

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz

von Dr.-Ing. Volker Rominger
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

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., 2017

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 2017

ISBN 978-3-8316-4692-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Formelzeichen und Abkürzungen	5
Kurzfassung der Arbeit	8
Extended Abstract	12
1 Einleitung	15
2 Experimenteller Aufbau	21
2.1 Strahlquellen und Absorptionsverhalten	21
2.2 Schutz- und Prozessbegasung	24
2.3 Kamerasysteme zur Prozessdiagnostik	26
3 Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Schweißungen mit dem FKL	29
3.1 Thermographische Beobachtungen	34
3.1.1 Definition geometrischer Prozesskenngrößen	36
3.1.2 Einfluss der Fokusslage	42
3.1.3 Einfluss der Leistung	50
3.2 Kapillargeometrie und Energieeinkopplung	58
3.2.1 Kapillaröffnung	59
3.2.2 Wechselwirkung der Laserstrahlung und der Kapillaroberfläche	67
3.3 Metalldampfeinfluss in Abhängigkeit der Begasung	75
3.3.1 Visualisierung der Wärmestrahlung	77
3.3.2 Nahtkenngrößen und Nahtqualität	83
3.4 Fluiddynamische Effekte	91
3.4.1 Strömungsgeschwindigkeit um die Dampfkapillare	91
3.4.2 Spritzerablösungen und Spritzereigenschaften	96
3.4.2.1 Visualisierung von Spritzerablösungen	97

3.4.2.2	Quantifizierung von Spritzereigenschaften	100
3.5	Zusammenführung der Ergebnisse in detaillierte Modellvorstellungen	118
4	Vergleich der Prozessvorgänge bei Schweißungen mit FKL und CO₂-Lasern	129
4.1	Nahtqualität und Nahtkenngrößen	131
4.2	Prozessdiagnostik mit der HSK	141
4.2.1	Untersuchungen der Kapillarausbildung	142
4.2.2	Untersuchungen von Spritzerablösungen und Prozessemissionen	144
4.3	Zusammenfassung und Diskussion	150
5	Zusammenfassung und Ausblick	153
	Literatur- und Quellenverzeichnis	163
	Danksagung	173

Kurzfassung der Arbeit

Die Vorstellungen von den Abläufen im Schweißprozess konnten in den letzten Jahren wesentlich erweitert und einzelne physikalische Teilaspekte gut verstanden werden. Instationäre Vorgänge im Schmelzebad können durch starke Spritzerbildung zu einer Einengung des Prozessfensters führen. In gängigen Modellvorstellungen wird davon ausgegangen, dass die zur Spritzerablösung notwendige Energie maßgeblich durch Verdampfung des Werkstoffs und die Wechselwirkung von Metaldampf mit der Kapillarwand bereitgestellt wird [1] [2][3][4][5].

Dennoch sind die zugrundeliegenden, gewöhnlich als Prozessinstabilität bezeichneten Mechanismen bis heute nicht vollständig verstanden [1] und es sind noch Fragen offengeblieben, insbesondere über die genaue geometrische Ausbildung von Dampfkapillare, Schmelzebad, Metaldampfströmung und Spritzer in Abhängigkeit der Prozesseingangsgrößen. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit von Erkenntnissen häufig schwierig, da bereits kleine Variationen der Versuchsparameter, insbesondere in Grenzbereichen, den Schweißprozess massiv beeinflussen können.

Um die gängigen Modellvorstellungen zu validieren und offene Fragen möglichst umfassend zu beantworten, sollen in dieser Arbeit alle wesentlichen physikalischen Mechanismen anhand systematischer Parametervariationen bei Einschweißungen in Baustahl 1.0038 mit einem Festkörperlaser (FKL) und einem CO₂-Laser erörtert werden.

Wesentliche Ziele der Arbeit sind es, die Auswirkungen systematischer Parametervariationen auf den Schweißprozess anschaulich zu visualisieren und zu beschreiben, die resultierenden Nahtqualitäten in charakteristische Regime einzuteilen sowie charakteristische Prozesskenngrößen zu quantifizieren. Zur Untersuchung der Prozessvorgänge wurden verschiedene Kamerasysteme eingesetzt, die sich neben ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung wesentlich in ihrem detektierbaren Spektralbereich unterscheiden. Es wurden die von der Dampfkapillare, dem Schmelzebad und dem Metaldampf emittierte Prozesssekundärstrahlung aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen und daraus direkte geometrische Prozesskenngrößen, wie bspw. die Länge und die Breite des Schmelzebades und der Kapillaröffnung, der Kapillarfrontverlauf oder die Spritzereigenschaften gemessen. Dies ermöglicht es, wesentliche physikalische Teil-

prozesse wie die Energieeinkopplung, Metaldampfströmung und Fluidodynamik sowie deren komplexen Wechselwirkungsmechanismen zu erörtern.

Eine Herausforderung für eine systematische Auswertung und anschauliche Visualisierung stellten die hochdynamischen Fluktuationen des Schweißprozesses dar. Durch die Entwicklung neuer Auswertestrategien konnte jedoch mit Hilfe statistischer Verfahren der Einfluss von Schwankungen zwischen Einzelbildern einer Schweißsequenz reduziert, die Einflüsse von Parametervariationen anhand geometrischer Messgrößen untersucht und charakteristische Fingerabdrücke der Prozesse bestimmt werden.

In Untersuchungen der **Prozessvorgänge bei Schweißungen mit FKL** wurden anhand koaxialer Prozessbeobachtungen der Werkstückoberfläche mit einer Nahinfrarot-Kamera geometrische Kenngrößen von Dampfkapillare, Schmelzebad und Wärmespur der bereits wieder erstarrten Schmelze ermittelt. Dadurch konnten für unterschiedliche Leistungen, Fokusbereiche und Vorschubgeschwindigkeiten eindeutige Zusammenhänge der gemessenen Werte mit den Schweißergebnissen sowie den Nahtkenngrößen Einschweißtiefe und Nahtbreite an der Werkstückoberseite gefunden werden. Diese Erkenntnisse können dabei helfen, den Aufwand von Parameterstudien zu reduzieren, in denen bis heute noch viele industrielle Anwendungen aufwändig optimiert werden.

In weiteren Versuchen mit konstanter Leistung von 5 kW und konstanter Fokusbereiche von -2 mm wurde der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Prozessvorgänge und die Nahtqualität untersucht. Durch einen Vergleich mit dem Gewichtsverlust durch Spritzerablösungen sowie Beurteilungen des Erscheinungsbildes der Nahtoberflächen konnten drei Schweißregime identifiziert werden, die sich wesentlich in der resultierenden Nahtqualität unterscheiden. Während bei moderaten Geschwindigkeiten bis 4 m/min eine sehr hohe Nahtqualität entstand, kam es zwischen 6 m/min und 15 m/min zu starker Spritzerbildung nach hinten. Bei noch höherer Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/min wurde die Nahtqualität im Regime mit stark verlängerter Kapillaröffnung wieder besser, wobei leicht inhomogene Nahtoberflächen entstanden.

Um die hochdynamischen Vorgänge in den verschiedenen Schweißregimen besser zu verstehen, wurden Kapillaröffnung, Prozessemissionen, Schmelzebad und Spritzereigenschaften mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera betrachtet. Anhand von Röntgenuntersuchungen konnte zudem der Kapillarfrontverlauf gemessen und die resultierenden Strahleinfallswinkel abgeschätzt werden.

Durch eine Zusammenführung der Ergebnisse erfolgte eine umfassende Beschreibung der Prozessvorgänge und der Antriebsmechanismen für die Spritzerentstehung in den

verschiedenen Schweißregimen, wobei die bestehenden Modellvorstellungen bestätigt und detailliert werden konnten. Die quantitativen Ergebnisse können zudem als Eingangsgrößen theoretischer Betrachtungen und Simulationen sowie deren Verifizierung einen wertvollen Beitrag dazu leisten, um das Prozessverständnis zukünftig weiter zu verbessern. Dadurch können weitere Aspekte abgeschätzt werden, die durch Messtechnik nicht oder nur schwer untersucht werden können, wie bspw. fluiddynamische Effekte im Schmelzebad oder Einflüsse von Oberflächenspannungskräften auf die Schmelzeströmungen [6].

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, die **Unterschiede von Schweißungen mit CO₂-Lasern und FKL** bezüglich Nahtqualität und Nahtkenngößen zu quantifizieren sowie die Ursachen hierfür zu beschreiben. In vergleichenden Untersuchungen der Prozessvorgänge konnten bei Schweißungen mit beiden Strahlquellen ähnliche Strahlparameterprodukte und Strahldurchmesser auf der Werkstückoberseite erzielt werden, wodurch Rückschlüsse auf die unmittelbaren Einflüsse der Wellenlänge auf den Schweißprozess möglich waren. Obwohl mit beiden Strahlquellen ähnliche Fokussierbedingungen und vergleichbare Leistungsdichten erzielt wurden, unterscheiden sich deren resultierende Nahtkenngößen und Nahtqualitäten wesentlich in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beide Strahlquellen aufgrund der wellenlängenbedingten Unterschiede bei der Energieeinkopplung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit unterschiedliche Verläufe der Einschweißtiefe aufweisen. Während die Einschweißtiefe mit dem CO₂-Laser bei niedrigen Geschwindigkeiten höher ist, wird bei höheren Geschwindigkeiten mit dem Festkörperlaser tiefer eingeschweißt.

Während bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten mit beiden Strahlquellen sehr gute Schweißergebnisse erzielt wurden, entstanden mit dem Festkörperlaser bei höheren Geschwindigkeiten starke Schmelzeauswürfe nach hinten. Dagegen entstanden mit dem CO₂-Laser über den gesamten Geschwindigkeitsbereich erheblich weniger Spritzer.

Durch Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera (HSK) konnte zudem aufgezeigt werden, wie sich Kapillarausbildung, Prozessemissionen und Fluidodynamik bei den beiden Strahlquellen unterscheiden. Bei gleichen Vorschubgeschwindigkeiten sind die Kapillaröffnungen mit beiden Strahlquellen vergleichbar groß. Dagegen konnten bei den Prozessemissionen und der Fluidodynamik wesentliche Unterschiede nachgewiesen werden. So sind bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser lokale Helligkeitsunterschiede, die auf Verformungen der Kapillaroberfläche zurückschließen lassen, ge-

ringer ausgeprägt. Die Schmelzebadwölbung und die Schmelzedynamik sind bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser über den gesamten Geschwindigkeitsbereich geringer als beim Festkörperlaser ausgeprägt. Offensichtlich ist die zur Oberfläche gerichtete Schmelzebadströmung aufgrund einer geringeren Wechselwirkung mit Metaldampf weniger stark ausgeprägt. Bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser ist auch kein diffus ausströmender Schweißrauch oder eine Metaldampffackel erkennbar. Stattdessen bildet sich über der Kapillaröffnung ein Plasma aus, dessen kompakte Leuchterscheinung einer Kerzenflamme ähnelt.

Diese Untersuchungen untermauern die bestehende Modellvorstellung, dass die unterschiedliche Energieeinkopplung bei den Strahlquellen den wesentlichen physikalischen Unterschied ausmacht [1]. Bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser ist die absorbierte Intensität bei senkrechtem Strahleinfall geringer als bei denen mit Festkörperlasern durchgeführten. Da bei CO₂-Lasern der Absorptionsgrad eines Plasmas durch inverse Bremsstrahlung hoch ist, wird neben direkter Fresnel-Absorption auch ein Teil der Laserenergie über Wärmeleitung und Strahlung aus dem Plasma an den Werkstoff abgegeben. Die Absorptionseigenschaft der Laserstrahlung auf der Schmelzebadoberfläche ist stark von der Laserwellenlänge und dem Einfallswinkel abhängig und stellt den wesentlichen physikalischen Unterschied bei der Wirkungsweise der Strahlquellen dar.

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 längsgeströmte 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 Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-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 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 Qualitätssicherung 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

Laserschweißleistung 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 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

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
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 Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Pläß, Wilfried

Zerstörungsschwellen und Degradation von CO₂-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 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

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-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 Zerspansung
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 CO₂-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 magnetofluiddynamische 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 Weichlötlens 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

Schinzl, 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
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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 Fokusmatrixtechnik

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 vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fert-igungssystemen

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 Nahteigenschäften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len 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 La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

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

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

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 Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis 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

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0