

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi mittels Strahloszillation

von Dr.-Ing. Martin Sommer
Universität Stuttgart



utzverlag München

Als Dissertation genehmigt
von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth
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., 2020

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2021

ISBN 978-3-8316-4898-6

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungen.....	7
Formelzeichen	9
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	17
1 Einleitung	21
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	21
1.2 Aufbau der Arbeit.....	23
2 Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des Laserstrahlschweißens	25
2.1 Laserstrahlschweißen nahe der Tiefschweißschwelle	26
2.1.1 Die Tiefschweißschwelle beim geradlinigen Laserstrahlschweißen ...	28
2.1.2 Die Tiefschweißschwelle beim Schweißen mit Strahloszillation.....	30
2.2 Wirkungsgrad beim Laserstrahlschweißen	35
3 Reduzierung von Nahtimperfektionen	39
3.1 Entstehung und Vermeidung von Poren.....	40
3.1.1 Entstehung von Prozessporen beim Laserstrahlschweißen	40
3.1.2 Schweißnahtausprägung in Abhängigkeit der Prozessgestaltung.....	44
3.1.3 Einfluss der Strahloszillation auf die Kapillargeometrie.....	49
3.1.4 Auswirkungen von Strahloszillation auf entstandene Blasen.....	59
3.2 Reduzieren der Spritzer mittels Strahloszillation.....	65
3.2.1 Qualitative Beurteilung der entstandenen Spritzermenge beim Laserstrahlschweißen	65
3.2.2 Vergleich des Spritzeraufkommens beim Laserstrahlschweißen	68
3.2.3 Spritzerentstehung beim Laserstrahlschweißen.....	71

4	Beeinflussung der Kornstruktur durch Strahloszillation.....	75
4.1	Einflussfaktoren auf die Bildung der Kornstruktur	76
4.2	Resultierende Kornstrukturen in Schweißnähten	78
4.3	Bestimmung des Temperaturgradienten	81
4.4	Bestimmung der lokalen Erstarrungsrate	84
4.4.1	Methode zur Ermittlung von Erstarrungsraten.....	85
4.4.2	Analyse der berechneten Erstarrungsraten.....	87
4.5	Synopsis der Einflussfaktoren auf die Kornstruktur	90
5	Zusammenfassung	91
	Literaturverzeichnis	93
	Danksagung	101

Kurzfassung der Arbeit

In der Automobilindustrie bietet Aluminium ein hohes Leichtbaupotenzial durch seine geringe Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit. Im Gegensatz zu Stahl ist der Einsatz des Werkstoffs folglich ein Mittel, um in der Fahrzeugkarosserie signifikant Gewicht einzusparen und dadurch den CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge zu verringern. Neben dem genannten Vorteil für das Produkt stellt der Werkstoff Aluminium die Fertigung jedoch vor Herausforderungen. Insbesondere das Laserstrahlschweißen als Füge-technologie ist anfällig, Fehlstellen in der Schweißnaht zu erzeugen und dadurch limitiert in seiner Anwendbarkeit für das Verbinden von Baugruppen aus Aluminium. Deshalb wird in dieser Arbeit das Laserstrahlschweißen bei gleichzeitiger Strahloszillation als Alternative zum konventionellen Schweißprozess vorgestellt. Diese ermöglicht es, die Aluminiumlegierung AlMgSi robuster zu fügen.

Eine Einschränkung des konventionellen Laserstrahlschweißens ist die zuverlässige Realisierung geringer Schweißtiefen bei dünnwandigen Fügepartnern. Der Schweißprozess unterliegt einem abrupten Schweißtiefenprung beim Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum Tiefschweißen. Demnach können Verbindungen zwischen dünnwandigen Blechen bisher nur mittels Durchschweißungen durch beide Fügepartner sichergestellt werden. Sofern Durchschweißungen zwingend vermieden werden müssen, kann mit Hilfe des neuartigen Verfahrens durch eine schnelle laterale Strahloszillation in Überlagerung mit der geradlinigen Vorschubbewegung zuverlässig eine geringe Schweißtiefe sichergestellt werden.

Darüber hinaus wird angestrebt, den Wirkungsgrad der Fertigung stetig zu verbessern. In diesem Zusammenhang trägt jede einzelne Fertigungsanlage zum Erreichen von Effizienzzielen bei. Insbesondere die Anlagen des Laserstrahlschweißens weisen Potenziale zur Verbesserung der Effizienz der Produktion auf. Aufgrund der schlechten Absorptionseigenschaften des Materials für die Laserstrahlung sind Laserstrahlschweißprozesse von Aluminium bisher mit geringen Wirkungsgraden behaftet. Durch das Laserstrahlschweißen mit Hilfe von Strahloszillation ist es gelungen, Wärme aus vorangegangenen Oszillationsschwingungen zu nutzen und so einen Tiefschweißprozess trotz hoher Strahlgeschwindigkeit in der schmelzflüssigen Phase des Materials zu ermöglichen. Die erhöhte Temperatur des Werkstücks führt dazu, dass weniger Laserenergie

zur Ausbildung einer Dampfkapillare benötigt wird. Entsprechend wurde untersucht, ob durch Laserstrahlschweißen mit Strahloszillation bei gleicher Laserleistung ein höheres Nahtvolumen als beim geradlinigen Laserstrahlschweißen generiert werden kann, sodass der Prozesswirkungsgrad gesteigert wird.

In der Fertigung werden die Zuverlässigkeit und die Qualität des Produkts heute unter anderem anhand der Ausprägung der Schweißnähte beurteilt. Zumeist werden mit dem Laserstrahl erzeugte Schweißnähte in sicherheitsrelevanten Bereichen gesetzt, sodass hohe Anforderungen an die Festigkeit gegeben sind. Imperfektionen wie Poren reduzieren das Nahtvolumen, verringern die Anbindefläche und mindern gleichzeitig die Festigkeit der betroffenen Naht. Deshalb wurden für diese Arbeit mittels moderner Hochgeschwindigkeitsröntgentechnik Methoden validiert, um das Zurückbleiben von Prozessporen in der Schweißnaht zu unterbinden. Insbesondere durch eine zirkulare Strahloszillation wurden entstandene Blasen beim wiederholten Überfahren mit dem Strahl während der nachfolgenden Oszillationsschwingungen durch die Kapillare wieder entgast. Eine Steigerung der Oszillationsfrequenz führte dazu, dass Blasen beim Schweißen gar nicht erst entstanden.

Neben der Reduktion der Festigkeit durch Masseverlust in der Naht verursachen Fehler wie Spritzer zudem eine nennenswerte Verunreinigung der Bauteile und der Anlagenperipherie. Folglich müssen Bauteile, Vorrichtungen und Schweißoptiken unter hohem Zeitaufwand in Verbindung mit signifikanten Kosten für nachfolgende Prozesse gereinigt werden. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit gezeigt, wie mit Hilfe von Strahloszillation beim Schweißen von Aluminiumlegierungen das Ablösen von Spritzern reduziert werden kann. Zum einen wurden Spritzer durch eine laterale Strahloszillation vorwiegend senkrecht zur Vorschubrichtung abgelöst, zum anderen wurde das Spritzervolumen verringert, sodass die Schweißoptik nachhaltig vor starker Verunreinigung geschützt wird und somit die Anlagenverfügbarkeit steigt.

Eine weitere Begrenzung der Einsatzmöglichkeit des Laserstrahlschweißens von Aluminium ist die hohe Anfälligkeit der erzeugten Schweißnähte gegenüber Heißrissen. Nach dem Stand der Technik wird den Auswirkungen von Heißrissen durch das Auflegieren der Prozesszone unter Verwendung von Zusatzwerkstoffen entgegengesteuert. Die Ursache der Heißrissentstehung ist unter anderem eine grobkörnige Ausbildung der Kornstruktur in der erstarrenden Schweißnaht. Die Folge ist, dass sich zwischen den Körnern vergleichsweise lange Korngrenzen ausbilden, an denen sich verstärkt Risse ausbreiten können. Im Gegensatz dazu hemmen feine Körner mit gleichzeitig vielen kurzen Korngrenzen die Rissausbreitung.

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie durch das Laserstrahlschweißen mit Strahloszillation die Abkühlbedingungen so verändert werden können, dass sich die Kornstruktur feinkörnig äqui-axial ausbildet, um gezielt Heißrisse zu unterdrücken.

Die schließlich aus dieser Arbeit abgeleiteten Maßnahmen und Handlungsempfehlungen ermöglichen es auch für Aluminiumwerkstoffe, einen zuverlässigen Laserstrahl-Remoteschweißprozess zu definieren. Das Laserstrahlschweißen mit Hilfe von Strahloszillation führt zu einer Erhöhung der Schweißnahtqualität durch die Verringerung von Fehlstellen bei gleichzeitiger Verbesserung der metallurgischen Eigenschaften.

Mit der Prozessgestaltung wird das bisherige Anwendungsspektrum des Laserstrahlschweißens erweitert und die eingebrachte Energie effizienter im Bauteil umgesetzt. Entsprechend wird in der vorliegenden Arbeit beschrieben, dass Laserstrahlschweißen verbunden mit Strahloszillation weitreichende Vorteile für die Materialbearbeitung der Aluminiumlegierung AlMgSi mit sich bringt.

Extended Abstract

In recent years, aluminum has found its way into the automotive industry due to its lightweight construction potential. The ratio of low density to high strength reduces the weight of aluminum-based vehicles whilst concomitantly improving its performance. However, the use of aluminum imposes challenges for the joining technologies. In particular, the laser beam welding process is characterized by several instabilities. The aim of the present work is to describe how the weldability of the aluminum alloy AlMgSi can be improved using laser beam oscillation.

Laser beam welding can be performed in two different modes. By heat-conduction welding, the work piece is heated by a single absorption of the laser radiation on its surface. Accordingly, this results in the formation of a lenticularly shaped melt pool due to heat conduction resulting in small welding depths. During deep-penetration welding, a vapor capillary is formed and the welding depth reaches deeper into the work piece. The transition from heat-conduction welding to deep-penetration welding is characterized by a sharp increase of the welding depth. Therefore, thin sheet metal combinations can only be reliably joined with through-welds.

However, if through-welds are to be avoided due to quality requirements, conventional laser beam welding is limited in its applicability. In order to generate low welding depths by means of deep-penetration welding, reliable weld seams have been successfully carried out based on a beam oscillation lateral to the feed direction. The comparatively high beam velocity ($v_B > 20 \text{ m/min}$) during the beam oscillation leads to a reduction of the distinct step of the welding depth at the transition from heat-conduction welding to deep-penetration welding. As an advantage, welding depths can be chosen as required so that the operators are not restricted to the welding depths depending on the process mode.

It was also investigated, if laser beam welding by means of lateral beam oscillation would be of advantage to the process efficiency. The lateral beam movement benefits from heat deposited during previous oscillations that preheats the work piece. Therefore, the oscillating beam interacts with material that has an elevated temperature, which usually exceeds the melting temperature. As a result, less laser energy is required to

form a capillary at high beam velocities. Altogether, it was investigated, if a higher molten volume would be generated and if the efficiency of the process would be increased.

However, it is shown that the process by means of beam oscillation does not provide any significant potential in terms of process efficiency compared to the conventional laser beam welding process.

Besides the basic applicability of laser beam welding of aluminum, the evaluation of weld seams in production environment is subject to strict quality criteria with regard to imperfections such as pores and spatters. For instance, pores significantly reduce the strength of the joint due to the smaller load-bearing cross section of the weld seam. However due to constrictions of the capillary, pores during laser beam welding of aluminum are formed on a regular basis. During the welding process, bubbles are separated from the capillary and moved into the liquid melt pool. Accordingly, a bubble remains as a pore in the solidified weld seam, when it does not leave the weld pool through the surface.

Welding with beam oscillation is a possibility to reduce pore formation. Especially with circular beam oscillation, it was found that previously formed bubbles can degas through the capillary during a subsequent beam oscillation. On the basis of this approach, weld seams without pores were obtained by providing high strengths due to a large joining cross section. In contrast, longitudinal beam oscillation has been found to increase the pore volume in the weld seam. The movement against the feed direction leads to a reduction of the beam velocity and thus to an excessive evaporation in the rear turning point. As a result, the bubbles became increasingly detached and were inflated through repeated movements of the capillary into the bubble.

As an additional defect in laser beam welding, spatters not only reduce the strength of the seams but also contaminate components, welding optics and fixtures. In production environment, components and systems have to be cleaned for the following processes with a considerable amount of rework which is associated to high costs. By means of beam oscillation, the separation of spatters can be significantly reduced. Alongside a weld seam of 200 mm, the spatter volume was less than half when welding was carried out by means of beam oscillation compared to rectilinear welding. Simultaneously, the oscillation pattern influenced the direction of the spatter release. Lateral beam oscillation leads to spatters mainly detaching to the side and thus protecting the laser optics from contaminations. A circular oscillation reduced the height of the release of spatters, whereby they detached uncontrolledly into all directions.

Another limitation for laser beam welding of aluminum is its high susceptibility to hot cracking. Until now, welding processes for aluminum have been carried out by using complex tactile filler wire feeding. The aim of the filler material is to alloy the material in order to prevent defects such as hot-cracking. The cause of hot-cracking mainly lies in the grain structure of the weld seam. A coarse, oriented-dendritic solidification within the weld seam results in long grain boundaries, which promote the growth of cracks. The susceptibility to hot-cracking can be reduced by creating a fine, equi-axial grain structure in the weld seam. A fine granularity distributes stresses and strains over several grain boundaries. It was possible to guarantee a reliable formation of the equi-axial grain structure by means of a wide beam oscillation in order to prevent hot-cracking.

In conclusion, this thesis states that laser beam welding by means of beam oscillation is advantageous for the aluminum alloy AlMgSi. The innovative process design specifically prevents defects and enables to produce weld seams of highest quality.

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

Gorritz, 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

Plaaß, Wilfried

Zerstörschwellen 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

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

Raiber, Armin

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Schittenhelm, Henrik

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

Stewen, Christian

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

Schmitz, Christian

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

Karszewski, Martin

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

Chang, Chin-Lung

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

Haag, Matthias

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

Bahn Müller, Jochen

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

Schellhorn, Martin Carl Johannes

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

Angstenberger, Birgit

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

Bachhofer, Andreas

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

Breitschwerdt, Sven

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

Mochmann, Gunter

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

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des 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

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
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 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 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

Tilman Froschmeier-Hans

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

Moritz Vogel

Specialty 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

Fluidynamische 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 Heißrisen 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 978-3-8316-4643-2

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

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

Michael Diez

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzfluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

Martin Rumpel

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

Michael Eckerle

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

Martin Stubenvoll

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

Christian Hagenlocher

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

Florian Fetzer

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahlieferschweißen mittels reduzierter Modelle.
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

Christian Röhler

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

Martin Sommer

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung
AlMgSi mittels Strahloszillation

2021, 114 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6