

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften

von Dr.-Ing. Michael Jarwitz
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens

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 2020

ISBN 978-3-8316-4882-5 (gebundenes Buch)
ISBN 978-3-8316-7615-6 (E-Book)

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	9
Kurzfassung der Arbeit	17
Extended Abstract	21
1 Einleitung	25
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	25
1.2 Aufbau der Arbeit.....	27
2 Fügen von Nickelschaum an Nickelblech.....	29
2.1 Einleitung und Stand der Technik zum Laserstrahlschweißen von Metallschäumen.....	29
2.2 Herausforderungen beim Fügeprozess	30
2.3 Prozessstrategie	35
2.4 Abschätzung von Leistungsbedarf und Prozessparametern	40
2.4.1 Erforderliche Prozessleistung	42
2.4.2 Abschätzung der Prozessparameter für den Fügeprozess.....	45
2.4.2.1 Analytisches Modell für den Energieeintrag durch den bewegten Laserstrahl.....	45
2.4.2.2 Temperaturverteilung in der Fügezone	54
2.5 Experimentelle Untersuchung des Fügeprozesses	57
2.5.1 Laserstrahlschweißen von Nickelblech	57
2.5.2 Laserstrahlschweißen von Nickelschaum an Nickelblech.....	66
2.6 Experimentelle Untersuchung der Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) im Nickelschaum.....	73

2.7	Theoretische Untersuchung der Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum....	77
2.7.1	Analytisches Modell für die Ausdehnung der WEZ beim Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften	77
2.7.1.1	Temperaturfeld am Interface	80
2.7.1.2	Temperaturfeld im Fügepartner mit geringem thermischen Ansprechvermögen.....	80
2.7.2	Anwendung des Modells zur Bestimmung der Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum	83
2.7.2.1	Temperatur am Interface	84
2.7.2.2	Temperatur im Nickelschaum	85
2.7.2.3	Überprüfung der Voraussetzungen für die Anwendung des Modells	87
2.7.2.4	Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum.....	88
3	Fügen von Aluminium an Kupfer.....	92
3.1	Einleitung und Stand der Technik zum Laserstrahlschweißen von Aluminium-Kupfer Mischverbindungen	92
3.2	Herausforderungen beim Schweißprozess.....	94
3.3	Prozessstrategie.....	96
3.4	Experimentelle Untersuchung des Schweißprozesses	103
3.4.1	Schweißen ohne räumliche Strahloszillation	107
3.4.2	Schweißen mit räumlicher Strahloszillation	110
3.4.3	Nahtgeometrie als Funktion der Oszillationsparameter.....	113
3.4.4	Gemittelter Cu-Anteil als Funktion der Nahtgeometrie.....	117
3.4.5	Elektrischer Widerstand als Funktion der Nahtgeometrie	120
3.4.6	Korrelation von elektrischem Widerstand und mechanischer Festigkeit	122

3.4.7	Schweißen mit räumlicher Strahloszillation und lokaler Leistungsanpassung	123
4	Zusammenfassung	129
5	Literaturverzeichnis.....	135
	Danksagung.....	144

Kurzfassung der Arbeit

Um die steigenden Produktanforderungen erfüllen zu können, werden die einzelnen Bauteile eines Produkts immer häufiger maßgeschneidert entsprechend ihrer Funktion optimiert. Der Einsatz unterschiedlicher Materialien innerhalb eines Produkts bietet dabei ein großes Potential zur Optimierung der Funktionseigenschaften des Produkts. Daher nimmt der Materialmix innerhalb von Produkten immer weiter zu, und mit ihm auch der Bedarf an geeigneten Füge-technologien. In diesem Zuge gewinnt auch das Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften an Bedeutung.

Beim Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften stellen diese Eigenschaften jedoch eine besondere Herausforderung für den Fügeprozess dar. Sie bestimmen zum einen wie die eingebrachte Wärme im Bauteil verteilt wird, und zum anderen wie groß der Energie- beziehungsweise Leistungsbedarf zur Erzeugung eines bestimmten Prozessvolumens ist. In der Fügezone (am Interface) zwischen den beiden Fügepartnern ändern die thermophysikalischen Eigenschaften schlagartig beim Übergang vom einen Fügepartner zum anderen. Daher ändern in der Fügezone auch schlagartig sowohl die Verteilung der eingebrachten Energie, als auch der erforderliche Energiebedarf. Dies erfordert einen lokal gezielten Energieeintrag, um die für den Fügeprozess benötigte Temperaturverteilung in der Fügezone und deren direkter Umgebung zu generieren.

Der Laser ist hierfür prinzipiell ein gut geeignetes Fügewerkzeug, aufgrund seiner Vorteile, wie einer zeitlich und räumlich gezielten Energieeinbringung und seiner hohen Flexibilität. Ohne geeignete Prozessstrategien sind die vorteilhaften Eigenschaften des Lasers alleine jedoch meist nicht ausreichend, um die Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften erfolgreich zu meistern. Daher lautet die Hypothese der vorliegenden Arbeit:

Durch die gezielte Einstellung der lokal eingebrachten Energie und deren Verteilung, mittels an die jeweilige Fügeaufgabe angepasster Prozessstrategien, kann das Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften realisiert werden.

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung und Umsetzung solcher prozessangepassten Strategien für die gezielte Energieeinbringung beim Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften. Dies wird anhand zweier Beispiele mit den dominierenden physikalischen Effekten Wärmeleitung und Konvektion demonstriert:

- Das Fügen von Nickelschaum an Nickelblech (Wärmeleitung), und
- Das Fügen von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen (Konvektion).

Für das Laserstrahlschweißen von Nickelschaum an Nickelblech wird eine Überlapp T-Stoß Konfiguration betrachtet, mit dem Nickelblech als oberem und dem Nickelschaum als unterem Fügepartner. Beide Fügepartner bestehen aus Reinnickel R-Ni99,2 und weisen verhältnismäßig kleine Abmessungen auf. Das Nickelblech hat eine Dicke von 0,3 mm und der Nickelschaum hat eine Breite von 0,135 mm. Der offenporige Nickelschaum besitzt darüber hinaus sehr kleine Strukturelemente mit typischen Strukturgrößen von wenigen 10 μm bis zu wenigen 100 μm . Aufgrund dieser geringen Strukturgrößen des Schaums besteht die Gefahr der Zerstörung der Schaumstruktur während des Schweißprozesses. Darüber hinaus kommt es beim Einsatz organischer Beschichtungen auf dem Nickelschaum beim Überschreiten von bereits vergleichsweise geringen kritischen Temperaturen (von etwa 140 $^{\circ}\text{C}$ – 300 $^{\circ}\text{C}$, im Vergleich zur Schmelztemperatur von Nickel von 1455 $^{\circ}\text{C}$) zur Ausbildung einer wärmebeeinflussten Zone (WEZ), wodurch die nutzbare, beschichtete Fläche reduziert wird.

Für das Laserstrahlschweißen von Aluminium (Al) an Kupfer (Cu) wird ebenfalls ein Überlappstoß als Fügeanordnung untersucht. Hierzu wird reines Al (Al99,5) und reines Cu (Cu-OF) mit Blechdicken von jeweils 1 mm verwendet. Beim Laserstrahlschweißen von Al an Cu stellen neben den unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften der beiden Fügepartner vor allem die sich während des Schweißprozesses ausbildenden intermetallischen Phasen eine große Herausforderung dar. Die meisten dieser intermetallischen Phasen weisen eine höhere Sprödigkeit, geringere Festigkeit und einen höheren spezifischen elektrischen Widerstand auf, als die beiden Ausgangsmaterialien. Daher beeinflussen die intermetallischen Phasen sowohl die elektrischen, als auch die mechanischen Eigenschaften der erzeugten Schweißnähte negativ und müssen so weit wie möglich minimiert werden.

Für beide Fügeaufgaben wurden Festkörperlaser mit einer Emissionswellenlänge um 1 μm eingesetzt.

Für beide Fügeaufgaben wurden aus den jeweiligen Anforderungen und Herausforderungen für den Fügeprozess die entsprechenden Anforderungen an die jeweils anzuwendende Prozessstrategie abgeleitet. Darauf basierend wurden dann geeignete Prozessstrategien abgeleitet und umgesetzt.

Für das Laserstrahlschweißen von Nickelschaum an Nickelblech wurde ein Keybowl-Schweißprozess ausgewählt und umgesetzt. Dieser ist durch eine einsetzende Verdampfung an der Schmelzbadoberfläche, die Ausbildung einer Vertiefung mit Aspektverhältnis < 1 und gleichzeitig stabiler Einschweißtiefe gekennzeichnet. Hierdurch kann eine durchgängige Durchschweißung durch das Nickelblech, ohne Öffnung der Kapillare an der Blechunterseite, bei gleichzeitig kurzen Wechselwirkungszeiten erzielt werden. Mit einem solchen Keybowl-Schweißprozess konnte ein erfolgreiches Fügen von Nickelschaum an Nickelblech mit Vorschubgeschwindigkeiten von $v \geq 5$ m/min bei einem Fokussdurchmesser von $d_f = 300$ μm demonstriert werden.

Für die theoretischen Untersuchungen der Ausdehnung der WEZ im Nickelschaum wurde in dieser Arbeit ein analytisches Modell für das Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften aufgestellt. Die Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit zeigten eine Abnahme der Ausdehnung der WEZ mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Es zeigte sich jedoch auch, dass bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten ab etwa $v \geq 25$ m/min nur noch mit einer geringfügigen Abnahme der Ausdehnung der WEZ zu rechnen ist und einer Skalierung der Prozessstrategie hin zu noch höheren Vorschubgeschwindigkeiten somit Grenzen gesetzt sind.

Für das Laserstrahlschweißen von Al an Cu wurde das Laserstrahl-tiefschweißen mit räumlicher Strahloszillation als Prozessstrategie ausgewählt und umgesetzt. Damit konnten die Nahtbreite am Interface und die Einschweißtiefe in das untenliegende Cu-Blech nahezu unabhängig voneinander eingestellt werden. Dies ermöglichte es sowohl große Anbindungsbreiten zu erzeugen, als auch das Mischungsverhältnis der beiden Fügepartner zu reduzieren, um die Ausbildung intermetallischer Phasen in der Schweißnaht gering zu halten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass ein hohes Verhältnis von Nahtbreite am Interface zu Einschweißtiefe in das Cu (Breite/Tiefe) vorteilhaft ist für die Erzeugung eines geringen elektrischen Widerstands. Die Nähte mit einem Verhältnis Breite/Tiefe > 4 weisen die geringsten elektrischen Widerstände auf. Gleichzeitig ist jedoch eine minimale Einschweißtiefe in das Kupfer von etwa 20 μm erforderlich, um

akzeptable Widerstandswerte zu erhalten. Durch den Einsatz räumlicher Strahloszillation mit konstanter Laserleistung konnte der elektrische Widerstand der erzeugten Schweißnähte um etwa 25 % reduziert werden (auf etwa $1,1 \mu\Omega$), im Vergleich zu den Widerständen der Schweißnähte, die ohne räumliche Strahloszillation erzeugt wurden. Durch eine lokale Anpassung der Laserleistung über den Oszillationszyklus, entsprechend $P_L/v_{\text{lokal}} = \text{konstant}$, konnte eine weitere Reduzierung des elektrischen Widerstands um 18 % (auf etwa $0,88 \mu\Omega$) demonstriert werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch den Einsatz angepasster Prozessstrategien für die gezielte Einstellung der lokal eingebrachten Energie und deren Verteilung das Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften erfolgreich realisiert werden kann. Anhand der beiden betrachteten Anwendungsbeispiele konnten konkrete Prozessstrategien hierfür aufgezeigt und deren erfolgreiche Umsetzung demonstriert werden. Somit ist der Ausgangspunkt für die Übertragung dieser Erkenntnisse auf die Entwicklung von Prozessstrategien für weitere Anwendungsfälle gegeben.

Extended Abstract

In order to meet the ever-increasing demands on products, the individual components of a product are more and more frequently tailored to their function. Since the use of different materials within a product offers great potential for optimizing the functional properties of the product, the material mix within the products increases, and with it the need for suitable joining technologies. In this context, laser beam welding of metals with different thermophysical properties is also gaining in importance.

For laser beam welding of metals with different thermophysical properties, these different thermophysical properties pose special challenges for the joining process. On the one hand, they determine how the supplied heat is distributed in the part and, on the other hand, how large the energy or power required for the generation of a certain process volume is. In the joining zone (at the interface) between the two joining partners, the thermophysical properties change abruptly at the transition from one joining partner to the other. Therefore, both the distribution of the supplied energy and the required energy also change abruptly in the joining zone. This requires a locally controlled energy input in order to generate the temperature distribution in the joining zone and its vicinity, which is required for the joining process.

In principle, the laser is a well suited joining tool for this due to its advantages, such as a temporally and spatially controlled energy input and its high flexibility. Without suitable process strategies, however, the advantages of the laser alone are usually not sufficient to successfully master the challenges of laser beam welding of metals with different thermophysical properties. Therefore, the hypothesis for the present thesis is:

Laser beam welding of metals with different thermophysical properties can be realized by the controlled adjustment of the locally supplied energy and its distribution by means of process strategies adapted to the respective joining task.

The aim of this work is to develop and implement such process-adapted strategies for the controlled energy supply during laser beam welding of metals with different thermophysical properties. This is demonstrated by the two examples with the dominating physical effects of heat conduction and convection:

- The joining of nickel foam sheets to solid nickel sheets (heat conduction), and
- the joining of aluminum-copper dissimilar joints (convection).

For laser beam welding of nickel foam sheets to solid nickel sheets, an overlap T-joint configuration is considered, with the solid nickel sheet as the upper joining partner and the nickel foam sheet as the lower joining partner. Both joining partners are made of pure nickel R-Ni99.2 and have comparatively small dimensions. The solid nickel sheet has a thickness of 0.3 mm and the nickel foam sheet has a width of 0.135 mm. The open-celled nickel foam has also very small structural elements with typical structure sizes of a few 10 μm to a few 100 μm . Due to these small structural sizes of the foam, there is a risk of destruction of this foam structure during the welding process. In addition, if organic coatings are applied on the nickel foam sheets, the heat-affected zone (HAZ) occurs typically at low critical temperatures (of about 140 $^{\circ}\text{C}$ – 300 $^{\circ}\text{C}$, compared to the melting temperature of nickel of 1455 $^{\circ}\text{C}$), which reduces the usable coated area.

For laser beam welding of aluminum (Al) to copper (Cu), an overlap joint is also considered as joint configuration. Pure Al (Al99.5) and pure Cu (Cu-OF) with sheet thicknesses of 1 mm each are used. In laser beam welding of Al to Cu, in addition to the different thermophysical properties of the two joining partners, the formation of intermetallic phases during the welding process poses a major challenge. Most of these intermetallic phases have a higher brittleness, lower strength and a higher specific electrical resistance than the base materials. Therefore, the formation of the intermetallic phases in the weld must be minimized in order to not adversely affect the properties of the weld joint.

For both joining tasks, solid-state lasers with an emission wavelength of around 1 μm were used.

For both joining tasks, the corresponding requirements for the process strategy to be applied were derived from the respective requirements and challenges for the joining process in each case. Based on this, suitable process strategies were then derived and implemented.

A keyhole welding process was selected and implemented for laser beam welding of nickel foam sheets to solid nickel sheets. Such a process is characterized by an onset of evaporation at the weld pool surface, the formation of a vapor depression with an aspect ratio of < 1 and a simultaneously stable welding depth. This allows a continuous full penetration welding through the solid nickel sheet without an opening of the capillary on the bottom side of the sheet and at the same time short interaction times. With such

a keybowl welding process a successful joining of nickel foam sheets to solid nickel sheets with feed rates of $v \geq 5$ m/min at a focus diameter of $d_f = 300$ μm could be demonstrated.

For the theoretical investigations of the extent of the HAZ in the nickel foam sheets an analytical model for laser beam welding of metals with different thermophysical properties was developed within this work. The results of the theoretical and experimental investigations of this work showed a decrease of the extension of the HAZ with increasing feed rate. However, it also turned out that at higher feed rates of about $v \geq 25$ m/min only a slight decrease of the extension of the HAZ is to be expected and therefore scaling of the process strategy towards even higher feed rates is limited.

For laser beam welding of Al to Cu, the selected and implemented process strategy was deep penetration welding with spatial oscillation of the laser beam. With this, the seam width at the interface and the welding depth into the lower Cu sheet can be adjusted almost independently of each other. This made it possible to create large joining widths and also to reduce the mixing ratio of the two joining partners in order to minimize the formation of intermetallic phases in the weld seam.

The results of the present work have shown that a high ratio of seam width at the interface to welding depth into the Cu (width/depth) is advantageous for the generation of a low electrical resistance. The weld seams with a width/depth ratio > 4 have the lowest electrical resistances. At the same time, however, a minimum welding depth into the copper of about 20 μm is required in order to obtain reasonable resistance values. By using spatial beam oscillation with constant laser power, the electrical resistance of the generated weld seams could be reduced by about 25 % (to about 1.1 $\mu\Omega$) compared to the resistances of the weld seams generated without spatial beam oscillation. By locally adjusting the laser power over the oscillation cycle, corresponding to $P_L/v_{\text{lokal}} = \text{constant}$, a further reduction of the electrical resistance by 18 % (to about 0.88 $\mu\Omega$) could be demonstrated.

The results of this work show that laser beam welding of metals with different thermophysical properties can be realized successfully by applying adapted process strategies for the controlled adjustment of the locally supplied energy and its distribution. On the basis of the two considered application examples specific process strategies for this could be presented and their successful implementation demonstrated. Thus, the starting point for the transfer of these findings to the development of process strategies for further applications is given.

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

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

Laserschweißtauglichkeit 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 3-519-06227-8

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

Pließ, 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 3-8316-0032-3

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 3-8316-0113-3

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 Alumi-
numguß- 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

Pulseenergiestabilität 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

Tilman Froschmeier-Hanss

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

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 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 Strahlweiche
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