

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißbrissen beim Remote- Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016

von Dr.-Ing. Peter Stritt
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. Thomas Graf
1. Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth
2. 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., 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 2016

ISBN 978-3-8316-4555-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Kurzfassung der Arbeit	11
Abkürzungen	13
Formelzeichen	15
Extended Abstract	19
1 Einleitung	23
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	23
1.2 Aufbau der Arbeit.....	27
2 Stand der Technik	29
2.1 Laserstrahlschweißen von Aluminium.....	29
2.1.1 Nahtfehler beim Schweißen von Aluminium	30
2.1.1.1 Wasserstoffporen.....	30
2.1.1.2 Prozessporen und Schmelzbadauswürfe	31
2.1.1.3 Heißrisse.....	31
2.2 Heißrisse beim Laserstrahlschweißen von Aluminium.....	32
2.2.1 Definition von Heißrisen	32
2.2.2 Einflussfaktoren auf die Heißrisbildung	33
2.2.3 Theorien zur Beschreibung der Heißrisbildung	34
2.2.3.1 Metallurgisch basierte Theorien.....	35
2.2.3.2 Dehnungsbasierte Theorien.....	37
2.2.3.3 Spannungsbasierte Theorien	41
2.2.4 Bestehende Ansätze zur Vermeidung von Heißrisen.....	44
2.2.4.1 Metallurgische Beeinflussung	45
2.2.4.2 Thermische Beeinflussung	49
2.2.4.3 Mechanische Beeinflussung.....	51
2.3 Numerische Schweißsimulation	52
2.3.1 Bestehende numerische Modelle der Heißrisbildung	55

3	Numerische Modellierung	59
3.1	Prinzip der numerischen Prozessabbildung.....	59
3.1.1	Thermische Berechnungen.....	61
3.1.2	Gekoppelte strukturmechanische Berechnungen.....	62
3.1.3	Post-Process Auswertung.....	63
3.2	Werkstoffdatenbasis.....	63
3.2.1	Thermophysikalische Werkstoffeigenschaften.....	63
3.2.2	Strukturmechanische Werkstoffeigenschaften.....	67
3.3	Kalibrierung der Wärmequelle.....	71
4	Ergebnisse der Simulation	75
4.1	Temperaturfeldverteilung in Blechrandlage.....	75
4.2	Strukturmechanik in Blechrandlage.....	77
4.2.1	Verformungen.....	78
4.2.2	Lokale Dehnungen.....	79
4.2.3	Berücksichtigung der Schmelzeeigenschaften.....	81
4.3	Zeitliche Effekte beim Laserstrahlschweißen.....	83
4.3.1	Entwicklung der Temperaturfeldverteilung in Blechrandlage.....	83
4.3.2	Zeitliche Entwicklung der Strukturmechanik in Blechrandlage.....	87
5	Heißrisskriterium	91
5.1	Definition der Rissneigungsenergie.....	91
5.2	Zeitlicher Verlauf der Rissneigungsenergie.....	94
5.3	Randabstandsvariation zur Ermittlung der kritischen Rissneigungsenergie..	97
6	Experimentelle Validierung der Simulation	99
6.1	Thermografieanalyse der Wärmeausbreitung in Blechrandlage.....	99
6.2	Zeitliches Verhalten der Heißrissneigung in Experiment und Simulation...	101
6.3	Rissanfällige Versuchsprobe - Diagnostik und Simulation.....	103
7	Optimierte Bearbeitungsstrategien zur Rissminimierung	109
7.1	Geeignete Prozessparameterwahl.....	109
7.1.1	Einfluss der Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit.....	109
7.1.2	Einfluss der Fokussierung der Laserstrahlung.....	116
7.2	Geeigneter Randabstand.....	120

7.3	Angepasste Spannsituation.....	122
7.4	Modulation der Laserleistung.....	126
7.4.1	Auswahl geeigneter Modulationsformen.....	127
7.4.2	Sinusförmige Leistungsmodulation	130
7.4.3	Stufenförmige Leistungsmodulation.....	135
7.4.4	Leistungsmodulation mit koaxialer Rückreflexmessung.....	139
7.5	Endrampengestaltung gegen Endkraterrisse	145
7.6	Stepp-Strategie	147
8	Übertragbarkeit auf industrielle Fertigung	157
8.1	Festigkeitsanalyse.....	157
8.2	Strategien zur Produktivitätssteigerung	158
9	Zusammenfassung	163
10	Literaturverzeichnis	167
	Danksagung	185

Kurzfassung der Arbeit

Aluminium ist als Leichtbauwerkstoff in den verschiedensten industriellen Bereichen unverzichtbar. Insbesondere beim Fahrzeug- und Flugzeugbau wird dieser Werkstoff aufgrund seines Verhältnisses von Festigkeit zu Dichte häufig eingesetzt. Für die Produktionskette aus einzelnen Aluminium-Komponenten hin zu komplexen Strukturen ist die Fügbarkeit der Komponenten eine notwendige Voraussetzung. Das Laserstrahlschweißen hat sich dabei als Verfahren zum Fügen von Aluminium etabliert.

Gleichwohl sind bei Verwendung hochfester magnesium- und siliziumhaltiger Aluminiumlegierungen dem Laserstrahlschweißprozess einige Restriktionen gesetzt. So muss zur Vermeidung von Heißrissen dem Schweißprozess Zusatzwerkstoff lokal zugeführt werden. Die komplexe Handhabung dieses Zusatzwerkstoffs in Drahtform ist aufwendig und zeitintensiv. Daher wird eine schnellere Positionierung des Laserstrahles durch einen Remote-Schweißprozess ohne Zusatzwerkstoff angestrebt.

Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit Ansätze behandelt, welche eine Vermeidung von Heißrissen in Randnähe ohne die Verwendung eines Zusatzwerkstoffs ermöglichen.

Wie sich aus numerischen Betrachtungen ableiten lässt, liegt, insbesondere beim Prozessstart des Laserstrahlschweißens, eine verminderte mechanische Belastung der Erstarrungszone vor, was auch experimentell direkt mit einer rissfreien Schweißnahtzone zum Prozessstart korreliert. Aus dieser Kenntnis lassen sich zwei wesentliche Strategien ableiten, die es ermöglichen, die Heißrissneigung zu senken. Dies ist zum einen das Schweißen unter Verwendung von modulierter Laserleistung. Zum anderen bietet sich die Möglichkeit mittels Stepp-Strategie heißrissfreie Schweißnähte in Randnähe zu erzeugen. Hierzu werden kurze Steppnähte mit zeitlichem Versatz räumlich derart überlagert, dass der für Endkraterisse anfällige Endbereich erneut überschweißt wird. Die so erzeugten nahtmittenrissfreien Schweißnähte entsprechen nachweislich den gängigen Qualitäts- und Festigkeitsanforderungen.

Beide Verfahren bieten die Möglichkeit einer Umsetzung mittels Remote-Technik. Gegenüber der Verwendung eines Zusatzwerkstoffs zum Schweißen von Aluminium eröffnen die entwickelten Ansätze die für Remoteverfahren typischen Vorteile geringerer Produktionszeiten bei geringeren Kosten und erhöhter Flexibilität.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Im Zeitalter der Globalisierung ist eine Zunahme der Mobilität als weltweiter Trend zu verzeichnen [1][2]. Dies hat sowohl Auswirkungen auf den Personentransport als auch auf den Güterverkehr. Um die dabei entstehenden ökologischen und wirtschaftlichen Belastungen zu reduzieren, sind rohstoffschonende und emissionsarme Zukunftslösungen nötig, welche sowohl auf die Produkte als auch auf deren Produktionsprozesse angewandt werden können.

Ein Ansatz zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs und somit der entstehenden CO₂-Emission im Transport- und Verkehrswesen, ist eine Gewichtsreduktion der Transportmittel. Die positiven Auswirkungen sind dabei der Tatsache geschuldet, dass die drei im Fahrbetrieb auftretenden Widerstände, der Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand, direkt proportional zur Fahrzeugmasse sind [3]. Dies führt dazu, dass neben den genannten Energieeinsparungen auch eine Verbesserung der fahrdynamischen Eigenschaften zu erwarten ist. Es besteht demnach aktuell großes Interesse, den Leichtbau in Kraftfahrzeugen voran zu treiben und somit bei geringerem Fahrzeuggewicht gleichwertige oder verbesserte Leistungseigenschaften zu erzielen [4].

Im Sinne einer ganzheitlichen Verknüpfung der drei Leichtbauprinzipien Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau findet der Werkstoff Aluminium zunehmend Anwendung [5]. Hierbei rührt das Leichtbaupotenzial aus einem funktionsoptimierten Einsatz dieses Werkstoffs mit angepassten Konstruktionen. Bild 1.1 veranschaulicht in einer Gegenüberstellung von Aluminium mit Magnesium und Stahl die wesentlichen mechanischen Werkstoffeigenschaften anhand des Beispiels eines einseitig belasteten und einseitig fixierten Biegebalkens.

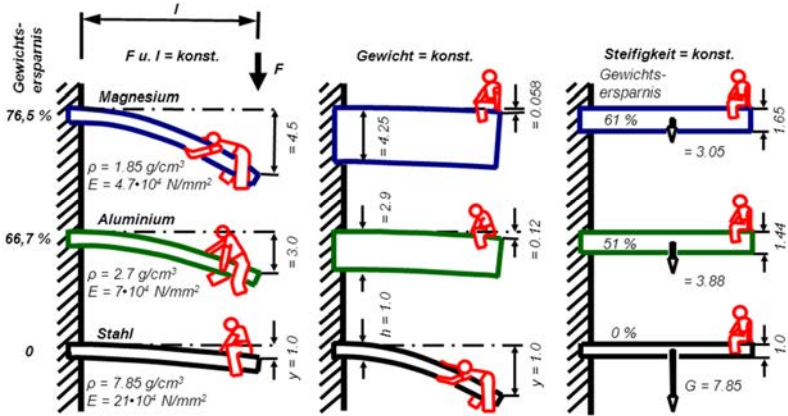


Bild 1.1: Veranschaulichung des Leichtbaupotenziales von Aluminium [6].

Verglichen mit Stahl betragen die Werte des charakteristischen Elastizitätsmoduls E und der Dichte ρ von Aluminium rund ein Drittel. Bei identischer Bauweise und Bauteilmaße folgt daher eine schlechtere mechanische Widerstandsfähigkeit eines Biegebalkens aus Aluminium oder Magnesium (links in Bild 1.1 dargestellt) gegenüber einer Ausführung des Biegebalkens mit Stahl.

Aufgrund des physikalischen und formellen Zusammenhanges zwischen der Steifigkeit gegen Biegebelastung S_B und der Bauteilform nach

$$S_B = E \cdot \frac{b_B \cdot h_B^3}{12} \quad (1)$$

[7] führt eine erhöhte Bauteilform h_B zu einer größeren Biegesteifigkeit S_B mit b_B als Breite des Balkens.

So lässt sich – infolge der geringeren Dichte von Aluminium gegenüber Stahl – analog zur mittleren Spalte in Bild 1.1 bei gleichem Bauteilgewicht eine erhöhte Biegesteifigkeit erzielen. Besonders positiv wirkt sich hierbei aus, dass die Biegesteifigkeit S_B mit der dritten Potenz der Höhe des Biegebalkens h_B zunimmt. Für diese sogenannte Biegebelastung bedeutet dies, dass durch den Einsatz von Aluminium rund die Hälfte des Gewichts gegenüber einer Stahl-Bauweise eingespart werden kann, wie in der rechten Spalte in Bild 1.1 verdeutlicht.

Verglichen mit Magnesium, welches ein noch geringeres Leistungsgewicht besitzt, hebt sich Aluminium durch weitere Vorteile wie Verfügbarkeit (Aluminium ist nach

Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element der Erdkruste und an ihrem Aufbau mit ca. 8% beteiligt) sowie gute Recyclingfähigkeit ab [5]. Für den Recyclingprozess von Aluminium müssen lediglich 5% der benötigten Primärenergie zur Herstellung von Aluminium aufgewendet werden. Das Resultat ist eine hohe Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses von Aluminium, was eine ökologisch positive Kreislaufwirtschaft fördert. So sind heute noch 75% des seit 1888 produzierten Aluminiums in Nutzung und 60% des eingesetzten Aluminiums in der Automobilindustrie bestehen aus Sekundäraluminium [8]. Da die Bedeutung der Recyclingfähigkeit von Werkstoffen weiter zunehmen wird, bleibt auch in Zukunft die Attraktivität des Werkstoffs Aluminium erhalten und sein Einsatz in neuen Produkten und Produktionsstätten gesichert.

Obgleich die mechanischen und thermischen Werkstoffeigenschaften von Aluminium aus den beschriebenen Gründen der Umsetzung von Leichtbauprojekten zuträglich sind, stellen die mechanischen und thermischen Eigenschaften, wie beispielsweise die hohe Wärmeleitfähigkeit, eine Herausforderung an die eingesetzten Fügeverfahren dar.

Ein weit verbreitetes Verfahren zum hochautomatisierten thermischen Fügen des Leichtbauwerkstoffs Aluminium, stellt das Laserstrahlschweißen dar [9][10][11][12]. Hierbei gelten für die häufig verwendeten AlMgSi-Knetlegierungen bislang einige Restriktionen. Neben dem fokussierten Laserstrahl ist – Stand der Technik – die Verwendung eines Zusatzwerkstoffs erforderlich, um der Entstehung von Heißrisen entgegenzuwirken. Dieser Zusatzwerkstoff muss der Schmelze lokal zugeführt werden, was die effiziente Anwendung von Remote-Laserstrahlverfahren, bei denen der Laserstrahl über Spiegel sehr schnell auf dem Bauteil positioniert wird, verhindert. Das Resultat sind unerwünscht lange Positionier- und Nebenzeiten in der Produktion.

Die beiden genannten Laserstrahlverfahren des taktill geführten Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff und einer Remote-Anwendung sind in Bild 1.2 vergleichend dargestellt.

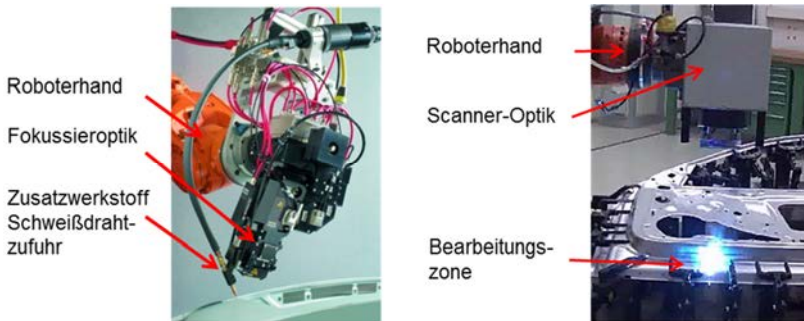


Bild 1.2: Links: Taktill geführtes Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff [13].
Rechts: Remote-Laserstrahlschweißen von Aluminium.

Die Umsetzung eines Remote-Laserstrahlschweißverfahrens, welches beim Fügen von Stahlwerkstoffen bereits erfolgreich eingesetzt wird, ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht äußerst erstrebenswert. So zeigen die positiven Erfahrungen mit Remote-Verfahren beim Schweißen von Stahlwerkstoffen, dass neben einer erhöhten Flexibilität und Adaptionfähigkeit des Fügeprozesses, die Reduktion unproduktiver Nebenzeiten bei geringeren Betriebskosten erzielt werden kann [14][15][16].

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieser Arbeit, das Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen von Aluminium, insbesondere im Hinblick auf das Auftreten von Heißrissen, zu erweitern. Die definierte Rissneigungsenergie soll in diesem Zusammenhang als Kenngröße der Rissensibilität dienen und eine Beurteilung des Einflusses diverser Prozessgrößen sowie mechanischer Rahmenbedingungen auf die Heißrissbildung ermöglichen. So werden im Rahmen der Arbeit verschiedene Parametereinflüsse wie beispielsweise die Auswirkungen veränderter Fokussierbedingungen, variiert Randabstände und Laserleistung auf die Heißrissneigung erörtert.

Aus den so erlangten Prozesskenntnissen können schließlich Handlungsempfehlungen und Maßnahmen abgeleitet werden, die eine Vermeidung von Heißrissen ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoffen ermöglichen.

Die entwickelten Ansätze werden zudem hinsichtlich ihrer Eignung zur industriellen Serienproduktion beurteilt. Abschließend ist somit ein Vergleich zwischen dem aktuellen Stand der Technik, dem Laserstrahlschweißen von Aluminium mit Zusatzwerkstoff und den erarbeiteten Perspektivverfahren, dem Schweißen mit modulierter Laserleistung und der Stepp-Schweißstrategie, möglich.

1.2 **Aufbau der Arbeit**

Im Rahmen einer Einführung zum Stand der Technik beim Laserstrahlschweißen von Aluminium wird auf Besonderheiten dieses Fügeverfahrens hingewiesen und auf typische Nahtfehler wie Porenbildung, Schmelzbadauswürfe und Rissentstehung eingegangen.

Die Rissproblematik wird im Anschluss in Bezug auf die Heißrissbildung anhand von bestehenden metallurgisch basierten, dehnungsbasierten und spannungsbasierten Theorien betrachtet. Zudem wird in diesem Abschnitt eine strukturierte Auflistung und Beurteilung vorhandener Ansätze zur Vermeidung der Heißrissbildung vorgestellt.

Da die bekannten Lösungsansätze eng mit thermischen und strukturmechanischen Effekten verbunden sind, findet eine eigens entwickelte Prozessabbildung des Laserstrahlschweißens in Randnähe durch die Finite-Elemente-Methode statt. Aus der hiermit modellierten Temperaturfeldverteilung können das Erstarrungsgebiet der Schmelze beim Schweißen sowie in einem weiteren Rechenschritt die resultierenden Spannungen und Dehnungen in diesem Erstarrungsbereich berechnet werden. Die Kenntnis dieser Größen trägt wesentlich zum Prozessverständnis bei und ermöglicht die Entwicklung eines Heißrisskriteriums. Die experimentelle Validierung dieses Kriteriums ist Gegenstand der Untersuchungen in den darauf folgenden Kapiteln.

Letztlich ermöglicht das vorab definierte Heißrisskriterium die Beurteilung des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Heißrissbildung sowie die Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Umsetzung des rissfreien Remote-Laserstrahlschweißens von Aluminium.

In diesem Zusammenhang werden zwei Maßnahmen detailliert vorgestellt: Das Laserstrahlschweißen mit modulierter Laserleistung sowie das Laserstrahlschweißen mit Stepp-Strategie. Unter Berücksichtigung der Auswirkung der Spannsituation und Laserstrahlabbildung auf die Heißrissneigung wird eine geeignete Maßnahmenkombination zur Vermeidung von Heißrissen erörtert.

Abschließend findet eine wirtschaftliche Beurteilung der entwickelten Prozessstrategie zum Remote-Laserstrahlschweißen von Aluminium mittels Stepp-Strategie ohne Zusatzwerkstoff im Vergleich zum bislang üblichen Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff statt. Das Potenzial der Stepp-Strategie hinsichtlich eines industriellen Einsatzes wird beurteilt und die wirtschaftliche Bedeutung aufgezeigt.

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

Plaß, 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

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 Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

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

Huonker, Martin

Strahlführung in 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.

Leistungskalierbares 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 Nahteigen-schaften 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

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