

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen

von Dr.-Ing. Jan-Philipp Weerpals
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

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 Fokusdurchmessers	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 Prozessporen 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 CO₂-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 Fokusdurchmesser 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 Fokusdurchmessers ergeben. So ist beispielsweise für die geforderten hohen Einschweißtiefen 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 Fokusdurchmessern geschaffen werden. Das resultierende Potenzial zur Erzielung von Schweißnähten mit hohem Aspektverhältnis bei gleichzeitig verbesserter Schweißnahtqualität ermöglicht eine Erweiterung bestehender bzw. die Erschließung neuer Anwendungsbereiche.

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 Fokusdurchmessers 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 Prozessspuren typische Nahtimperfektion 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 CO₂-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 längsgestromte CO₂-Laser
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 Lötdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgestromten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseoberflächenbehandlung 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: Energiedissipation und Prozeßeffektivität
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 CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

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

Krepulat, Walter

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

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- 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

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

- Wittig, Klaus**
Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-laserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5
- Grünenwald, Bernd**
Verfahrensoptimierung und Schicht-charakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-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**
Laserstrahlhärtungen mit angepaßten Strahl-formungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5
- Bea, Martin**
Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3
- Stöhr, Michael**
Beeinflussung der Lichtheission bei mikrokanal-gekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8
- Plaß, Wilfried**
Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6
- Schaller, Markus K. R.**
Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetall-schichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4
- Hack, Rüdiger**
System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-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**
Fluidynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9
- Volz, Robert**
Optimierte Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2
- Bartelt-Berger, Lars**
Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grund-mode-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 Einzelpulsohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7
- Huonker, Martin**
Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbe-arbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5
- Callies, Gert**
Modellierung von qualitäts- und effektivitäts-bestimmenden Mechanismen beim Laser-abrügen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3
- Schubert, Michael E.**
Leistungsskalierbares Lasersystem aus faser-gekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1
- Kern, Markus**
Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laser-strahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X
- Raiber, Armin**
Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermik-robothen 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

Bahnmüller, 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

Fließkraftunterstütztes 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-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität 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 ke-
ramischen 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 Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

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

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-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 Präzi-
sion 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
Turbineschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen 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 Laserstrahlfliefschweißen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign
2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung
2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablen Laserstrahldurchmessern in modularen Fertigungssystemen
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 Lasermaterialbearbeitung
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 geschaltete 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: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung
2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breitling

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitäts sicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0