

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

C.-D. Reiniger
Fluiddynamische Effekte beim Remote-
Laserstrahlschweißen von Blechen mit
Fügespalt

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt

von Dr.-Ing. Claus-Dieter Reiniger
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. Siegfried Schmauder
Mitberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf

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., 2015

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 2015

ISBN 978-3-8316-4528-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Kurzfassung der Arbeit

Das robotergeführte Remote-Laserstrahlschweißen mit programmierbaren Scanneroptiken in Verbindung mit brillanten, fasergekoppelten Festkörperlasern eröffnet wirtschaftliche Potenziale und neue Möglichkeiten der Prozessoptimierung zur Steigerung der Nahtqualität.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche für den Karosserierohbau. Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer prozesssicheren Schweißmethode. Dazu erforderlich ist ein detailliertes Prozessverständnis einschließlich phänomenologischer Deutungen der Fehlerentstehungsmechanismen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Fehlervermeidungsstrategien abgeleitet und deren Serientauglichkeit nachgewiesen.

Eine erste Aufgabe bestand darin, die Technologie dieses Verfahrens für die Erzeugung eines notwendigen Entgasungsspalt durch Abstandsnoppen anzuwenden und den Entstehungsvorgang derartiger Oberflächenstrukturen zu deuten. Dies wurde durch Optimierung zahlreicher Parameter, wie beispielsweise Fokuslage, Prozesszeit und Einstrahlwinkel, für die üblicherweise im Automobilbau verwendeten beschichteten Stahlbleche erreicht. Für alle untersuchten Stähle konnten Verfahren zur Herstellung von Lasernoppen – z.T. unterschiedliche physikalische Phänomene ausnutzend – entwickelt werden, die den erforderlichen Fügspalt und damit die notwendige Zinkentgasung gewährleisten.

Schwerpunkt der Arbeit war sodann die Schweißprozessoptimierung und die Steigerung der Nahtqualität in Verbindung mit dem durch Lasernoppen realisierten Fügspalt. Es wurden sowohl anwendungsbedingte, als auch prozessbedingte Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung herausgearbeitet und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine Vermeidung bzw. Reduzierung von Schweißfehlern und Nahtunregelmäßigkeiten. Noch verbleibende Nahtunregelmäßigkeiten können durch eine zweite Laserüberfahrt prozesssicher eliminiert werden.

Mit den erarbeiteten Prozessparametern sind qualitativ hochwertigere Schweißnähte als bei herkömmlichen Laserschweißverfahren möglich. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden bereits weltweit in der Serienproduktion des Automobilbaus angewendet.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	1
Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis der Symbole	6
Extended Abstract	9
1 Einleitung	12
1.1 Motivation	12
1.2 Zielsetzung	13
1.3 Aufbau der Arbeit.....	14
2 Grundlagen und Stand der Technik	16
2.1 Laserschweißen und Schweißbarkeit von Stahl	16
2.1.1 Verfahren	16
2.1.2 Schweißbarkeit von Stahl	18
2.2 Korrosionsschutzschichten.....	20
2.3 Ausgangsproblematik.....	23
2.4 Bekannte Lösungsansätze zum Laserstrahlschweißen beschichteter Bleche.26	
2.4.1 Prozesstechnische Ansätze zum Schweißen mit Nullspalt.....	27
2.4.2 Schweißen mit Spalt	33
2.4.3 Laserschweißbare Beschichtungen	38
2.4.4 Einschätzungen von Lösungsansätzen.....	39
2.5 Remote-Laserstrahlschweißen.....	41
3 Systemtechnik und experimentelle Durchführung	47
3.1 Systemhardware	47
3.1.1 Diodengepumpte Festkörperlaser	47
3.1.2 Komponenten zur Strahlführung und Fokussierung	49
3.1.3 Bearbeitungsanlagen.....	52

3.1.4	Spanntechnik	53
3.1.5	Programmierung der Schweißmuster	54
3.2	Untersuchte Werkstoffe und Beschichtungen	54
3.2.1	Werkstoffe	54
3.2.2	Beschichtungen	56
3.3	Untersuchungs- / Analysemethoden	57
4	Sicherstellung des erforderlichen Entgasungsspalts durch Lasernoppen	60
4.1	Grundsätzliche Möglichkeiten der Herstellung von Lasernoppen	60
4.2	Noppenerzeugung im Modus des Wärmeleitungsschweißens	64
4.2.1	Einfluss von Intensität und Pulsdauer auf die Noppenhöhe	66
4.2.1.1	Ergebnisse auf DC04, blank	67
4.2.1.2	Ergebnisse auf ZStE340, blank	69
4.2.1.3	Zusammenfassung der Auswirkungen von Intensität und Pulsdauer	71
4.2.2	Einfluss von Grundwerkstoff, Blechdicke und Beschichtung auf die Noppenhöhe	73
4.2.2.1	Einfluss der Stahlsorte	73
4.2.2.2	Einfluss der Blechdicke	74
4.2.2.3	Einfluss der Beschichtung	74
4.2.3	Einfluss des Einstrahlwinkels auf die Noppenhöhe	76
4.2.4	Einfluss verschiedener Umgebungsbedingungen auf die Noppenhöhe	78
4.2.4.1	Grundtemperatur des Materials	78
4.2.4.2	Noppenbildung unter Gasatmosphäre	79
4.2.4.3	Einfluss von Bahnungenauigkeiten	80
4.2.5	Zusammenfassung der experimentell festgestellten Einflussgrößen auf die Noppenhöhe	81
4.2.6	Noppenentstehung	82
4.2.6.1	Zeitliche Entstehung	82
4.2.6.2	Noppenform	86
4.2.7	Mechanismus der Noppenentstehung	87
4.3	Noppenerzeugung im Modus des Tiefschweißens	95
4.3.1	Einfluss der Laserparameter auf die Noppenbildung	95

4.3.2	Noppenentstehung.....	98
4.4	Fertigungstechnische Aspekte.....	102
5	Fluiddynamische Phänomene beim Laserstrahlschweißen mit Spalt	104
5.1	Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler	105
5.1.1	Definition Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler	106
5.1.2	Bedeutung und Klassifizierung von Nahtunregelmäßigkeiten	109
5.2	Spritzerbildung	110
5.2.1	Experimentelle Beobachtungen von Spritzerentstehung	110
5.2.2	Qualitative Deutung der Spritzerentstehung.....	113
5.3	Fehlerentstehung beim Schweißen mit Spalt	116
5.3.1	Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung	116
5.3.1.1	Material- und anwendungsbedingte Einflussgrößen.....	116
5.3.1.2	Laser- und prozessbedingte Einflussgrößen	120
5.3.1.3	Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung	132
5.3.2	Fehlerentstehung	132
5.3.2.1	Beobachtungen zur Lochentstehung	133
5.3.2.2	Deutungsansätze zur Lochentstehung.....	140
6	Maßnahmen zur Reduzierung von Schweißfehlern	152
6.1	Direkte Maßnahmen	153
6.1.1	Spritzervermeidung.....	153
6.1.2	Reduzierung des Schmelzbaddefizits beim Schweißen.....	155
6.1.2.1	Fokuslageänderung während des Schweißprozesses	155
6.1.2.2	Gezielte Anpassung des Entgasungsspalts.....	156
6.2	Optimierung der Nahtqualität unmittelbar nach dem Schweißen	157
6.2.1	Minimierung des Endkraters durch Strahlbewegung.....	157
6.2.2	Kantenabschmelzen	158
6.3	Fertigungstechnische Aspekte.....	160
7	Zusammenfassung	162
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	166

Extended Abstract

Robot-guided laser welding has firmly established itself as a valuable extension to conventional joining technologies in automotive body-in-white production. Robot-guided remote laser welding with programmable scanner optics in combination with brilliant, fiber-coupled solid-state lasers leverages further economic potential and new possibilities in process optimization for improvements in weld seam quality.

The goal of this dissertation is the development of a stable weld strategy for joining coated sheet steel in body-in-white production. These coatings consist mainly of zinc and organic materials and serve as a corrosion protection layer. Since their melting and boiling temperatures are much lower than the corresponding temperatures for the base steel, zero-gap overlap weld seam quality is adversely affected by outgassing within the melt pool. Controlled outgassing can be achieved by creating a gap between the parts to be welded. Typically, a gap of 0.1 to 0.2 mm ensures successful outgassing without affecting weld quality.

In a literature search on welding coated sheet steels, a summary and evaluation of previous approaches was performed. Introducing a reproducible gap to ensure controlled outgassing was found to be the only method both effective and fit for volume production. Other approaches suggested in literature such as beam movement, pulsing, dual-focus techniques, hybrid techniques and introduction of filler materials could not provide proof of reliable performance under zero-gap volume production conditions.

The requirement of a reliably constant part gap of around 0.1 mm for the degassing of vaporizing coating elements was the driver for the development of topographically raised elements on the steel surface through laser interaction. One of the two main topics of this work was to generate a method for creating part gap through laser pulses. These so-called laser nubs are created with the laser before the actual welding process on one of the two sheets to be joined. With the help of these laser nubs as spacers between the parts to be welded, the necessary part gap for welding coated steels can easily be realized.

Evaluation of numerous tests series and high-speed videos revealed details of the laser nub creation process. Two completely different formation mechanisms were demon-

strated and explained. Nub formation on materials up to 400 MPa – created in heat conduction welding mode – is based on the mechanism of surface tension, while nub formation on ultra-high-strength TRIP steel – created in keyhole welding mode – is due to melt flow effects behind the capillary.

Nubbing parameters for ductile DC04 steel, for high-strength steel up to 400 MPa, and for ultra-high strength TRIP steel up to 700 MPa were developed. Nub heights between 50 and 250 μm were realized. Parameters relevant to nub creation are process time, laser beam intensity (defocusing), material type, sheet thickness, coating type and beam angle. Process times for heat conduction type nubs range from 12 to 50 ms. The most important controlling variables for nub height and shape are defocusing and process time, in other words intensity and energy density. With higher defocusing, and corresponding longer process time, the nub height can be increased. However, outside of the ideal combination of pulse duration and defocusing, nub height scattering increases.

Focus of this work was the optimization of the weld process and the increase in weld quality through the introduction of a part gap realized via laser nubs. The variables affecting weld fault occurrence and weld fault mechanisms, attributable to both process and application, were identified and evaluated.

The experimentally determined minimum gap for fault-free welding of galvanized steels of sheet thickness between 0.7 and 1.5 mm with laser power of 4 kW and a focal diameter of 680 μm ranges from 0.07 to 0.1 mm. An investigation of the influence of gap width on weld quality for various focal diameters showed that for smaller focal diameters, end crater holes and insufficient bond occurred already at smaller gap widths.

The parameters gap, sheet thickness, and focal diameter predominantly determine process stability in laser welding of galvanized steel.

With increasing gap, the bonding surface area and the seam undercut increase. Throughout all trials, the part gap width proved to be the single most important variable in affecting weld quality. Studies of high-speed process videos revealed an open melt pool behind the capillary which grows with increasing weld seam length. This can be attributed to a melt pool deficit caused by a material redistribution along the seam. Weld spatter and large part gap increase the melt pool deficit, resulting in end crater holes and pores caused by a detaching melt pool.

Furthermore, different types of spatter were identified and avoidance strategies defined. In general, spatter is due to a high melt pool dynamic and increases with higher laser power and weld speed. Accordingly, spatter at the beginning of the weld can be avoided by use of a short laser power ramp and an optional weld speed ramp.

A second laser pass over the seam following the actual weld can reduce or even eliminate weld bulge, undercut, end craters, holes and spatter. This second laser pass incorporates low energy density and high speed. It can be controlled such that the beam is guided around the fault in a spiraling motion. This approach melts material in the vicinity and lets it flow into the weld fault. The result is a uniform seam cross-section with reduced undercut and very smooth weld surface as well as optimized bonding area and strength with reduced stress concentration.

The weld quality resulting from remote laser welding with the above mentioned post-processing poses a new quality standard in laser welding of galvanized steel.

The results of this work offer a thorough understanding of the laser nub creation process for remote laser welding. The key weld fault creation processes for laser lap welding of galvanized steels were identified and successful counter-measures were presented. The discussed remote welding processes were developed to series production levels and are currently in use in worldwide large-scale automobile production.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Nach der Realisierung einer ersten Laserstrahlquelle im Jahre 1960 fanden in der Folgezeit entwickelte Nd:YAG- und CO₂-Laser schon bald zunehmende Bedeutung in der industriellen Produktion. Speziell bei kontinuierlich arbeitenden Festkörperlasern ist die Weiterentwicklung in Richtung einer deutlichen Steigerung von Strahlqualität und Laserleistung gelungen. Heute erreichen diodengepumpte cw-betriebene Yb:YAG-Laser 16 kW und mehr bei einem Wirkungsgrad von bis zu 25%. Aufgrund dieser rasanten Entwicklung der Laserstrahltechnologie hat sich der Laser in vielen Bereichen der Materialbearbeitung als thermisches Werkzeug etablieren können. In der Fügetechnik wird der Laserstrahl zum Schweißen von metallischen und nichtmetallischen Werkstücken verwendet und ersetzt heute bereits in vielen Bereichen konventionelle Fertigungsverfahren.

Abhängig von seiner Wellenlänge wird der Laserstrahl durch optische Elemente wie Spiegel oder flexible Glasfasern zu dem Werkstück geleitet und über Spiegel oder Linsen auf die für den Bearbeitungsprozess erforderliche Leistungsdichte gebündelt. Hochdynamische Portalanlagen und vielachsige Industrieroboter bewegen das Werkstück oder den Laserstrahl so, dass beliebige dreidimensionale Bearbeitungsbahnen erzeugt werden können. Die Führung der Festkörper Strahlung innerhalb einer flexiblen Glasfaser ist gerade dann von Vorteil, wenn einerseits schnelle Bewegungen und große räumliche Distanzen während einer Bearbeitung notwendig werden oder andererseits ein Laser mehrere Arbeitsstationen im time-sharing Betrieb mit Laserlicht versorgt. Der Einsatz des Lasers ist dann besonders wirtschaftlich, wenn hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten erforderlich sind, sowie ein hoher Grad an Automatisierung realisiert werden kann.

Eine Vielzahl von Werkstoffen, neue und effizientere Anwendungen einhergehend mit immer höher werdenden Ansprüchen an die Bearbeitungsqualität stellen neue Herausforderungen für die Prozessentwicklung dar. Ein seit einigen Jahren in der Entwicklung befindliches Schweißverfahren, das robotergeführte Remote-Schweißen, vereint eine hohe Laser- und Anlagenauslastung infolge geringer Nebenzeiten und hochflexib-

le Bearbeitungen, die individuell auf die Bauteilgeometrie und die Beanspruchungsarten ausgelegt werden können. Die exakte und ebenso variable Führung des Laserstrahls wird mit Hilfe von programmierbaren Fokussieroptiken – auch Scanner genannt – realisiert. In Verknüpfung mit einem modernen Festkörperlaser – Scheiben- oder Faserlaser – lassen sich Arbeitsabstände bis zu 500 mm bei einem Fokusdurchmesser von 600 μm realisieren.

Im Vergleich zur Anwendung mit robotergeführter Standardschweißoptik kann die Prozessführung beim Remote-Schweißen um ein vielfaches flexibler gestaltet werden, was beispielsweise eine signifikante Verbesserung der Schweißnahtqualität zur Folge haben kann. Die Matrix der Bearbeitungsparameter wird mittels exakt programmierbarer Scanneroptiken vielfältiger und setzt in Folge dessen ein umfangreiches Prozess-Know-how voraus.

Die zu erwartende Produktivitätssteigerung beim Remote-Schweißen und die Qualitätsverbesserung durch Optimierung der Prozessparameter mit Hilfe der programmierbaren Scanneroptik sind Motivation, dieses Verfahren für die industrielle Serienanwendung weiter zu entwickeln.

Die Literaturrecherche zum Thema Prozessentwicklung des Laserstrahlschweißens von verzinkten Stahlblechen ergab, dass hierzu experimentelle Untersuchungen meist exemplarischen oder grundsätzlich physikalischen Charakter haben und sich als nur wenig praxistauglich erweisen.

1.2 Zielsetzung

Primäres Ziel der Arbeit ist demgemäß die Entwicklung einer prozesssicheren Schweißmethode, mit der sich beschichtete Stahlbleche im Bereich des Karosserierohbaus fügen lassen. Diese Beschichtungen setzen sich überwiegend aus Zink und organischen Materialien zusammen und dienen dem Korrosionsschutz. Da im Vergleich zum Stahl der Schmelz- respektive Siedepunkt dieser Schichten deutlich niedriger ist, gasen sie innerhalb des Schmelzbades aus und bewirken eine Verschlechterung der Schweißnahtqualität bei Überlappnähten im Nullspalt. Um eine ausreichende und kontrollierte Ausgasung zu erreichen, müssen beispielsweise Abstände zwischen den Fügepartnern erzeugt werden. In der Regel ist ein Spalt zwischen 0,1 und 0,2 mm zur Gewährleistung der Zinkentgasung innerhalb der Fügeebene ausreichend. Die Entwicklung einer geeigneten Methode für die Zinkentgasung ist somit sekundäres Ziel der Arbeit.

Das bevorzugte Schweißverfahren ist das Laserstrahlschweißen mit dynamischer Strahlbewegung unter Vermeidung von zusätzlichen Hilfsstoffen.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Laserschweißnähten ist die Lochfreiheit. Löcher können einerseits zu Festigkeitsproblemen führen und stellen andererseits ein Dichtigkeitsproblem dar. Deshalb ist es wichtig, die verschiedenen Arten der Lochentstehung zu kennen, um beim Auftreten dieser gezielte Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Unterschiedliche Fehlerentstehungen und deren Deutungsansätze müssen verstanden werden, um geeignete Gegenmaßnahmen entwickeln zu können.

Um die gesamten Prozesspotenziale des Remote-Schweißens ausnutzen zu können, ist ein grundlegendes Prozessverständnis für das Laserstrahlschweißen von Blechen in Überlappanordnung zu erarbeiten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Bereits die kurze Beschreibung der Remote-Schweißtechnik lässt erkennen, dass in Folge der vielen möglichen Prozessparameter und deren Zusammenwirkung eine gezielte Nutzung qualitätsverbessernder Maßnahmen möglich ist. Daher wird das Thema Prozessverständnis ein zentraler Punkt in verschiedenen Kapiteln der Arbeit sein.

Das Kapitel 2 der Arbeit befasst sich mit dem Stand der Technik zum Thema Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche und gibt eine Übersicht zu prozesstechnischen Ansätzen sowie deren Einschätzung im Vergleich zu dem in der Arbeit entwickelten Verfahren.

In Kapitel 3 wird die verwendete Systemhardware, die verwendeten Materialien beschrieben, und es werden die in dieser Arbeit verwendeten Untersuchungs- und Auswertemethoden erläutert.

Innerhalb Kapitel 4 wird die Spaltgestaltung durch Lasernoppen behandelt. Nach Vorstellung dieser Verfahrenstechnik werden die Einflüsse von Parameter wie Laserleistung, Prozesszeit etc. auf die Höhe der Lasernoppen diskutiert. Weiter werden unterschiedliche Entstehungsmechanismen von Lasernoppen vorgestellt.

Nach dem der zwingend benötigte Spalt durch Lasernoppen gewährleistet ist, befasst sich das Kapitel 5 mit dem Laserstrahlschweißen von Überlappnähten mit Spalt. Nach der Definition und Bedeutung von Nahtfehlern werden verschiedene Fehlerent-

stehungsmechanismen anhand von Deutungsmodellen und experimentellen Versuchen beschrieben. Insbesondere wird auf die Oberflächenspannung der Schmelze eingegangen, die eine große Rolle bei der Fehlerentstehung beim Schweißen mit Spalt spielt.

Das Kapitel 6 umfasst die Qualitätsverbesserungen von Schweißnähten mit Hilfe des gewonnenen Prozessverständnisses. Es werden Maßnahmen sowohl zur Fehlervermeidung als auch Maßnahmen, welche direkt nach dem Schweißprozess die Nahtqualität optimieren, beschrieben.

Am Ende der Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse, und es wird ein Ausblick für die Realisierung zukünftiger Anwendungsmöglichkeiten der Remote-Schweißtechnik in einer Serienproduktion gegeben.

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

Adaptives 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

Plaaß, 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 3-8316-0460-6

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 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 Nahteigenschaften 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 Getriebebau – 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