. Die zeitnahe Umsetzung war nach 2 Wochen beendet. Das Ergebnis ist unter <http://www.icaleo.org> jederzeit einsehbar.

### Ergebnisse

Als Ergebnis der durchgeführten Arbeiten können wir zwei Dienstleistungen anbieten:

- zeitnahe Umsetzung von Konferenzen in streaming Daten (auf Anforderung wird die kostenpflichtige Nutzung ebenfalls bereitgestellt) und von Einzelveranstaltungen (auf Anforderungen auch als Live-Veranstaltung im Netz)
- Darstellung komplexer technischer Vorgänge als Videomaterial durch Kombination von Originalaufnahmen vor Ort und Animationen zur Erklärung komplexer logischer Zusammenhänge

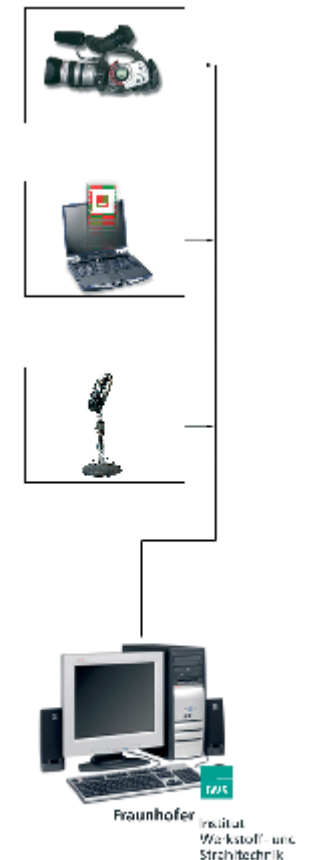


Abb. 1: Technologischer Ablauf zur Herstellung eines Videostreams und Präsentation eines Vortrages von der ICALEO 2002

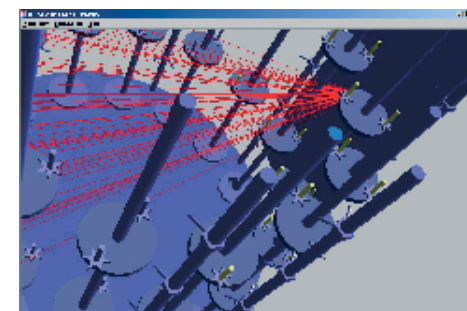


Abb. 1: Modellierung einer industriellen Beschichtungsanlage

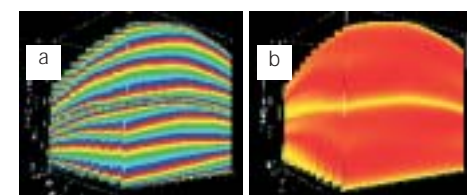


Abb. 2: Falschfarbendarstellung des Schichtwachstums  
a) Wachstum einer Kohlenstoffschicht  
b) Verteilung der Diamantbindungen in einer Kohlenstoffschicht (Substrat ist unten, freie Oberfläche oben)

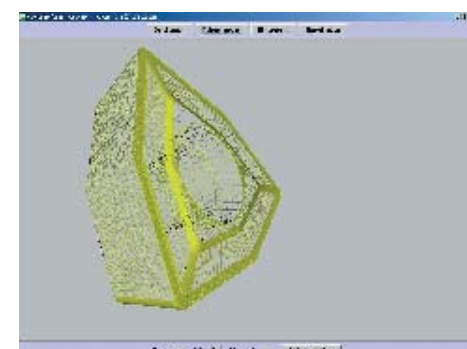


Abb. 3: Parzellenstruktur bei Beschichtung einer Wendeschneidplatte

### Ansprechpartner

Dr. Bernd Schultrich  
Tel.: 0351 / 2583 403  
[bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de](mailto:bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de)

### Ansprechpartner

Dr. Siegfried Völlmar  
Tel.: 0351 / 2583 434  
[siegfried.voellmar@iws.fraunhofer.de](mailto:siegfried.voellmar@iws.fraunhofer.de)





## Multimediale Darstellungen für Wissenschaft, Technik und Ausbildung

### Aufgabenstellung

Moderne hochproduktive Fertigungsverfahren in Prozessketten erfordern von den Entwicklern und Anlagenbedienern die Beherrschung aller Details und möglicher Hinweise auf Abweichungen vom Normverhalten. Insbesondere unsichtbare, schnell ablaufende oder sicherheitsrelevante Vorgänge müssen begriffen und beherrscht werden. Dabei muss der Lernprozess an die individuellen Lerngewohnheiten und unterschiedlichen Erfahrungen angepasst sein, um nicht uninteressant und damit erfolglos zu werden. Beispiele aus dem Umfeld der hybriden Schweißverfahren machen diese Problemkreise besonders deutlich.

### Lösungsweg

Der Einsatz neuer Medien ermöglicht die zielorientierte Verknüpfung von Texten, Bildern, Videos mit Animationen und rechnergestützter Simulation von Prozessen in dreidimensionalen Räumen. Komplexe Vorgänge wie Ausbreitung der Laserstrahlung, Wärmetransport und Schmelzströmungen werden mit den zu ihrer Erzeugung und Beherrschung notwendigen Anlagenelementen zu virtuellen Lernumgebungen verknüpft. Auf der Basis eines datenbankgesteuerten Informationssystems können sich die Lernenden ihre Fragestellung und die jeweils speziellen Erfordernisse selbst gestalten.

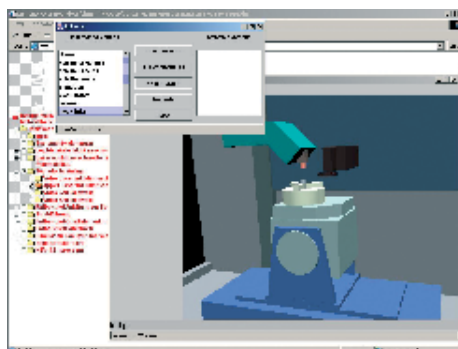


Abb. 1: "Virtuelle Anlage" zum Hybrid-schweißen



Abb. 2: Suchfunktion innerhalb der Lernumgebung

### Ansprechpartner

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

Die intelligente Assistenz optimiert den Lernprozess und ermöglicht die selbständige Einarbeitung in das Wissensgebiet bis hin zum Erlernen der Bedienung der Anlagen. Technische Neuerungen der Gerätesysteme sind ohne tiefgreifende Eingriffe in das Datensystems quasi live einzubringen.

Die praktischen Erfahrungen werden an virtuellen Laseranlagen, an Simulationstools zur Laserstrahlführung und für komplette Maschinensysteme demonstriert. Darüber hinaus werden die Lernumgebungen durch Grundlageninformationen zur Lasertechnik (Laserlexikon) und zur Arbeitssicherheit beim Umgang mit Lasern ergänzt.

### Ergebnisse

Die Kurse zur Lasersicherheit und das Laserlexikon werden vom Institut als CD-Rom angeboten. Dazu sind aktuelle Informationen im Internet unter [www.lasersicherheit.de](http://www.lasersicherheit.de) bzw. [www.laserlexikon.de](http://www.laserlexikon.de) zu erfragen. Ihre Bestellungen können Sie von diesen Seiten tätigen. Beratungen und in-House-Kurse verknüpft mit praktischen Übungen in den Technologielabors sind ebenfalls auf diesem Weg leicht einzuleiten. Schrittweise werden die Lernumgebungen innerhalb des Fraunhofer Knowledge Networks im Internet angeboten.

### Diplomarbeiten

V. Franke  
(Hochschule Mittweida (FH))  
*"Untersuchung verschiedener Bohrtechnologien zu reproduzierbaren Herstellungen von Düsenbohrungen in Metallen mit diodengepumpten Nd:YAG-Lasern"*

M. Glausch  
(Technische Universität Dresden)  
*"Witterungsbeanspruchte Bauteile aus Holz - Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Laserstrahlung zur Oberflächenbehandlung witterungsbeanspruchter Holzkonstruktionen"*

G. Göbel  
(Technische Universität Dresden)  
*"Beitrag zur rechnergestützten Optimierung der Bestrahlungsparameter beim Laserstrahlhärten"*

T. Kretschmar  
(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD))  
*"Reparatur und Generieren von Bauteilen durch Laser-Hybridverfahren mit Zwischen- und Endbearbeitung durch Fräsen"*

T. Kuntze  
(Hochschule Mittweida (FH))  
*"Experimentelle Realisierung eines Aufbaus zur Excimerlaserbearbeitung mittels reflektiver Phasenmaske"*

L. Piepo  
(Fachhochschule Hildesheim)  
*"Einsatzmöglichkeiten von Laserstrahlung zur Reinigung glasierter Terrakotta"*

M. Polster  
(Westfälische Hochschule Zwickau (FH))  
*"Abscheidung von dotierten Kohlenstoffschichten mit dem laserinduzierten Vakuumbogen"*

P. Rost  
(Berufsakademie Sachsen - Staatliche Studienakademie Dresden)  
*"Konzept und Erstellung einer plattformübergreifenden Komponente zur Darstellung von 3D-Daten und deren Integration in Simulationsumgebungen am Beispiel einer Laser-Beschichtungsanlage"*

### Dissertationen

W. Grählert  
(Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)  
*"Simulationsrechnung zur FTIR-reflexionsspektroskopischen Charakterisierung von Schicht- und Fasersystemen"*

J. Kaspar  
(Technische Universität Dresden)  
*"Untersuchung der durch Einwirkung kurzer hochenergetischer Laserpulse in kubisch-raumzentrierten Metallen induzierten Mikrostrukturen"*

T. Rügenapp  
(Technische Universität Dresden / Technische Universität Wien)  
*"Laserinduzierte Festphasenumwandlung in mineralischen Werkstoffen am Beispiel von Sandstein und Beton"*

O. Zimmer  
(Ruhr-Universität Bochum)  
*"Magnetische und elektrische Steuerung der Vakuumbogenbeschichtung"*

## Vorlesungen

### Vorlesungen am Institut für Produktionstechnik der TU Dresden im Wintersemester 2001 / 2002:

- Prof. Beyer: Fertigungstechnik II (Oberflächen- und Beschichtungstechnik)
- Dr. Schultrich, Prof. Beyer: Schichttechnologie
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächen-technik / Nanotechnologie

### Vorlesung am Institut für Produktionstechnik der TU Dresden im Sommersemester 2002:

- Prof. Beyer: Lasergrundlagen / Lasersystemtechnik

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

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

### Vorlesung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden:

- Dr. Nowotny: Lasermaterialbearbeitung

## Mitarbeit in Gremien

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

Prof. E. Beyer:  
Laser Institute of America (LIA),  
Board of Directors, President in 2002

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

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

Prof. E. Beyer:  
Mitglied der Europäischen Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. (EFDS)

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

Prof. B. Brenner:  
Mitglied Gutachterausschuss der AiF

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

Dr. R. Jäckel:  
Arbeitskreis "Messe- und Öffentlichkeitsarbeit" des Materialforschungsverbundes Dresden e.V.

Dr. G. Kirchhoff:  
Arbeitsausschuss "Schallemissionsanalyse" der DGzFP

A. Kluge:  
Sprecher der Rechnerbetreiber in der Fraunhofer-Gesellschaft

Dr. A. Leson:  
Mitglied im Vorstandsrat der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Dr. A. Leson:  
Sprecher des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums "Ultradünne funktionale Schichten"

Dr. A. Leson:  
Kuratoriumsmitglied der Zeitschrift "Vakuum in Forschung und Praxis"

Dr. A. Leson:  
Vorsitzender des VDI-Arbeitskreises "Studiengänge in der Nanotechnologie"

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

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

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

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

Dr. B. Schultrich, Dr. H.-J. Scheibe,  
Dr. A. Leson:  
Arbeitskreis Plasmaoberflächentechnologie der DGO

Dr. B. Schultrich:  
Vorstandsmitglied der Europäischen Forschungsgesellschaft "Dünne Schichten" e.V.

Dr. A. Techel, Dr. S. Nowotny:  
VDI-Arbeitsgruppe "Rapid Prototyping" im VDI-Bezirksverein Dresden

Dr. B. Winderlich:  
Arbeitsgruppe "Festigkeit und Konstruktion" des DVS-BV Dresden

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

## Besondere Ereignisse

### 26. Februar 2002

Feier zum 10jährigen Bestehen der Fraunhofer-Institute in den neuen Bundesländern im Fraunhofer-Institutszentrum Dresden

### 26. Februar 2002

Grundsteinlegung für den 2. Bauabschnitt im Fraunhofer-Institutszentrum Dresden

### 27. Februar 2002

Sitzung des IWS-Kuratoriums

### 14. - 18. Oktober 2002

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.

### 4. Dezember 2002

3. Fachsymposium Oberflächentechnik im Dortmunder OberflächenCentrum der ThyssenKrupp Stahl AG

## Preise des IWS 2002

### 1. Beste innovative Produktidee

Herr Kretzschmar, Herr Dr. Schwarz  
*"Entwicklung eines Systems zur Nahtfinde- und Positionssensorik NFP-2"*

Herr Seifert  
*"Entwicklung einer temperaturgeführten Laserleistungsregelung für die Lasermaterialbearbeitung"*

### 2. Beste wissenschaftlich-technische Leistung

Herr Dr. Luft, Herr Tietz  
*"Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Randschichtveredlung von ausscheidungshärtbaren Hochleistungsstählen"*

Herr Dr. Weihnacht  
*"Entwicklung einer Substratvorbehandlung zur Abscheidung superharter DLC-Schichten bis mindestens 10 µm Dicke"*

### 3. Beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers

Herr Foltyn, Herr Moss, Herr Pfeiffer  
*"Nutzung von Masken bei der Herstellung von nm-Multischichten"*

### 4. Beste wissenschaftliche studentische Leistung

Herr Franke  
*"Untersuchung verschiedener Bohrtechnologien zur reproduzierbaren Herstellung von Düsenbohrungen in Metallen mit diodengepumpten Nd:YAG-Lasern"*

Herr Beese, Herr Hofmüller  
*"Konstruktion einer optischen Messzelle zur in-situ-Analyse von Prozessgasen mittels Diodenlaser-Spektroskopie"*

### 5. Sonderpreise

Herr Roever  
*"Organisation der weltweit ersten Internetübertragung einer Konferenz"*



Feier zum 10jährigen Jubiläum der Fraunhofer-Institute in den neuen Bundesländern



Tafel zur Grundsteinlegung für den 2. Bauabschnitt



Grundsteinlegung für den 2. Bauabschnitt im Fraunhofer-Institutszentrum Dresden



## Messebeteiligungen

### Hannover-Messe Industrie 2002, 15. - 20. April 2002

Im Rahmen des Gemeinschaftsstandes "Laser Technology" präsentierte das IWS in Halle 6 - Micro Technology - auf einer 80 m<sup>2</sup> 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, Arnold GmbH & Co. Ravensburg, EFD Induction GmbH Freiburg, Linde AG München und Primes GmbH Pfungstadt wurde Ergebnisse gemeinsamer Forschungsprojekte gezeigt.

Unter dem neuen Warenzeichen "lasertronic<sup>®</sup>" wurden schwerpunktmäßig intelligente Systeme unter Nutzung des Lasers gezeigt. Ein Roboter führte auf einer Station ein im IWS entwickeltes Hochleistungs-Strahlblenksystem vor, welches beispielsweise bei der Fa. Behr GmbH & Co. Stuttgart in der Serienproduktion von Abgaskühlern für Dieselmotoren eingesetzt wird.

Aller zwei Jahre, so auch im Jahr 2002, bildet die Oberflächentechnik einen Themenschwerpunkt der Hannover-Messe. Aus diesem Anlass präsentierte das IWS im Rahmen des VDI-Gemeinschaftsstandes "SurfPlaNet" auf einer 60 m<sup>2</sup> großen Fläche in der neuerbauten Halle 27 neueste Ergebnisse angewandter Forschung auf dem Gebiet der Oberflächentechnik. Gezeigt wurden diamantähnliche Kohlenstoffschichten Diamor<sup>®</sup> für Zerspanungs- und Umformwerkzeuge, das Laser-Akustik-Messgerät LAwave<sup>®</sup> zur Cha-

rakterisierung des E-Moduls dünner Schichten als weltweit einziges, kommerziell erhältliches laserakustisches Messgerät und die Verfahrenskombination des laserunterstützten Plasmaspritzens zur Erzeugung hafter 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.

Die Richtigkeit der Entscheidung, die Präsentationen des IWS auf der Hannover-Messe 2002 zu erweitern, wurde durch ca. 190 relevante Kundenkontakte bestätigt.

### Messe Optatec 2002 Frankfurt / M., 18. - 21. Juni 2002

Die Abteilung Röntgen- und EUV-Optik des IWS war dieses Jahr auf der 6. Optatec - Fachmesse für Optik und Optoelektronik vertreten. Im Mittelpunkt der Präsentation im Rahmen des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums "Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung" standen Röntgenspiegel und darauf basierende Systeme. Gesammelte Erfahrungen und Informationen auf der Messe bestätigten den realen Marktbedarf im Bereich der Röntgenoptiken.

### Messe Euro-Blech 2002 Hannover, 22. - 26. Oktober 2002

In diesem Jahr beteiligte sich das Fraunhofer IWS Dresden gemeinsam mit der Fa. ALOtec GmbH Dresden erstmals an der Internationalen Technologiemesse für Blechbearbeitung Euro-Blech 2002 in Hannover. Gezeigt wurden Anwendungsbeispiele zum Laserstrahlhärten und -schneiden sowie eine durchgängige Automatisierungslösung für das Schneiden, Paketieren und Fügen von Stahlblech-Ausschnitten nach dem Prinzip des LOM-Verfahrens (Laminated Object Manufacturing).

### Messe Glasstec 2002 Düsseldorf, 28. Oktober - 01. November 2002

Die neue Arbeitsgruppe Klebtechnik beteiligte sich zusammen mit dem Lehrstuhl Baukonstruktionslehre der TU Dresden dieses Jahr an der Internationalen Glasfachmesse in Düsseldorf. Im Mittelpunkt der Präsentation stand der Einsatz der Klebtechnik im konstruktiven Glasbau. Es wurden geklebte Hocker, Touchscreen-Terminals sowie Teile für einen Zeitungskiosk gezeigt. Auf der Messe wurden interessante Gespräche geführt sowie Kontakte vor allem zur mittelständigen Industrie geknüpft.

### Messe Denkmal 2002 Leipzig, 30. Oktober - 02. November 2002

Das Laserstrahlreinigen von kulturhistorisch wertvollen Objekten aus Holz und Stein wurde auf dieser europäischen Branchenmesse für Denkmalpflege und Stadterneuerung vorgestellt. Gezeigt wurde beispielsweise ein lasergereinigter barocker Fensterflügel der Burg Kriebstein (Sachsen), eine gemeinsame Arbeit mit dem Restaurator Karsten Püschner

(Hartmannsdorf / Sachsen). Gleichzeitig wurde das Buch "Laserstrahlreinigen von Naturstein", welches unter maßgeblicher Mitwirkung des Fraunhofer IWS Dresden entstand und vom Fraunhofer IRB-Verlag vertrieben wird, vorgestellt.

### Messe Euromold 2002 Frankfurt / M., 04 - 07. Dezember 2002

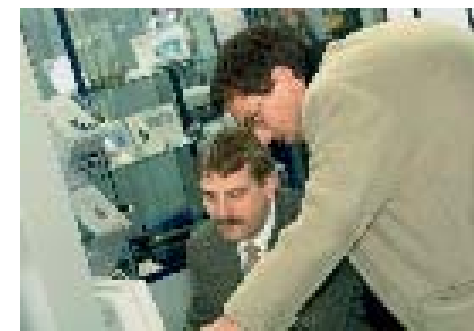
An der Branchenmesse zum Formen-, Modell- und Werkzeugbau sowie zur Gießereitechnik beteiligte sich das IWS bereits zum siebenten Mal. Es wurden Ergebnisse aus dem Projekt "MELATO" vorgestellt, welches das Ziel verfolgt, eine neue Prozesskette zur schnellen Fertigung von komplex geformten Werkzeugen von bis zu 1,5 m Kantenlänge zu entwickeln. Die gezeigten Prägewerkzeuge wurden nach dem Prinzip des LOM-Verfahrens (Laminated Object Manufacturing) hergestellt. Außerdem wurden Exponate zum 3D-Laser-Auftragschweißen gezeigt, welches zur Reparatur von Werkzeugen und zum Verschleißschutz eingesetzt werden kann. Es konnten viele neue Kontakte zu Anwendern aufgebaut werden.



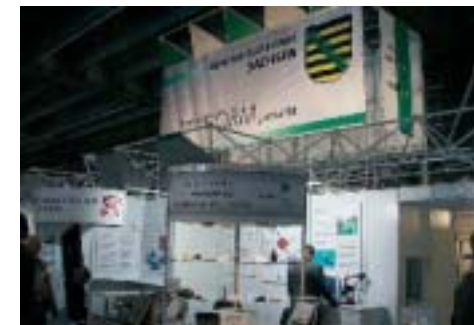
Präsentation des Fraunhofer IWS auf der Hannover-Messe 2002



Angeregte Diskussion zur Dünnschichttechnologie auf der Hannover-Messe 2002



Erfahrungsaustausch auf der Hannover-Messe 2002



Präsentation des IWS auf dem Gemeinschaftsstand "Sachsen" auf der Euromold 2002

Patentanmeldungen

- [P1]** E. Beyer, I. Jansen  
*"Verfahren zur Herstellung eines verstärkten Rohres oder Bleches"*  
 Anmelde-Az.: 102 21 880.3-14
- [P2]** E. Beyer, S. Nowotny, S. Scharek  
*"Method for Producing Shaped Bodies or Applying Coatings"*  
 Anmelde-Az.: US 10/110,423
- [P3]** S. Braun, H. Mai  
*"Optisches System mit einer Strahlungsquelle für elektromagnetische Strahlung im extremen ultravioletten Bereich und einem reflektierenden Element"*  
 Anmelde-Az.: 102 21 116.7-51
- [P4]** S. Braun, H. Mai  
*"Vorrichtung und Verfahren zur Ausbildung von Gradientenschichten auf Substraten in einer Vakuumkammer"*  
 Anmelde-Az.: 102 39 163.7
- [P5]** R. Dietsch, T. Holz  
*"Anordnung für röntgenanalytische Anwendungen"*  
 Anmelde-Az.: WO 02-065 481
- [P6]** R. Dietsch, H. Borrmann, T. Holz  
*"Erhöhung der nutzbaren monochromatischen Strahlintensität durch optimierte Kombination von Multischichtoptiken und geeigneter Strahlung einer Röntgenquelle"*  
 Anmelde-Az.: noch nicht vorhanden
- [P7]** T. Himmer  
*"Verfahren zum verzugsfreien Fügen von Blechen durch Laserstrahlschweißen"*  
 Anmelde-Az.: 102 11 511.7-34
- [P8]** T. Himmer, A. Uelze  
*"Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von Laminatbauteilen"*  
 Anmelde-Az.: 102 10 420.4-14
- [P9]** T. Himmer, A. Uelze  
*"Laminatbauteil oder Bauteil mit mindestens einem aus miteinander verbundenen Laminaten gebildeten Modul sowie ein Verfahren zu deren Herstellung"*  
 Anmelde-Az.: 102 14 055.3-16
- [P10]** T. Holz  
*"X-Ray Fluorescence Analysis Device"*  
 Anmelde-Az.: US 10/019,918
- [P11]** V. Hopfe, G. Mäder, D. Rogler, C. Schreuders  
*"Verfahren und Vorrichtung zur großflächigen Beschichtung von Substraten bei Atmosphärendruckbedingungen"*  
 Anmelde-Az.: 102 39 875.5
- [P12]** V. Hopfe, D. Rogler, G. Mäder  
*"Verfahren zum Hybrid-Plasma-CVD bei Atmosphärendruck"*  
 Anmelde-Az.: noch nicht vorhanden
- [P13]** C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe, H. Schulz  
*"Vorrichtung und Verfahren zur Separation von Partikeln von einem Target zur Beschichtung eines Substrates erzeugten Plasmas im Vakuum"*  
 Anmelde-Az.: 102 40 337.6-33
- [P14]** L. Morgenthal, D. Pollack, R. Gnann, A. van Spankeren  
*"Verfahren und Vorrichtung zur aktiven Sicherheits-Endlagen-Dämpfung für bewegte Maschinenteile, insbesondere von Hochgeschwindigkeitsmaschinen und insbesondere für die Vermeidung des Havariefalls, beispielsweise einer Kollision mit der Endlage"*  
 Anmelde-Az.: 102 34 403.5
- [P15]** L. Morgenthal, T. Schwarz, F. Kretzschmar, D. Pollack, S. Thalheim  
*"Online-Abstandsmessung bei der thermischen Bearbeitung von Werkstückoberflächen"*  
 Anmelde-Az.: noch nicht vorhanden
- [P16]** L. van Loyen, T. Böttger, S. Braun, H. Mai  
*"Schutz ausgewählter Flächen im Vakuum, vorzugsweise optischer Bauelemente, gegen Debris-Ablagerungen aus gepulsten Plasmen"*  
 Anmelde-Az.: 102 33 567.2-52
- [P17]** M. Weihnacht, P. Siemroth, V. Weihnacht, R. Kunze  
*"Akustisches Oberflächenwellenbauelement"*  
 Anmelde-Az.: 102 16 560.2

- [P18]** O. Zimmer, P. Siemroth, B. Schultrich, S. Schenk, B. Schuhmacher, U. Seifert, C. Hecht, R. Ekkehart  
*"Vorrichtung und Verfahren zum reaktiven Elektronenstrahlaufdampfen von reaktiv gebildeten Schichten auf Substraten"*  
 Anmelde-Az.: 102 28.925.5-45
- [P19]** A. Zwick, B. Schumacher, M. Meurer, R. Leuschner  
*"Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von schmelztauchbeschichteten Stählen"*  
 Anmelde-Az.: noch nicht vorhanden

Patenterteilungen

- [P20]** J. Berthold, T. Witke, P. Siemroth  
*"Vacuum Arc Evaporator"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 361 663 B1
- [P21]** E. Beyer, R. Imhoff  
*"Method and Device for Processing Components; in which a Molten Phase is Produced by Local Energy Input"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 423 921 B2
- [P22]** E. Beyer, J. Hauptmann, G. Wiedemann  
*"Vorrichtung und Verfahren zur Oberflächenstrukturierung von verlegten Fußbodenbelägen"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 198 16 442 C2 und EP 1 071 536 B1
- [P23]** E. Beyer, S. Bonß, J. Standfuß  
*"Method and Device for Laser Beam Welding"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 444 947 B1
- [P24]** B. Brenner, A. Wetzig, D. Naunapper, C. Duscheck  
*"Wear-resistant Camshaft and Method of Producing the Same"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 398 881 B1
- [P25]** B. Brenner, F. Tietz  
*"Verfahren zur Erzeugung verschleißbeständiger Randschichten an ausscheidungshärtbaren Werkstoffen"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 100 30 433 C2

- [P26]** B. Brenner, S. Bonß, H.-J. Scheibe, H. Ziegele  
*"Verschleißbeständiger, mechanisch hochbelastbarer und reibungsarmer Randschichtaufbau für Titan und / oder seine Legierungen sowie Verfahren zu seiner Herstellung"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: EP 1 032 721 B1
- [P27]** B. Brenner, R. A. Gnann, D. Naunapper, C. Duscheck  
*"Method for Beam Welding of Hardenable Steels by Means of Short-Time Heat Treatment"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 365 866 B1
- [P28]** B. Brenner, R. A. Gnann, S. Bonß  
*"Vorrichtung zum Gaslegieren von Titan und seinen Legierungen"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: EP 0 829 325 B1
- [P29]** B. Brenner, S. Bonß, H.-J. Scheibe, H. Ziegele  
*"Wear-resistant, Mechanically High Stressed and Low-friction Boundary Coating Construction for Titanium or the Alloys There of and a Method for Producing the Same"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 410 125 B1
- [P30]** V. Fux, A. Uelze  
*"Verfahren zur Hochgeschwindigkeitsbeschichtung von Bauteilen und Werkstücken sowie mögliche Vorrichtung zur Hochgeschwindigkeitsbeschichtung von Bauteilen und Werkstücken"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 195 13 919 C2
- [P31]** T. Holz  
*"Röntgenoptische Anordnung zur Erzeugung einer parallelen Röntgenstrahlung"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 100 28 970 C2
- [P32]** C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe, B. Schultrich, H. Ziegele  
*"Verfahren und Vorrichtung zur Beschichtung von Substraten im Vakuum"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: EP 1 117 852 B1
- [P33]** S. Nowotny, R. Zieris, T. Naumann, G. Eckart  
*"Vorrichtung zur Beschichtung eines Substrates mit einem Plasmabrenner"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 100 65 629 C1

- [P34]** H.-J. Scheibe, C.-F. Meyer  
*"Elektromechanisch regelbares elektrisches Widerstandselement"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 100 58 581 C1
- [P35]** H.-J. Scheibe, C.-F. Meyer, M. Schwach, B. Seidel, G. Bärwald, J. Marx, A. Störk  
*"Testflasche und Verfahren zu ihrer Herstellung"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 199 46 080 C2
- [P36]** T. Sievers, U. Stürmer, G. Wiedemann  
*"Non-slip floor covering and process of producing it"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 434 897 B1
- [P37]** U. Stöckert, J. Kirchberg, S. Rochler, G. Wiedemann  
*"Verfahren und Vorrichtung zur Erhöhung der Griffigkeit von bitumengebundenen Straßenoberflächen, bestehend aus mindestens einem Bindemittel und mineralischen Bestandteilen"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 197 38 928 C2
- [P38]** H.-J. Weiß  
*"Verfahren zur Herstellung von hydrophoben bis hydrophilen Oberflächen"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 101 24 076 C1

Gebrauchsmuster

- [P39]** A. Klotzbach, L. Morgenthal, D. Pollack  
*"Vorrichtung zur Ausbildung eines Airbagöffnungsbereiches"*  
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 298 24 808.5

Marken

- [P40]** "Nanofair"  
 Anmelde-Az.: DE 302 14 253.3/42



- [L01]** H. Balke, H.-A. Bahr, A. S. Semenov, I. Hofinger, C. Häusler, G. Kirchhoff, H.-J. Weiß  
*"Graded Thermal Barrier Coatings: Cracking Due to Laser Irradiation and Determining of Interface Toughness"*  
 Proc. of the 6th International Symposium on Functionally Graded Materials (2002), S. 205-212
- [L02]** L.-M. Berger  
*"Hardmetal Compositions for the Preparation of Thermally Sprayed Coatings"*  
 European Conference on Hard Materials and Diamond Tooling (2002), S. 202-208
- [L03]** L.-M. Berger, W. Gruner  
*"Investigation of the Effect of a Nitrogen-Containing Atmosphere on the Carbothermal Reduction of Titanium Dioxide"*  
 International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 20 (2002) 3, S. 235-251
- [L04]** L.-M. Berger, W. Gruner  
*"Synthesis of Carbides and Carbonitrides by Carbothermal Reduction with Oxide Intermediates of Low Volatility"*  
 European Conference on Hard Materials and Diamond Tooling (2002), S. 52-57
- [L05]** L.-M. Berger, S. Thiele, P. Vuoristo, T. Mäntylä, H. Keller, E. Proß, R. Scholl  
*"Titanium Carbide-Based Powders and Coatings - Compositions, Processability and Properties"*  
 ITSC 2002 - International Thermal Spray Conference (2002), S. 727-732
- [L06]** E. Beyer, B. Brenner, A. Klotzbach  
*"Laser Hybrid Processes and Laser Remote Welding in Automotive Industry"*  
 ALAW 2002 - 10th Annual Automotive Laser Applications Workshop (2002), S. 4-31
- [L07]** E. Beyer, G. Wiedemann, H. Wust  
*"Modifikation von Holzoberflächen durch Laserstrahlen"*  
 Die Holzbearbeitung (HOB) 49 (2002) 3, S. 103-108
- [L08]** S. Bonß, M. Seifert, G. Göbel, E. Hensel  
*"Selektives Härten von Bauteiloberflächen mit Hochleistungslaser"*  
 Bulletin des Schweizerischen Verband für die Wärmebehandlung der Werkstoffe (2002) Mai
- [L09]** S. Braun, R. Dietsch, T. Foltyn, T. Holz, H. Mai, M. Moss, D. Weißbach, A. Leson  
*"High-Precision nm-Multilayers for EUV and X-ray Optical Applications"*  
 Proceedings of Nanofair - VDI-Band (2002)
- [L10]** S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson  
*"Mo/Si Multilayer with Different Barrier Layers for Applications as Extreme Ultraviolet Mirrors"*  
 Japanese Journal of Applied Physics - Part 1, 41 (2002) 6 B, S. 4074-4081
- [L11]** S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson  
*"Microstructure of Mo/Si Multilayers with Barrier Layers"*  
 Proceedings of SPIE 4782 (2002), S. 185-195
- [L12]** B. Brenner, J. Standfuß, U. Stamm, B. Winderlich  
*"Laser Induction Welding - A New Technology for Welding of Powertrain Components"*  
 EALA 2002 - European Automotive Laser Application - 3rd European Conference and Exhibition (2002), S. 367-398
- [L13]** R. Dietsch, T. Holz, D. Weißbach, R. Scholz  
*"Large Area PLD of Nanometer-Multilayers"*  
 Applied Surface Science 197-198 (2002), S. 169-174
- [L14]** R. Dietsch, S. Braun, T. Holz, A. Leson  
*"Application of Nanometer-Multilayer Optics for X-Ray Analysis"*  
 Proceedings of Nanofair - VDI-Band (2002)
- [L15]** V. Fleischer  
*"Interaktiver Bahnplaner für gekoppelte Bewegungssysteme mit Industrierobotern"*  
 Robotik 2002: Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends - VDI-Bericht 1679 (2002), S. 473-477
- [L16]** P. Gawlitza, T. Sebold, A. Leson, H. Mai, M. Bobeth, W. Pompe, S. Beyer  
*"Maßgeschneiderte Innenbeschichtung von Bauteilen mittels Puls Laser Deposition"*  
 Vakuum in Forschung und Praxis 14 (2002) 1, S. 22-28
- [L17]** G. Göbel, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer  
*"Computational Process Parameter Optimization for Laser Beam Transformation Hardening"*  
 ICALEO 2002 - Laser Materials Processing Conference, Section B: Surface Modification (2002)
- [L18]** A. Groth, C. Walz, S. Nägeler  
*"New Innovations in Diode Laser Cladding"*  
 ICALEO 2002 - Laser Materials Processing Conference, Section C: Sensing Monitoring and Modeling (2002)
- [L19]** K. Hasche, G. Ulm, K. Herrmann, M. Krumrey, G. Ade, J. Stümpel, I. Busch, P. Thomsen-Schmidt, S. Schädlich, A. Schindler, W. Frank, M. Procop, U. Beck  
*"Film Thickness Standards on the Nanometer Scale"*  
 Proceedings of the 3rd International Conference EUSPEN (2002), S. 549-552
- [L20]** K. Hasche, K. Herrmann, P. Thomson-Schmidt, M. Krumrey, G. Ulm, G. Ade, F. Pohlenz, J. Stümpel, I. Busch, S. Schädlich, W. Frank, D. Hirsch, A. Schindler, M. Procop, U. Beck  
*"Ein Beitrag zu kalibrierten Nanometerschichten für unterschiedliche Anwendungsbereiche"*  
 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (2002) S. 568-569
- [L21]** T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer  
*"Recent Developments in Metal Laminated Tooling by Multiple Laser Processing"*  
 13th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium (2002), S. 466-473
- [L22]** V. Hopfe  
*"Laser CVD - Status und industrielles Potential für Faserbeschichtung"*  
 Vakuum in Forschung und Praxis 14 (2002) 4, S. 206-212
- [L23]** V. Hopfe, D. W. Sheel, W. Grähler, D. Raisbeck, J. M. Rivero, O. Throl  
*"Prozessüberwachung industrieller CVD-Beschichtungsanlagen mittels NIR-DLS- und FTIR Sensorik"*  
 Anwendungen und Trends in der Optischen Analysenmesstechnik - VDI-Bericht 1667 (2002), S. 111-118
- [L24]** V. Hopfe, D. W. Sheel, C. I. M. A. Spee, R. Tell, P. Martin, A. Beil, M. Pemple, R. Weiss, U. Vogt, W. Grähler  
*"In-situ Monitoring for CVD Processes"*  
 Proc. of the 4th International Conference on Coatings on Glass (4th ICCG) (2002), S. 261-268
- [L25]** K. Jannasch, P. Siemroth  
*"Konstruktive Entwicklung einer industriell einsetzbaren Filter-HCA-Quelle für superharte Nanometer-Kohlenstoffschichten"*  
 Wissenschaftliche Beiträge - Forschung, Lehre, Technologietransfer (2002) 2, S. 35-42
- [L26]** J. Kaspar, A. Luft, S. Bonß, B. Brenner  
*"Untersuchung der Mikrostruktur der Legierung Ti6Al4V nach dem Lasergasnitrieren mit unterschiedlichen Stickstoffgehalten"*  
 Nitrieren - Stickstoff im Randgefüge metallischer Werkstoffe (2002), S. 207-216
- [L27]** J. Kaspar, A. Luft, S. Bonß, B. Winderlich, B. Brenner  
*"Mikrostrukturelle Charakterisierung eigenschaftsdegradierender Mechanismen während der Schnellerwärmung und -abkühlung beim Lasergaslegieren von Titanwerkstoffen"*  
 Kurzzeitmetallurgie (2002) S. 153-162
- [L28]** K. Klotz, H.-A. Bahr, H. Balke, T. Göbel, S. Menzel, U. Bahr, G. Kirchhoff, K. Wetzig  
*"Creep Analysis and Laser-Induced Cracking in (Ti,Al)N Coatings"*  
 Thin Solid Films 413 (2002) 1-2, S. 131-138
- [L29]** A. Klotzbach, V. Fleischer, T. Schwarz, L. Morgenthal, E. Beyer  
*"Robotic Remote Laser Welding with High Power Nd:YAG Laser"*  
 Industrial Laser Solution for Manufacturing 17 (2002) 7, S. 15-18
- [L30]** U. Klotzbach, M. Panzner, J. Kaspar, H. Wust, T. Kuntze, V. Franke, E. Beyer  
*"Processing of Silicon by Nd:YAG-lasers with Harmonics Generations"*  
 ICALEO 2002 - Laser Materials Processing Conference, Section A: Welding (2002)
- [L31]** T. Kuntze, M. Panzner, U. Klotzbach, E. Beyer  
*"Laser Marking of Materials by Means of Micro Mirror Array"*  
 ICALEO 2002 - Laser Materials Processing Conference, Section A: Welding
- [L32]** H.-G. Kusch  
*"Gesundheits- und Arbeitsschutz"*  
 Laserstrahlreinen von Naturstein (2002) Kapitel 7, S. 117-131
- [L33]** S. Lehnicke, B. Löffelbein, O. Zimmer, M. Fütting, T. Burkhardt, D. Grimme, C. Gärtner, S. Piltz  
*"Fertigung von Mikrokomponenten aus Glas"*  
 ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 5, S. 238-243
- [L34]** D. Lepski, G. Mollath, B. Szyszka, S. Völlmar  
*"Simulation komplexer oberflächentechnischer Produktionsprozesse"*  
 JOT - Journal für Oberflächentechnik 42 (2002) 1, S. IV-VIII
- [L35]** A. Leson  
*"Nanotechnologie - The New Definition of Thin"*  
 Saxonmail (2002) 4, S. 6
- [L36]** A. Leson  
*"Die Zukunft schleicht näher ..."*  
 Elektronik Journal 36 (2002) Juni, S. 22
- [L37]** A. Leson  
*"Nanotechnologie - Realität und Science-Fiction"*  
 Technica 51 (2002), 21, S. 14-15
- [L38]** A. Leson  
*"Nanometerschichtsysteme für Röntgenoptiken"*  
 Drittes Fachforum Nanotechnologie: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung (2002), S. 25-37
- [L39]** A. Mahrle, J. Schmidt  
*"Numerical Investigation of Transport Phenomena in the Fusion Zone of Laser Beam Welded Joints"*  
 Numerical Heat Transfer, Part A: Applications 41 (2002) 6-7, S. 629-642
- [L40]** A. Mahrle, J. Schmidt  
*"The Influence of Fluid Flow Phenomena on the Laser Beam Welding Process"*  
 International Journal of Heat and Fluid Flow 23 (2002) 3, S. 288-297
- [L41]** A. Njeh, T. Wieder, D. Schneider, H. Fuess, M. H. Ben Ghazlen  
*"Surface Wave Propagation in Thin Silver Films under Stress"*  
 Zeitschrift für Naturforschung A 57 a (2002) 1-2, S. 58-64
- [L42]** S. Nowotny  
*"Laserstrahl-Auftragschweißen - Präzision für Oberflächenschutz und Instandsetzung"*  
 DVS-Jahrbuch Schweißtechnik 2002 (2002), S. 126-135
- [L43]** S. Nowotny  
*"Beschichten, Reparieren und Generieren durch Präzisions-Auftragschweißen mit Laserstrahlen"*  
 Vakuum in Forschung und Praxis 14 (2002) 1, S. 33-37
- [L44]** S. Nowotny, T. Himmer, A. Techel, E. Beyer  
*"Recent Developments in Laminated Tooling by Multiple Laser Processing"*  
 ICALEO 2002 - Laser Materials Processing Conference, Section D: Laser Systems and Applications (2002)
- [L45]** S. Nowotny, S. Scharek, T. Naumann, R. Zieris, E. Beyer  
*"Laser Based Hybrid Techniques for Surface Coatings"*  
 ICALEO 2002 - Laser Materials Processing Conference, Section B: Surface Modification (2002)
- [L46]** S. Nowotny, R. Zieris, T. Naumann  
*"Effiziente Flächenbeschichtungen durch laserunterstütztes atmosphärisches Plasmaspritzen (LAAPS)"*  
 Stahl (2002) 6, S. 43-45

- [L47]** M. Panzner, J. Kaspar, H. Wust, U. Klotzbach, E. Beyer  
*“Processing of Silicon by Nd:YAG-lasers with Harmonics Generation”*  
 Photon Processing in Microelectronics and Photonics - Proc. of the SPIE 4637 (2002), S. 496-504
- [L48]** M. Procop, M. Radtke, M. Krumrey, K. Hasche, S. Schädlich, W. Frank  
*“Electron Probe Microanalysis (EPMA) Measurement of Thin-Film Thickness in the Nanometer Range”*  
 Analytical and Bioanalytical Chemistry 374 (2002), S. 631-634
- [L49]** R. Riegert, T. Schülke  
*“Introduction to Laser-Activated Surface Waves (LAwave®)”*  
 Vacuum Technology & Coating (2002) Juni, S. 26-32
- [L50]** D. Schneider  
*“Laserakustik zur Schicht- und Oberflächenprüfung”*  
 Photonik 34 (2002) 3, S. 38
- [L51]** D. Schneider, P. Siemroth, T. Schülke, J. Berthold, B. Schultrich, H.-H. Schneider, R. Ohr, B. Petereit, H. Hilgers  
*“Quality Control of Ultra-Thin and Super-Hard Coatings by Laser-Acoustics”*  
 Surface and Coatings Technology 153 (2002) 2-3, S. 252-260
- [L52]** D. Schneider, E. Stiehl, R. Hammer, A. Franke, R. Riegert, T. Schuelke  
*“Nondestructive Testing of Damage Layers in Semiconductor Materials by Surface Acoustic Waves”*  
 Design, Process Integration, and Characterization for Microelectronics - Proc. of the SPIE 4692 (2002), S. 195-211
- [L53]** B. Schultrich  
*“Superharte Kohlenstoffschichten durch Nanometer-Schichtdesign”*  
 Drittes Fachforum - Nanotechnologie: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung (2002), S. 39-62
- [L54]** P. Siemroth  
*“Superharte Kohlenstoffschichten zum Schutz von Festplatten”*  
 Photonik 34 (2002) 3, S. 38-39
- [L55]** H. Stiele, B. Brenner  
*“Kombinierte Wärmebehandlung Laser - Induktionserwärmung”*  
 Stahl (2002) 6, S. 40-42
- [L56]** T. Stucky  
*“Superharte Schichten”*  
 Ingenieurforum Westfalen-Ruhr (2002) 2, S. 4-6
- [L57]** F. Vaz, S. Carvalho, L. Rebouta, M. Z. Silva, A. Paul, D. Schneider  
*“Young’s Modulus of (Ti,Si)N Films by Surface Acoustic Waves and Indentation Techniques”*  
 Thin Solid Films 408 (2002) 1-2, S. 160-168
- [L58]** O. Velde, A. Techel, R. Grundmann  
*“Suppression of the Development of Pores During Laser-Induced Surface Dispersion of TiC into Aluminium, by Means of a Static Magnetic Field”*  
 Surface and Coatings Technology 150 (2002) 2-3, S. 170-176
- [L59]** P. Vuoristo, A. Määttä, T. Mäntylä, L.-M. Berger, S. Thiele  
*“Properties of Ceramic Coatings Prepared by HVOF and Plasma Spraying from Titanium Suboxide Powders”*  
 ITSC 2002 - International Thermal Spray Conference (2002), S. 488-493
- [L60]** G. Wiedemann, H.-G. Kusch  
*“Der Laserstrahl als Werkzeug für den Restaurator”*  
 Laserstrahlreinigung von Naturstein (2002) Kapitel 3, S. 25-44
- [L61]** H. Wust, E. Beyer, G. Wiedemann, M. Panzner, P. Haller  
*“Experimental Study of the Effect of a Laser Beam on the Morphology of Wood Surfaces”*  
 Wood Based Materials (2002), S. 83-91
- [L62]** H. Wust, E. Beyer, G. Wiedemann, M. Panzner, P. Haller  
*“Experimental Study of the Effect of a Laser Beam on the Morphology of Wood Surfaces”*  
 1st International Conference on the European Society for Wood Mechanics (2002)
- [L63]** H. Wust, E. Beyer, G. Wiedemann, M. Panzner, P. Haller  
*“Experimental Study of the Effect of a Laser Beam on the Morphology of Wood Surfaces”*  
 1st European Wood Conference (2002)
- [L64]** H. Wust, B. Wantzen  
*“Schonende Oberflächenbehandlung von Holz durch Laser”*  
 Laser Magazin (2002) 3, S. 36
- [T01]** L.-M. Berger, W. Gruner  
*“Synthesis of Carbides and Carbonitrides by Carbothermal Reduction with Oxide Intermediates of Low Volatility”*  
 European Conference on Hard Materials and Diamond Tolling - EURO PM 2002, Lausanne (Schweiz), 07.-09. Oktober 2002
- [T02]** L.-M. Berger, S. Thiele, P. Vuoristo, T. Mäntylä, H. Keller, E. Proß, R. Scholl  
*“Titanium Carbide-Based Powders and Coatings - Compositions, Processability and Properties”*  
 International Thermal Spray Conference and Exposition - ITSC 2002, Essen, 04.-06. März 2002
- [T03]** E. Beyer  
*“Laserbearbeitungsverfahren”*  
 Ringvorlesung des Materialforschungsverbundes Dresden e. V. MFD, Dresden, 16. Januar 2002
- [T04]** E. Beyer  
*“Laserreinigen von Kulturdenkmälern”*  
 Industriestammtisch des Bundesverbandes mittelständischer Wirtschaft BVMW, Dresden, 06. März 2002
- [T05]** E. Beyer  
*“Lasergestützte Verfahren im Leichtbau”*  
 High-Tech-Tagung "Neue Materialien - Funktionswerkstoffe", Würzburg, 19. April 2002
- [T06]** E. Beyer  
*“EUV and X-Ray Wavelengths for Future Applications”*  
 International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALOE 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T07]** E. Beyer, S. Bonß, S. Nowotny  
*“Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern”*  
 Laser-Anwenderforum LAF, Bremen, 13. September 2002
- [T08]** E. Beyer, B. Brenner, A. Klotzbach  
*“Laser Hybrid Processes and Laser Remote Welding in Automotive Industry”*  
 10th Annual Automotive Laser Application Workshop - ALAW 2002, Dearborn (USA), 12.-13. März 2002
- [T09]** E. Beyer, C. Walz  
*“Laser Applications for Automotive Powertrain Components”*  
 Global Powertrain Congress (GPC), Ann Arbor (USA), 24. September 2002
- [T10]** S. Bonß  
*“Härten mit Dioden- und CO<sub>2</sub>-Laser”*  
 Workshop "Oberflächenbearbeitung mit Laserstrahlung", Berlin, 29. November 2002
- [T11]** S. Bonß, E. Beyer  
*“New Developments in High Power Diode Laser Welding”*  
 TransLAS-Workshop "New Laser Welding Methods", Turin (Italien), 05.-06. November 2002
- [T12]** S. Bonß, G. Göbel, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer  
*“Fast and Innovative Determination of Parameters for Steel Hardening with High Power Diode Lasers”*  
 International Congress on Laser Advanced Materials Processing - LAMP 2002, Osaka (Japan), 27.-31. Mai 2002
- [T13]** S. Braun  
*“Morphologie und Reflektivität von Mo/Si-Multischichten mit und ohne Diffusionsbarrieren”*  
 Institutsseminar des Institutes für Kristallographie und Festkörperphysik, Dresden, 11. Juni 2002
- [T14]** S. Braun  
*“Herstellung von nm-Multilagenschichten mittels PLD und MSD”*  
 Institutsseminar des Institutes für Oberflächenmodifizierung e.V., Leipzig, 12. Dezember 2002
- [T15]** S. Braun, R. Dietsch, T. Foltyn, T. Holz, H. Mai, M. Moss, D. Weißbach, A. Leson  
*“High-Precision nm-Multilayers for EUV and X-Ray Optical Applications”*  
 Nanofair 2002, Strasbourg (Frankreich), 25.-26. November 2002
- [T16]** S. Braun, R. Dietsch, T. Holz, H. Mai, M. Moss, D. Weißbach  
*“Präzisionsabscheidung von nm-Multischichten für Optiken im Röntgen- und EUV-Bereich”*  
 Konferenz NanoDE, Bonn, 06.-07. Mai 2002
- [T17]** S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson  
*“Reflectivity and Morphology of Mo/Si multilayers with B<sub>4</sub>C and C Barrier Layers”*  
 6th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures (PXRMS), Chamonix (Frankreich), 03.-07. März 2002
- [T18]** S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson  
*“Microstructure of Mo/Si Multilayers with Barrier Layers”*  
 International Symposium on Optical Science and Technology - SPIE's 47th Annual Meeting, Seattle (USA), 07.-11. Juli 2002
- [T19]** B. Brenner  
*“Beanspruchungsgerechte Randschichtveredlung von Bauteilen durch Laserbehandlung”*  
 543. DECHEMA-Kolloquium "Optimierung von Werkstoffoberflächen durch Randschichtbehandlung und Beschichtung", Frankfurt/Main, 07. Februar 2002
- [T20]** B. Brenner  
*“Verbesserte Fertigungsmöglichkeiten in der Automobilindustrie durch neuartige Laserstrahlschweißtechnologien”*  
 Fachtagung "Lasertechnologie im Automobilleichtbau", Zwickau, 25. April 2002
- [T21]** B. Brenner  
*“Laserhybridtechnologien in Forschung und Anwendung”*  
 3. Jenaer Laserworkshop, Jena, 28.-29. November 2002
- [T22]** B. Brenner  
*“Laserrandschichtveredlung - Vom Werkstoff zur Anwendung”*  
 Werkstoff-Kolloquium, Bremen, 14. Mai 2002
- [T23]** B. Brenner, J. Standfuß, U. Stamm, B. Winderlich  
*“Laser Induction Welding - A New Technology for Welding of Powertrain Components”*  
 EALA 2002 - 3rd European Automotive Laser Application, Bad Nauheim, 29.-30. Januar 2002



- [T24]** B. Brenner, J. Standfuß, U. Stamm, B. Winderlich, E. Beyer  
*"New Laser Welding Technologies for Joining of Advanced Power Train Components"*  
 International Congress on Laser Advanced Materials Processing - LAMP 2002, Osaka (Japan) 27.-31. Mai 2002
- [T25]** R. Dietsch, C. Baerlocher, T. Holz  
*"X-Pointer and Beam Compressor - High Brilliance Collimating Monochromator Systems for Intense sub-mm X-Ray Spots"*  
 51st Annual Denver X-Ray Conference, Colorado Springs (USA), 29. Juli - 02. August 2002
- [T26]** R. Dietsch, A. Baranov, S. Braun, P. Gawlitza, T. Holz, M. Menzel, B. Schultrich, D. Weißbach, R. Scholz, J. Schreiber  
*"Pulsed Laser Deposition of Carbon/Carbon Multilayers"*  
 12th International Conference on Thin Films - ICTF'12, Bratislava (Slowakei), 15.-20. September 2002
- [T27]** R. Dietsch, A. Baranov, T. Holz, M. Menzel, D. Weißbach, R. Scholz, V. Melov, J. Schreiber  
*"High Resolution Carbon/Carbon Multilayers"*  
 International Symposium on Optical Science and Technology - SPIE's 47th Annual Meeting, Seattle (USA), 07.-11. Juli 2002
- [T28]** R. Dietsch, S. Braun  
*"Nanometer-Multischichten für die Röntgenoptik - Herstellung und Anwendung"*  
 Konferenz NanoDE, Bonn, 06.-07. Mai 2002
- [T29]** R. Dietsch, S. Braun, T. Holz, A. Leson  
*"Application of Nanometer-Multilayer Optics for X-Ray Analysis"*  
 Nanofair 2002, Strasbourg (Frankreich), 25.-26. November 2002
- [T30]** R. Dietsch, S. Braun, T. Holz, D. Weißbach, L. Brügemann  
*"Multilayer Optics for X-ray Analysis"*  
 Analytical X-ray for Industry and Science (AXAA 2002), Newcastle (England), 11.-15. Februar 2002
- [T31]** V. Fleischer, V. Flemming, L. Morgenthal, E. Beyer  
*"Interaktiver Bahnplaner für gekoppelte Bewegungssysteme mit Industrierobotern"*  
 Robotik, Ludwigsburg, 19.-20. April 2002
- [T32]** P. Gawlitza  
*"Herstellung von ZrO<sub>2</sub>-Wärmedämmschichten für Brennkammern mittels Pulsed Laser Deposition (PLD)"*  
 Institutsseminar des Institutes für Kristallographie und Festkörperphysik, Dresden, 15. Oktober 2002
- [T33]** P. Gawlitza, H. Mai, T. Sebald, S. Beyer, W. Pompe, M. Bobeth  
*"Synthesis of Protective Coatings for Combustion Chambers by Pulsed Laser Deposition"*  
 Materials Week 2002, München, 30. September - 02. Oktober 2002
- [T34]** G. Göbel, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer  
*"Computational Process Parameter Optimization for Laser Beam Transformation Hardening"*  
 International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T35]** K. Hasche, K. Herrmann, P. Thomsen-Schmidt, M. Krumrey, G. Ulm, G. Ade, F. Pohlenz, J. Stümpel, I. Busch, S. Schädlich, W. Frank, D. Hirsch, A. Schindler, M. Procop, U. Beck  
*"Ein Beitrag zu kalibrierten Nanometerschichten für unterschiedliche Anwendungsbereiche"*  
 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 23.-26. September 2002
- [T36]** K. Hasche, G. Ulm, K. Herrmann, M. Krumrey, G. Ade, J. Stümpel, I. Busch, P. Thomsen-Schmidt, S. Schädlich, A. Schindler, W. Frank, M. Procop, U. Beck  
*"Film Thickness Standards on the Nanometer Scale"*  
 ASPE 17th Annual Meeting, St. Louis (USA), 20.-25. Oktober 2002
- [T37]** T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer  
*"New Developments in Surface Technology and Prototyping"*  
 International Congress on Laser Advanced Materials Processing - LAMP 2002, Osaka (Japan), 27.-31. Mai 2002
- [T38]** T. Holz  
*"Spiegel und optische Systeme für Röntgenreflektometrie und Diffraktometrie"*  
 Institutsseminar des Institutes für Kristallographie und Festkörperphysik, Dresden, 07. Mai 2002
- [T39]** T. Holz, R. Dietsch, C. Baerlocher  
*"X-Pointer - A High Brilliance Collimation Mo Ka Monochromator"*  
 European Conference on Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDXRS), Berlin, 16.-21. Juni 2002
- [T40]** V. Hopfe  
*"In-situ Monitoring for CVD Processes"*  
 4th International Conference on Coating on Glass (4th ICCG), Braunschweig, 03.-07. November 2002
- [T41]** R. Jäckel  
*"Deposition of Thin Carbon Films and of Multilayers - Two Examples of the Center of Competence Ultrathin Functional Films"*  
 German-Israeli Symposium in Materials Research, Nanomaterials and Nanochemistry, Karlsruhe, 19. Februar 2002
- [T42]** J. Kaspar, A. Luft, S. Bonß, B. Brenner  
*"Untersuchungen der Mikrostruktur der Legierung Ti6Al4V nach dem Lasergasnitrieren mit unterschiedlichen Stickstoffgehalten"*  
 AWT-Tagung "Nitrieren - Stickstoff am Randgefüge metallischer Werkstoffe", Aachen, 10.-12. April 2002
- [T43]** J. Kaspar, A. Luft, S. Bonß, B. Winderlich, B. Brenner  
*"Mikrostrukturelle Charakterisierung eigenschaftsdegradierender Mechanismen während der Schnellerwärmung und -abkühlung beim Laserstrahlschweißen und Lasergaslegieren von Titanwerkstoffen"*  
 DFG-Kolloquium Schwerpunktprogramm "Kurzzeitmetallurgie", Bremen, 09.-10. Oktober 2002
- [T44]** A. Klotzbach, S. Nägeler, L. Morgenthal, V. Fleischer, E. Beyer  
*"Coupled Axes Systems (CAS) for Remote Laser Welding"*  
 10th Annual Automotive Laser Applications Workshop - ALAW 2002, Dearborn (USA), 12.-13. März 2002
- [T45]** U. Klotzbach, M. Panzner, T. Kuntze, H. Wust, E. Beyer  
*"Processing of Silicon by Nd:YAG Lasers with Harmonics Generation"*  
 International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T46]** H. Kötter, E. Beyer  
*"Lasertechnik für die Produktion"*  
 Lehrveranstaltungsreihe "Produktion im 21. Jahrhundert", Dresden, 14. Mai 2002
- [T47]** D. Lepski, H. Eichler, V. Fux, S. Scharek, E. Beyer  
*"Simulation of the Powder Injection Laser Beam Cladding Process"*  
 International Conference "THE" Coatings in Manufacturing Engineering and EUREKA Partnering Event, Thessaloniki (Griechenland), 28.-29. November 2002
- [T48]** A. Leson  
*"Nano Goes PowTech"*  
 Internationale Fachpressekonferenz der Messe Nürnberg, Nürnberg, 09. Oktober 2002
- [T49]** A. Leson  
*"Nanotechnologie - Realität und Science-Fiction"*  
 Fachpresstag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 31. Januar 2002
- [T50]** A. Leson  
*"Nanometer Film Systems - Manufacturing and Applications"*  
 University of Sao Paulo, Sao Paulo (Brasilien), 04. März 2002
- [T51]** A. Leson  
*"Nanometer Films Systems - Cooperation within the Center of Competence"*  
 University of Pernambuco, Recife (Brasilien), 07. März 2002
- [T52]** A. Leson  
*"Nanometer-Schichtsysteme für Röntgenoptiken"*  
 Nanotechnologie - Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung, Regensburg, 22. Oktober 2002
- [T53]** A. Leson  
*"Resume of the Conference and Concluding Remarks"*  
 Nanofair 2002, Strasbourg (Frankreich), 25.-26. November 2002
- [T54]** A. Leson  
*"Cooperation within a Center of Competence on Nanotechnology"*  
 Czech-Slovak-German Joint Meeting, Prague, 05. Dezember 2002
- [T55]** L. van Luyen  
*"Konzeption und Erprobung eines Labor-Reflektometersystems für Röntgenoptiken (SX-Reflektometer)"*  
 Carl Zeiss SMT AG - Statusreport, Oberkochen, 23. Januar 2002
- [T56]** A. Mahrle  
*"Simulation der lokalen Temperaturverteilung beim Laserstrahlieferschweißen"*  
 Institutsseminar des Fraunhofer Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Dresden, März 2002
- [T57]** H. Mai, S. Braun  
*"Der Sputterprozess und seine Anwendung zur Synthese von Nanometer-Multischichten"*  
 Workshop "Sputtertargets für die Dünnschichttechnik" am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Dresden, 26. September 2002
- [T58]** S. Nowotny, E. Beyer  
*"Increased Efficiency for Large Area Coatings by Laser/Plasma Hybrid Spraying"*  
 8th International Conference on Plasma Surface Engineering - PSE 2002 Garmisch-Partenkirchen, 09.-13. September 2002
- [T59]** S. Nowotny, T. Himmer, A. Techel, E. Beyer  
*"Recent Developments in Laminated Tooling by Multiple Laser Processing"*  
 International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T60]** S. Nowotny, A. Richter, R. Zieris, E. Beyer  
*"Using Lasers for the Production of Ceramic Coatings"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002
- [T61]** S. Nowotny, S. Scharek, T. Naumann, R. Gnann, T. Heptner, E. Beyer  
*"Laserstrahl-Auftragschweißen zum Oberflächenschutz, Reparieren und Generieren"*  
 Laser Workshop Jena, Jena, 28.-29. November 2002
- [T62]** S. Nowotny, S. Scharek, R. Zieris, T. Naumann, E. Beyer  
*"Laser Based Hybrid Techniques for Surface Coating"*  
 International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T63]** S. Nowotny, R. Zieris, T. Naumann, K. Nassenstein, E. Beyer  
*"Laser/Plasma-Hybridtechnik zum Erzeugen dichter, flächenhafter Beschichtungen"*  
 International Thermal Spray Conference and Exposition - ITSC 2002, Essen, 04.-06. März 2002
- [T64]** F. Papa, C. Engdahl, M. Becker, T. Schülke  
*"The Analysis of Tungsten Carbide Surfaces by Laser-Acoustic Surface Waves"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002

- [T65] W. Pompe, S. Beyer, T. Sebald, P. Gawlitza, H. Mai  
*"Inside Coating of Combustion Chambers of Rocket Engines"*  
 International Symposium TurboMat - Advanced Thermal Barrier Coatings and Titanium Aluminides for Gas Turbines, Bonn, 17.-19. Juni 2002
- [T66] I. Retzko, W. E. S. Unger, H. Schulz, H.-J. Scheibe  
*"Analysis of Carbon Materials by XPS"*  
 Materials Week, München, 30. September - 02. Oktober 2002
- [T67] H.-J. Scheibe, C.-F. Meyer, B. Schultrich, H. Schulz, M. Schwach  
*"Diamor® - Superharter amorpher Kohlenstoff, eine neue Generation von reibungsarmen Verschleißschutzschichten"*  
 Tribologie-Fachtagung 2002, Göttingen, 23.-25. September 2002
- [T68] H.-J. Scheibe, B. Schultrich  
*"Harte Kohlenstoffschichten für die Umformung und Zerspanung mit vermindertem Schmierstoffeinsatz"*  
 VDI-Seminar "Trockenzerspanung in der Serienfertigung", Dresden, 21.-22. März 2002
- [T69] H.-J. Scheibe, A. Zwick, T. Stucky, B. Schultrich  
*"Industrial Laser-Arc Coater for the Deposition of Superhard Amorphous Carbon Films (Diamor®)"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002
- [T70] D. Schneider, S. Carvalho, M. Leonhardt, B. Schultrich  
*"Characterizing Defect Density an Porosity by Laser Acoustics"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002
- [T71] B. Schuhmacher, W. Müschenborn, M. Stratmann, B. Schultrich, C.-P. Klages, M. Kretschmer, U. Seyfert, F. Förster, E. Blumenfeld, H.-J. Tiller  
*"Novel Coating Systems for Steel Strip by Means of Innovative Technologies in a Continuous Process"*  
 Materials Week 2002, München, 30. September - 02. Oktober 2002
- [T72] B. Schultrich  
*"Möglichkeiten und Grenzen der Puls-Laser-Deposition"*  
 Institut für Laserphysik, Hamburg, 28. Januar 2002
- [T73] B. Schultrich  
*"Nanostructured Carbon Films and Their Tribological Applications"*  
 Nanofair 2002, Strasbourg (Frankreich), 25.-26. November 2002
- [T74] B. Schultrich  
*"Harte und superharte Nanoschichten und Nanoschichtsysteme"*  
 Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg, 12. März 2002
- [T75] B. Schultrich  
*"Superharte Kohlenstoffschichten durch Nanometer-Schichtdesign"*  
 Drittes Fachforum Nanotechnologie "Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung", Regensburg, 22.-23. Oktober 2002
- [T76] B. Schultrich, P. Gawlitza  
*"Nanoskalige funktionale Schichten für Tribologie, Wärmedämmung und Korrosionsschutz"*  
 Workshop ANTARES - Analyse der Nanotechnologie-Anwendungen in Raumfahrtentwicklung und -systeme, Köln, 04. Juni 2002
- [T77] B. Schultrich, H. Jäger  
*"Simulation of Growth of Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films by High Energy Ions"*  
 8th International Conference on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen, 09.-13. September 2002
- [T78] B. Schultrich, C. M. Schneider  
*"Ultrapräzisionsbeschichtungen"*  
 Arbeitskreis Ausrüstungen, Materialien und Dienstleistungen für die Halbleiterindustrie, Dresden, 05. März 2002
- [T79] B. Schultrich, T. Schülke  
*"Qualitätssicherung von Diamantbeschichtungen mittels Laser-Akustik"*  
 AK Diamant-Werkzeuge, Berlin, 05.-07. November 2002
- [T80] B. Schultrich, S. Völlmar, D. Römer  
*"SimCoat - A Simulation Program Package for Industrial Vacuum Arc Coaters"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002
- [T81] T. Schülke  
*"Nondestructive Testing of Damage Layers in Semiconductor Materials by Surface Acoustic Waves"*  
 International Symposium on Advanced Microelectronic Manufacturing and Nanotechnologies, Santa Clara (USA), 06.-07. März 2002
- [T82] H. Schulz, C. Fröck  
*"Wechselwirkung von amorphen Kohlenstoffschichten mit Polymeren"*  
 10. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Dresden, 17.-18. Oktober 2002
- [T83] H. Schulz, H.-J. Scheibe, P. Siemroth, B. Schultrich  
*"Pulsed-Arc-Deposition of Superhard Amorphous Carbon Films"*  
 Jahrestagung der DVG - Vakuumgestützte Wissenschaften und Technologien, Magdeburg, 17.-20. Juni 2002
- [T84] C. Schwerdt, M. Riemer, B. Schumacher, S. Schenk, O. Zimmer, B. Schultrich, G. Grundmeier  
*"Metallurgical and Corrosion Aspects of Highly Corrosion Resistant PVD ZnMg Alloy Coated Steel Strip"*  
 International Conference on Industrial Surface Technology, Stockholm (Schweden), 29.-31. Mai 2002
- [T85] M. Seifert  
*"Gut gesteuert ist halb gewonnen! - Neuartige Anwendungen des Laserstrahlhärtens durch verbesserte Temperaturregelung"*  
 Hannover-Messe 2002, Hannover, 17. April 2002
- [T86] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer  
*"Extended Possibilities for High Power Diode Laser Heat Treatment Using Special Optics"*  
 International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics - ICALEO 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T87] P. Siemroth, H.-J. Scheibe, B. Schultrich, J. Berthold, T. Schülke, W. Hentsch, H. H. Schneider, H. Hilgers, B. Petereit  
*"Deposition of High Quality Films by Fully Ionized Plasmas from High Current Pulsed Vacuum Arc Discharges"*  
 European Workshop on Pulsed Plasma Surface Technologies, Dresden, 05.-07. Juni 2002
- [T88] J. Standfuß, D. Dittrich, B. Brenner, E. Beyer  
*"Laser Beam Welding of Magnesium Light Weight Structures"*  
 International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2002, Scottsdale (USA), 14.-17. Oktober 2002
- [T89] P. Thomsen-Schmidt, K. Hasche, G. Ulm, K. Herrmann, M. Krumrey, G. Ade, J. Stümpfel, S. Schädlich, W. Frank, M. Procop, U. Beck  
*"Realization of Thickness Standards below 100 nm Thickness"*  
 Jahrestagung der DVG - Vakuumgestützte Wissenschaft und Technologien, Magdeburg, 17.-20. Juni 2002
- [T90] A. Torosyan, M. Becker, T. Schülke  
*"New Method for Surface Modification and Hard Coating"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002
- [T91] J. Vetter, P. Siemroth, H.-J. Scheibe, T. Schülke  
*"Carbon Coatings for Dry Machining and Forming Operations Deposited by Non-Reactive (ta-C) and Reactive (a-C:Me) Cathodic Arc Processes"*  
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 23. April 2002
- [T92] S. Völlmar, B. Schultrich, D. Römer, T. Stucky  
*"SimCoat: Ein Simulationsprogramm für Vakuumbogenbeschichtungen"*  
 Jahrestagung der DVG - Vakuumgestützte Wissenschaft und Technologien, Magdeburg, 17.-20. Juni 2002
- [T93] S. Völlmar, B. Schultrich, D. Römer, T. Stucky  
*"SimCoat: Ein Simulationsprogramm für Vakuumbogenbeschichtung"*  
 Jahrestagung der DVG - Vakuumgestützte Wissenschaften und Technologien, Magdeburg, 17.-20. Juni 2002
- [T94] P. Vuoristo, A. Määttä, T. Mäntylä, L.-M. Berger, S. Thiele  
*"Properties of Ceramic Coatings Prepared by HVOF and Plasma Spraying from Titanium Suboxide Powders"*  
 International Thermal Spray Conference and Exposition - ITSC 2002, Essen, 04.-06. März 2002
- [T95] V. Weihnacht  
*"Grenzflächenfestigkeit und Schichthaftung"*  
 7. Workshop Nanoschutzschichten, Braunschweig, 05.-07. Juni 2002
- [T96] V. Weihnacht, B. Schultrich  
*"Ultrathin and Nanolayered Carbon Films"*  
 36th IUVSTA Workshop "On the Mechanisms of Formation and Application of Hard Nanostructured Coatings", Plzen (Tschechien), 20.-24. Oktober 2002
- [T97] G. Wiedemann  
*"Laserstrahlreinigen in der Lebensmittelindustrie"*  
 IWS-Workshop "Potenziale der Lasertechnik in der Verpackungsmittelindustrie", Dresden, 19. November 2002
- [T98] G. Wiedemann  
*"Laserstrahlreinigen von Kunst- und Kulturgut mit Laserstrahlen"*  
 Dresdner Brunnentag, Dresden, 25. Mai 2002
- [T99] H. Wust, E. Beyer, G. Wiedemann, M. Panzner, P. Haller  
*"Experimental Study of the Effect of a Laser Beam on the Morphology of Wood Surfaces"*  
 Wood Based Materials - Wood Composites and Chemistry, Wien (Österreich), 19.-20. September 2002
- [T100] H. Wust, G. Wiedemann, P. Haller  
*"Experimental Study of the Effect of a Laser Beam on the Morphology of Wood Surfaces"*  
 1st European Wood Conference, Hamburg, 07.-10. Oktober 2002
- [T101] R. Zieris, S. Nowotny, E. Beyer  
*"Werkstoff- und prozesstechnische Synergieeffekte durch die Zusammenführung von Plasmastrahl und Laserstrahl"*  
 2. GTV Kolloquium, Luckenbach, 21. Juni 2002
- [T102] J.-H. Zollondz, J. Krauser, A. Weidinger, C. Trautmann, D. Schwen, C. Ronning, H. Hofsass, B. Schultrich  
*"Conductivity of Ion Tracks in Diamond-Like Carbon Films and Field Emission"*  
 Diamond 2002 - 13th European Conference on Diamond, Diamondlike Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide, Granada (Spanien), 08.-13. September 2002



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 1998
- den Jahresbericht 1999
- den Jahresbericht 2000
- den Jahresbericht 2001
- einen weiteren Jahresbericht 2002

**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.jaekel@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
- Großflächen-Präzisionsbeschichtung mittels Pulsed Laser Deposition

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

**Bereich Thermische Beschichtungsverfahren**

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

- Laserstrahl-Auftragschweißen mit Hochleistungs-Diodenlasern

**Bereich Füge- und Randschichttechnologien**

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

**Bereich Systemtechnik / Laserabtragen und -trennen**

- lasertronic® - Systeme aus dem Fraunhofer IWS Dresden
- lasertronic® - High-Power-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 Dresden

Winterbergstr. 28

01277 Dresden

**Internet-Adresse:**

http://www.iws.fraunhofer.de

Tel.: (0351) 2583 324

Fax: (0351) 2583 300

E-mail: info@iws.fraunhofer.de

**Anfahrtsweg:**

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

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



## Impressum

Redaktion: Dr. Ralf Jäckel  
Dipl.-Ing. Karin Juch

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

Bildnachweis: S. 25: Rolf Günther  
alle anderen Abb.: Fraunhofer IWS Dresden

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2003

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

## Titelfotos

oben: Abscheidung von  $ZrO_2$ -  
Wärmedämmschichten  
(Innenbeschichtung)

Mitte: Mittels Metal Laminated  
Object Manufacturing  
hergestelltes Prägwerkzeug

unten: Induktiv unterstütztes Laser-  
strahlschweißen einer  
Abtriebswelle für 6-Gang-  
Pkw-Handschaltgetriebe