

# **Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen**

von Dr.-Ing. Jan-Philipp Weberpals  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel (i.R.)  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2010

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,  
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem  
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-  
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2010

ISBN 978-3-8316-0995-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit .....	5
Inhaltsverzeichnis .....	7
Formelzeichen und Abkürzungen .....	9
Extended Abstract .....	13
1 Einleitung .....	17
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit .....	17
1.2 Aufbau der Arbeit .....	18
2 Strahlwerkzeug Laser .....	21
2.1 Strahlqualität der Laserstrahlung .....	21
2.2 Fokussierung der Laserstrahlung .....	23
3 Ausbildung der Dampfkapillare .....	25
3.1 Grundlagen .....	25
3.2 Versuchsaufbau .....	28
3.3 Bestimmung der Kapillarneigung .....	29
3.4 Variation des Anstellwinkels der Bearbeitungsoptik .....	35
3.5 Kapillarausbildung bei einer Einschweißung .....	39
4 Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit .....	45
4.1 Einfluss der Fokussierbarkeit .....	45
4.1.1 Variation des Fokusedurchmessers .....	46
4.1.2 Variation des Divergenzwinkels .....	56
4.1.3 Variation der Fokuslage .....	59
4.1.4 Variation der Laserleistung .....	64
4.2 Wirkungsgrade beim Laserstrahlschweißen .....	70
4.2.1 Einkoppelgrad .....	70
4.2.2 Thermischer Wirkungsgrad .....	73
4.2.3 Prozesswirkungsgrad .....	76
5 Schweißnahtqualität .....	83
5.1 Prozesssporen beim Schweißen von Aluminium .....	83
5.1.1 Einfluss von Fokussierbarkeit und Laserleistung .....	85

5.1.2 Einfluss der Fokuslage .....	90
5.2 Spritzerentstehung beim Schweißen von Stahl .....	92
5.2.1 Versuchsaufbau .....	93
5.2.2 Spritzerentstehungsmechanismus bei einer Einschweißung.....	96
5.2.3 Spritzerentstehungsmechanismus bei einer Durchschweißung .....	106
5.2.4 Verbesserung der Schweißnahtqualität .....	112
6 Zusammenfassung .....	131
7 Literaturverzeichnis .....	137
Danksagung .....	145

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

In der industriellen Fertigungstechnik hat sich der Laser in den vergangenen Jahren aufgrund der Vielzahl an technologischen Vorteilen zu einem universellen Werkzeug etabliert. Durch die gezielte, berührungslose sowie zeitlich und örtlich begrenzte Energieeinbringung wird damit einhergehend die Prozessgeschwindigkeit und somit die Produktivität gegenüber konventionellen Bearbeitungstechnologien erheblich gesteigert. Gute Automatisierbarkeit und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit sind weitere Vorteile des Laserstrahlschweißens. Hervorgehend aus dem jeweiligen Anwendungsgebiet leitet sich die Wahl des zu verwendenden Lasersystems ab. Der entscheidende Vorteil von Festkörperlasern im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Lasern ist die vergleichsweise kürzere Wellenlänge, welche den Transport durch flexible Glasfasern ermöglicht und somit niedrigere Kosten der Handhabungsgeräte erlaubt. Außerdem wird der Laserstrahl mit der kürzeren Wellenlänge in metallischen Werkstoffen besser absorbiert und ist weniger empfindlich bezüglich des laserinduzierten Plasmas.

Hinsichtlich dieser Aspekte und unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen sowie einer marktgerechten Gestaltung, sind neueste Entwicklungen darauf gerichtet, die Vorteile der Festkörperlaser auszubauen. Diodengepumpte Hochleistungsfestkörperlaser, wie der Scheiben- und der Faserlaser, zeichnen sich überdies durch ihre sehr gute Fokussierbarkeit und hohe Effizienz aus. Diese Vorteile lassen sich nutzen, um kleinere Fokussdurchmesser zu erzielen, die Dimensionen optischer Elemente und verwendender Bearbeitungsköpfe zu reduzieren, die Schärfentiefe auszudehnen und um größere Arbeitsabstände zwischen Fokussieroptik und Werkstück zu schaffen.

Von den genannten Möglichkeiten wird bisher lediglich die letztgenannte in größerem Umfang genutzt. Für die Nutzung von Scannern zum so genannten Remote-Schweißen ist eine starke Fokussierbarkeit notwendige Bedingung. Dabei wirkt sich eine Steigerung der Fokussierbarkeit besonders stark aus: der Arbeitsraum skaliert mit der dritten Potenz der Fokussierbarkeit. Wenig beachtet werden hingegen die Möglichkeiten, die sich aus der Reduzierung des Fokussdurchmessers ergeben. So ist beispielsweise für die geforderten hohen Einschweißiefen im Getriebe- und Aggregatebau eine starke Fo-

kussierbarkeit bzw. eine höhere Laserleistung unabdingbar. Demzufolge ist ein tiefgründiges Prozessverständnis die Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen, wirtschaftlichen Einsatz diodengepumpter Festkörperlaser in der industriellen Fertigungstechnik. Gleichwohl darf dabei die Schweißnahtqualität nicht außer Acht gelassen werden, bestimmt diese sowohl die Festigkeit der Schweißnaht als auch die Oberflächenbeschaffenheit hinsichtlich technischer Funktionalität. Mit dieser Arbeit soll die Basis für das Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen mit kleinen Fokussdurchmessern geschaffen werden. Das resultierende Potenzial zur Erzielung von Schweißnähten mit hohem Aspektverhältnis bei gleichzeitig verbesserter Schweißnahtqualität ermöglicht eine Erweiterung bestehender bzw. die Erschließung neuer Anwendungsgebiete.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Basierend auf der Zielsetzung leiten sich das Vorgehen und der Aufbau der Arbeit ab. Einleitend wird in Kapitel 2 das Strahlwerkzeug Laser beschrieben. Charakterisiert durch die Strahlqualität lässt sich der Laserstrahl durch fokussierende Elemente bündeln und stellt für das Schweißen ein effizientes Werkzeug dar.

In Kapitel 3 wird die Ausbildung der Dampfkapillare erläutert, welche den Lasertiefschweißprozess überhaupt ermöglicht. Die Dampfkapillare wird bei einer ersten Betrachtung maßgeblich durch die Neigung der Kapillarfront definiert, die sich anhand experimenteller Untersuchungen an Edelstahl verifizieren lässt. Neben dem Einfluss der Fokussierbarkeit wird deren Manipulation durch eine Anstellung der Bearbeitungsoptik diskutiert, bevor die erarbeiteten Erkenntnisse auf eine Einschweißung übertragen werden.

Ausgehend von den grundlegenden Bedingungen im Kapillarinneren wird in Kapitel 4 auf das Nutzen sowie die Grenzen starker Fokussierbarkeit eingegangen. Durch den Einsatz von Laserstrahlquellen mit sich unterscheidender Fokussierbarkeit werden anhand von Blindschweißungen in verschiedene Werkstoffe zunächst die Einflüsse des Fokussdurchmessers bzw. der Laserleistung auf die charakteristischen Nahtkenngrößen Einschweißtiefe und -querschnittsfläche sowie Nahtform diskutiert. Anschließend wird explizit deren Einfluss, sowohl auf den Einkoppel- als auch den thermischen Wirkungsgrad erarbeitet, welche im gemeinsamen Prozesswirkungsrad resultieren. Es wird aufgezeigt, wie mit Hilfe einer guten Fokussierbarkeit die Prozessgrenzen erweitert werden können.

Lassen sich die Prozessgrenzen infolge einer guten Fokussierbarkeit verbessern, darf die Schweißnahtqualität nicht außer Acht gelassen werden. Stellen Prozesssporen typische Nahtimperfection für das Laserstrahlschweißen von Aluminium und dessen Legierungen dar, führen permanente Schmelzbadauswürfe beim Schweißen von Stahl zu einer Reduktion des festigkeitsbestimmenden Nahtvolumens. Ziel von Kapitel 5 ist es, die genauen Zusammenhänge und Abhängigkeiten einzelner Prozessparameter zu verstehen und daraus Wege abzuleiten, die eine hohe Effizienz bei gleichzeitig bester Schweißnahtqualität ermöglichen.

Zum Abschluss werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

### Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen  
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

### Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen  
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

### Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen  
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

### Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern  
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

### Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO<sub>2</sub>-Lasern  
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

### Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung  
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

### Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr  
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

### Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO<sub>2</sub>-Lasern  
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

### Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr  
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

### Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern  
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

### Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern  
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

### Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeffektivität  
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

### Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß  
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

### Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

### Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

### Griebisch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen  
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

### Kreputat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

### Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern  
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

### Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen  
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

### Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen  
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

### Rapp, Jürgen

Laserschweißeiignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau  
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7



**Wittig, Klaus**

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung  
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

**Grünenwald, Bernd**

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

**Lee, Jae-Hoon**

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung  
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

**Albinus, Uwe N. W.**

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

**Wiedmaier, Matthias**

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren  
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

**Bloehs, Wolfgang**

Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlformungssystemen  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

**Bea, Martin**

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

**Stöhr, Michael**

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden  
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

**Pläß, Wilfried**

Zerstörungsschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-Laseroptiken  
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

**Schaller, Markus K. R.**

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän  
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

**Hack, Rüdiger**

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW  
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

**Krupka, René**

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser  
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

**Pfeiffer, Wolfgang**

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

**Volz, Robert**

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern  
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

**Bartelt-Berger, Lars**

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

**Müller-Hummel, Peter**

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung  
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

**Rohde, Hansjörg**

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser  
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

**Huonker, Martin**

Strahlführung in CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung  
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

**Callies, Gert**

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen  
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

**Schubert, Michael E.**

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern  
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

**Kern, Markus**

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen  
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

**Raiber, Armin**

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### **Schittenhelm, Henrik**

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas  
beim Abtragen und Schweißen  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

### **Stewen, Christian**

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung  
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

### **Schmitz, Christian**

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen  
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

### **Karszewski, Martin**

Scheibenlaser höchster Strahlqualität  
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

### **Chang, Chin-Lung**

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

### **Haag, Matthias**

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern  
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

### **Bahn Müller, Jochen**

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren  
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

### **Schellhorn, Martin Carl Johannes**

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen  
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

### **Angstenberger, Birgit**

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten  
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

### **Bachhofer, Andreas**

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau  
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

### **Breitschwerdt, Sven**

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen  
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

### **Mochmann, Gunter**

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren  
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

### **Herrmann, Andreas**

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern  
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

### **Mästle, Rüdiger**

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung  
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

### **Voß, Andreas**

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG  
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

### **Müller, Matthias G.**

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

### **Abeln, Tobias**

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl  
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

### **Erhard, Steffen**

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser  
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

### **Contag, Karsten**

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers  
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

### **Krastel, Klaus**

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen  
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

### **Staud, Jürgen**

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

### **Schinzel, Cornelius M.**

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau  
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

### **Sebastian, Michael**

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen  
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

**Lücke, Bernd**

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays  
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

**Hohenberger, Bernd**

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozesssicherheit, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung  
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

**Jasper, Knut**

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und -führung für die Mikrotechnik  
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

**Heimerdinger, Christoph**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt  
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

**Christoph Fleig**

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen Bestimmung des Reflexionsgrades optischer Komponenten  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

**Joachim Radtke**

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

**Michael Brandner**

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern  
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

**Reinhard Winkler**

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss  
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

**Helmut Kindler**

Optische und gerätetechnische Entwicklungen zum Laserstrahlspritzen  
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

**Andreas Ruf**

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung  
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-Laser unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

**Armin Strauch**

Effiziente Lösung des inversen Problems beim Laserstrahlschweißen durch Simulation und Experiment  
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

**Thomas Wawra**

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung  
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

**Michael Honer**

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung  
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

**Thomas Herzinger**

Prozessüberwachung beim Laserbohren von Turbinenschaufeln  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

**Reiner Heigl**

Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung  
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### **Thomas Fuhrich**

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

### **Daniel Müller**

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

### **Jiancun Gao**

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

### **Wolfgang Gref**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Foksmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

### **Michael Weikert**

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

### **Julian Sigel**

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

### **Andreas Ruß**

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

### **Gabriele Seibold**

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

### **Dirk Lindenau**

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

### **Jens Walter**

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

### **Heiko Ridderbusch**

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

### **Markus Leimser**

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Naht-eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### **Mikhail Larionov**

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

### **Jürgen Müller-Borhanian**

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

### **Andreas Letsch**

Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

### **Thomas Kübler**

Modellierung und Simulation des Halbleiter-scheibenlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

### **Günter Ambrosy**

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

### **Agnes Ott**

Oberflächenmodifikation von Aluminium-legierungen mit Laserstrahlung: Prozessver-ständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

### **Detlef Breiting**

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

### **Dmitrij Walter**

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0