

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung

von Dr.-Ing. Andreas Leitz
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

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 978-3-8316-4549-7

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Formelzeichen und Abkürzungen	7
Kurzfassung	9
Extended Abstract	10
1 Einleitung und Motivation	13
2 Stand der Wissenschaft und Technik	15
2.1 Kontaktierverfahren zur Erzeugung von Mischverbindungen.....	15
2.1.1 Mechanische Fügeverfahren.....	15
2.1.2 Thermische Fügeverfahren.....	18
2.2 Laserstrahlschweißen von Kupfer und Aluminium.....	26
2.2.1 Kupfer.....	26
2.2.2 Aluminium.....	31
2.2.3 Kupfer-Aluminium-Mischverbindung.....	34
3 Versuchsaufbau und -durchführung	40
3.1 Strahlquellen.....	40
3.2 Optische Systeme.....	40
3.3 Versuchswerkstoffe.....	43
3.3.1 Kupferwerkstoffe.....	43
3.3.2 Aluminiumwerkstoffe.....	44
3.4 Probengeometrie und -anordnung.....	45
3.5 Spannvorrichtung.....	46
3.6 Versuchsparameter.....	47
3.7 Analysemethoden.....	48
4 Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen	51
4.1 Schweißigenschaften von Kupferlegierungen.....	51
4.1.1 Leistungs- und Geschwindigkeitsvariation.....	51
4.1.2 Einflüsse Nickelbeschichtung.....	55
4.2 Schweißigenschaften von Aluminiumlegierungen.....	59
4.2.1 Leistungs- und Geschwindigkeitsvariation.....	59
5 Einflussgrößen beim Erzeugen von Cu-Al-Mischverbindungen	67
5.1 Probenanordnung und Material.....	67
5.1.1 Probengeometrie Cu ₃ /Al ₅ und Al ₅ /Cu ₃	68
5.1.2 Probengeometrie Cu ₁₀ /Al ₁₀ und Al ₁₀ /Cu ₁₀	79

5.2	Einfluss Fokusdurchmesser	87
5.3	Variation der Vorschubgeschwindigkeit.....	98
5.4	Variation der Fokusbildung	109
5.5	Prozessdiagnose mit Röntgenanlage	113
5.6	Ableitung von Strömungsmodellen	121
5.6.1	Theoretische Modelle für Geometrie Cu ₃ /Al ₅ und Al ₅ /Cu ₃	121
5.6.2	Theoretische Modelle für Geometrie Cu ₁₀ /Al ₁₀ und Al ₁₀ /Cu ₁₀	125
5.7	Auswertende Zusammenfassung	128
6	Charakterisierung der Verbindungseigenschaften	131
6.1	Festigkeitsuntersuchungen	131
6.2	Übergangswiderstand	138
6.3	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	142
7	Ansätze zur Qualitätssicherung	143
7.1	Kamerabasierte Schweißnahtüberprüfung	143
7.2	Spektrometrische Prozessüberwachung	145
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
9	Literaturverzeichnis	154

Kurzfassung

Mit Neuentwicklungen von Produkten gehen neue Herausforderungen, wie unter anderem die Wahl einer geeigneten seriellen Umsetzung einher. Dieser Aspekt kommt derzeit bei der Entwicklung von Alternativen Antrieben in der Automobilindustrie zum Tragen. Bestrebungen mechanische Verbindungen durch stoffschlüssige Kontaktierverfahren zu ersetzen und somit die Vorteile, wie beispielsweise höhere Festigkeiten, geringere Übergangswiderstände und kleinere realisierbare Bauräume zu nutzen, bringen das Werkzeug Laser ins Spiel. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt hierbei auf der Überlappkontaktierung der Werkstoffe Kupfer und Aluminium. Die unterschiedlichen physikalischen und metallurgischen Eigenschaften der Werkstoffe, interkristalline Sprödphasenbildung, sowie Rissneigung in der Schweißnaht verdeutlichen die auftretende Komplexität dieser Mischverbindung.

Neben der Anordnung der Materialien und der Probengeometrie zeigen speziell die Laserparameter Fokusdurchmesser und Vorschubgeschwindigkeit signifikante Auswirkungen auf den Schweißprozess. Mit Variation der Strahlquelle von Single-Mode Laser bis zu Multi-Mode Faser- und Scheibenlasern und unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben der eingesetzten Bearbeitungsoptiken konnten in dieser Arbeit die Einflüsse der Fokusgröße auf den Schweißprozess untersucht werden. Dabei stellen sich in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie unterschiedliche Fokusdurchmesser erfolgversprechend dar. Eine weitere positive Beeinflussung der Prozessstabilität kann durch eine geeignete Vorschubgeschwindigkeit erzielt werden. Hohe Schweißgeschwindigkeiten (> 10 m/min) im Zusammenspiel mit einem geeigneten Fokusdurchmesser ermöglichen ein seriell umsetzbares Prozessfenster mit einem geringen Durchmischungsgrad der Kupfer- und Aluminiumwerkstoffe und entsprechend reduzierten Anteilen von Sprödphasen. Dies führt in Summe zu einer metallurgisch gesehen stabilen Verbindung.

Eine große Bedeutung wird aufgrund des Einsatzgebiets dieser Verbindung der mechanischen Festigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit beigemessen. Eine Steigerung der Festigkeit durch Hinzufügen von Legierungselementen bringt meist Einbußen bei den elektrischen Leitfähigkeitswerten der Kontaktierung mit sich. Aus diesem Grund ist für eine geeignete Verfahrens- und Werkstoffauswahl zur Herstellung der Mischverbindung zwingend eine Gegenüberstellung der Festigkeits- und Leitfähigkeitswerten nötig.

Eine erfolgreiche serielle Umsetzung ist eng an ein, dem Fügeprozess angepassten, Verfahren zur Qualitätssicherung gekoppelt. In dieser Arbeit werden daher zwei Ansätze zur zerstörungsfreien Qualitätsüberwachung aufgezeigt. Das erste untersuchte Verfahren basiert auf der Auswertung der in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses von Kupfer und Aluminium unterschiedlich auftretenden Farbgebungen der Nahtoberfläche. Eine spektrale Überwachung des Schweißprozesses wird mit dem zweiten Verfahren realisiert und ermöglicht ebenso eine Aussage über das zugrunde liegende Mischungsverhältnis und somit über die Schweißnahtqualität.

Extended Abstract

New product developments are accompanied by challenges regarding an appropriate mass production. For the development of electric cars this aspect currently needs to be realized in automotive industry. Efforts to replace mechanical connections with welded connections offer the advantages of higher strength, lower contact resistance and smaller feasible design space. These advantages are likely to be solved by laser material processing. The main focus in the present work lies on overlap joining the materials copper and aluminum, which are known for their good electrical properties. The different physical and metallurgical properties of these materials, intergranular brittle behavior, and formation of cracks in the welded areas show the complexity of the mixing compound of copper and aluminum.

Initially the aim was to gain a deeper understanding of the laser beam welding process of pure copper and aluminum materials (not as mixtures) and to define the factors influencing the welding process. Starting with the observation of the laser welding of pure copper and aluminum materials, the basics were determined for further investigations. Various copper and aluminum alloys and their welding performances at different laser welding parameters were examined. The comparison of bare and nickel-coated copper surfaces shows a positive influence of the nickel layer on process stability and energy coupling. The coupling conditions of the laser are improved by the higher absorption of the nickel and the entire welding process shows a strong reduction of failures in the weld seam. On average an increase of the penetration depth of approximately 20% by the nickel coating was observed. To achieve comparable penetration depths in aluminum much lower laser power (factor of three lower) as compared to copper materials is required. A great increase of the feeding rate (> 50 m/min) causes changes in the flow conditions within the melt pool which leads to failures in the weld seam such as humping, melt pool ejections and grooves at the edge of the seam. In fact this applies for pure copper and pure aluminum.

Blending copper and aluminum materials by an integral contacting method causes undesirable material properties, such as brittle phases and distinctive increase in hardness. SEM and EDX images show that a mixing ratio in the weld seam from 30 to 70% copper to aluminum has to be regarded as critical. Local hardness increases up to 600 HV which corresponds to 10 times the average of the two pure materials. The associated increased risk of cracking highlights the dangers of a high mixing ratio of copper and aluminum. Hence, the goal is either to prevent or to minimize the formation of critical phases in the weld seam.

The information obtained for the pure copper and aluminum materials provides initial insights regarding useful welding parameters for the mixed combination of both materials. The choice of material on which the laser energy coupling takes place and which has to be at least melted on to the joining plane has a great influence on the welding result. The properties of the upper material are decisive factors regarding the beam coupling, the welding process itself and the

metallurgical mixture. If the copper material is positioned on the upper side of the specimen, generally more laser power is required for welding as compared to when aluminum lies above. This is due to the higher thermal conductivity, lower power absorption and the higher melting temperature of copper compared to aluminum. Form and characteristics of the weld seam and surface, as well as process stability also show strong dependencies of the sample assembly. Especially the thicker sample geometry Cu10/Al10 (Cu 1 mm, Al 1 mm) shows that a coupling of the upper aluminum material with respect to mixing and process reliability is advantageous. The higher melting point of copper is used in the lower part as a kind of heat sink, thus ensuring stable welding depths. In the reversed orientation an increased demand for energy to penetrate the copper material is necessary. The lower melting point of aluminum causes a sensitive behavior to process variations which can be seen among other things in different penetration depths inside one weld seam.

Yet another positive influence on the process stability can be achieved by a suitable feed rate. The investigations have shown that for the thin sample geometry Cu3/Al5 (Cu 0,3 mm, Al 0,5 mm) three speed regimes exist. Low speeds (<25 m/min) cause a very small process window in matters of minimal welding and full penetration welding ($P_L = 400$ W). Even small process variations lead to large failures in the weld seam. With average feed rates between 25 and 40 m/min a stabilization of the welding process can be generated. The process window is doubled in a power range of $P_L = 800$ W. In addition, a minimal intermixture of the copper and aluminum materials and a reduced production of brittle phases are achieved for this speed range. When the feed rate exceeds 40 m/min, due to a change in the melt flow mechanisms the mixing of material increases. Comparable conclusions were obtained for the thicker sample geometry of 10/10 with slightly lower feed rates.

In addition to the arrangement of the material and the geometry of the samples, the laser parameters such as focus diameter and feed rate have a significant impact on the welding process. By varying the beam source from single-mode lasers up to multi-mode fiber and disk lasers in combination with different magnifications of the optics, the influence of the spot size on the welding process can be examined. Depending upon of the geometry of the sample, there are different focal diameters which provide a positive effect on the welding quality. Another positive influence on the process stability can be achieved by a suitable feed rate. Higher welding speeds (> 10 m/min) in combination with an appropriate focus diameter allow a workable process window with a low degree of intermixing of the different materials and a correspondingly reduced level of brittle phases. All these correlations lead to a metallurgically stable compound.

Due to the field of application, a great importance of the compound of copper and aluminum is attached to the mechanical strength and the electrical conductivity. On the one hand, an increase in strength by adding alloying elements usually causes on the other hand losses in

electrical conductivity values of the contact. The use of the aluminum alloy AlMg3 in connection with pure copper.

(Cu-OF), for example, has a significantly higher static tensile strength (~ 35%) than the mixture with the pure aluminum Al99,5. On the contrary, the investigation of the electrical contact resistance shows an average 25% higher transfer resistance for the aluminum AlMg3 than the mixing of the pure compound materials. For this reason, it is necessary to compare the conductivity and strength values and their influences on each other at the same time. The rule is that an increase in strength by adding alloying elements generally reduces the electrical conductivity of the material. Considering this fact allows an appropriate contacting method and the right choice of materials to be taken into account.

A successful implementation of a laser welding process into production has to be closely matched to a quality assurance program which has to be adjusted to the joining process. Two approaches for a non-destructive quality control are pointed out in this thesis. The first method which was investigated was based on the evaluation of a function of the mixing ratio of copper and aluminum, which causes different color schemes in the melting pool. Using camera-based color evaluation of the seam surfaces and consequently a division into predefined classes, which based on the mixing ratio of copper and aluminum, allowed successful conclusions on the penetration depth. This test method is carried out chronologically after the welding process and thus leading to an additional time and extra technical expenditure in industrial implementations.

The second quality assurance method, which takes place at the same time as the welding process is represented by monitoring the emitted spectra during the welding process. A visualization of different mixing ratios of copper and aluminum, which is equivalent to the penetration depths in the lower material, is possible with this measurement method. The local maxima of the aluminum spectra provide a good indicator regarding the degree of the mixture of aluminum and copper.

The numerous investigations carried out in the course of this thesis have shown that a reliable process can be realized with laser welding to create a bonded connection of copper and aluminum materials. The choice of optimized laser parameters such as focal position, feed rate and focus diameter is therefore very important. Further important influencing values are the materials, their arrangement and the geometrical dimensions. The results given in this theses show that a reduction of the critical brittle phases with a continuous laser welding process and without the use of additional material or any laser beam manipulation is possible. Depending on the application, parameters such as beam configuration, arrangement of the materials and the laser process parameters need to be determined accordingly.

1 Einleitung und Motivation

Um das enorme Potential der Elektromobilität auszuschöpfen, wurde von der Bundesregierung der „Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität“ ausgearbeitet, mit dem ehrgeizigen Ziel, mindestens eine Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 und sechs Millionen bis 2030 auf die Straße zu bringen. Neue Forschungs- und Entwicklungsprojekte, vor allem in den Bereichen Batterie, Energiemanagement im Fahrzeug, Informations- und Produktionstechnologie, Integration in das Verkehrs- und Energiesystem, sowie für den Aufbau geeigneter Forschungsinfrastrukturen, legen die Grundsteine bei der Entwicklung innovativer Technologien für die Elektromobilität. Für eine erfolgreiche Markteinführung sind Maßnahmen wie die Förderung von Forschung und Entwicklung nötig, um beispielsweise kostensparende Fertigungsverfahren zu entwickeln [1].

Der Laser als Bearbeitungswerkzeug wird in der industriellen Praxis bereits seit Jahrzehnten erfolgreich für die unterschiedlichsten Fertigungsverfahren eingesetzt. Die weiterhin steigende Zahl an Anwendungen in der Serienfertigung spricht für den Erfolg dieser Technologie. Stetige Innovationen in der Lasertechnik, wie beispielsweise die Weiterentwicklung von brillanten Strahlquellen, Optiken und Qualitätssicherungsansätzen sind die Grundlage für diese Erfolgsgeschichte. Geringer Wärmeeintrag bei der Laserbearbeitung, fallende Investkosten der Strahlquellen und die große Auswahl an verschiedenen Laserstrahlquellen sind nur ein paar Vorteile, welche auf der Suche nach geeigneten Fertigungsverfahren im Bereich der alternativen Antriebe für das Strahlwerkzeug Laser sprechen.

Die Entwicklung von alternativen Antrieben in der Automobilindustrie erweitert die Palette der zu fügenden Werkstoffe über das klassische Feld von Stahl und Aluminium hinaus. So spielt Kupfer mit seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit eine wichtige Rolle. Häufig wird das Ultraschallschweißen als Fügeverfahren in der elektronischen Fertigungstechnik eingesetzt. Die Vorteile des Verfahrens liegen auf den ersten Blick in relativ geringen Investitionskosten und einer minimalen metallurgischen Aufmischung der Bauteile. Dem stehen die Nachteile langer Taktzeiten, der Notwendigkeit einer zweiseitiger Bauteilzugänglichkeit und mechanischer Fügebelastung gegenüber. Der Laser als Füge-technologie bietet hierbei einige Ansatzmöglichkeiten zur Optimierung. Der gezielte, berührungslose Energieeintrag und die Möglichkeit eines hohen Automatisierungsgrads ermöglichen eine einseitige Kontaktierung in kurzer Taktzeit mit geringem thermischem Eintrag.

Stoffschlüssige Verbindungen der Werkstoffe Kupfer und Aluminium, speziell in der Mischverbindung, bringen einige Herausforderungen mit sich. Die unterschiedlichen physikalischen und metallurgischen Eigenschaften der Werkstoffe (Wärmeleitfähigkeit, Absorptionskoeffizient, Schmelztemperatur), sowie Bildung intermetallischer Phasen, welche sehr spröde sein können und Rissneigung in der Schweißnaht verdeutlichen die Komplexität und die Herausforderungen der Kontaktierung.

In dieser Arbeit werden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer und Aluminium in der Mischverbindung analysiert und Erklärungen für die beobachteten Effekte ausgearbeitet. In Kapitel 2 werden zunächst aktuelle Kontaktierverfahren zur Erzeugung von Mischverbindungen vorgestellt und tiefer auf die Herausforderungen und Besonderheiten beim Laserstrahlkontaktieren von Kupfer- beziehungsweise Aluminiumwerkstoffen in der artgleichen Werkstoffanordnung (Kupfer und Kupfer, beziehungsweise Aluminium und Aluminium) eingegangen. Des Weiteren werden aktuelle Forschungsergebnisse von verschiedenen Laserverfahren zur Erzeugung der Kupfer-Aluminium-Mischverbindung vorgestellt. Nach Vorstellung der in dieser Arbeit verwendeten Systemtechnik (Kapitel 3) erfolgt in Kapitel 4 die Betrachtung der Schweißigenschaften der reinen Werkstoffe Kupfer und Aluminium. Hiermit werden wichtige Kenntnisse für die weiterführenden Untersuchungen der Mischverbindungen bei den relevanten Prozessparametern erworben.

Der Übertrag der Ergebnisse auf die Mischverbindung und eine ausführliche Betrachtung der Einflussgrößen Probenanordnung, Probenmaterial, Fokusbildung, Vorschubgeschwindigkeit und Fokusbildung erfolgt in Kapitel 5. Die dort vorgestellten Versuchsserien liefern neue, umfangreiche Erkenntnisse bezüglich des Schweißverhaltens der Mischkontaktierung. Eine Erklärung und Abstraktion der Ergebnisse erfolgt mit der Erstellung von Strömungsmodellen.

Die an die Kontaktierung gestellten Anforderungen werden in Kapitel 6 mittels Festigkeitsuntersuchungen und Analysen der Übergangswiderstände überprüft und Einflüsse der Laserparameter auf die Schweißqualität besprochen. Für eine sichere serielle Umsetzung ist der Einsatz von geeigneten Maßnahmen zur Qualitätskontrolle von immenser Bedeutung. Um die gesamtheitliche Betrachtung der Laserkontaktierung von Kupfer und Aluminium im Hinblick auf eine serielle Umsetzbarkeit zu komplettieren, werden zwei erfolgversprechende Ansätze zur Qualitätssicherung in Kapitel 7 vorgestellt. Abschließend werden in Kapitel 8 die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

„Nur wenn wir eine Leistungssteigerung der Batterie im Elektrofahrzeug bei gleichzeitiger Senkung der Kosten realisieren, wird das Elektroauto die notwendige Kundenakzeptanz erreichen“ [2]. Diese in der Automobilindustrie vorherrschende Sichtweise bestätigt den Handlungsbedarf bei der Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren. Die neuen Erkenntnisse aus dieser Arbeit sollen einen Baustein zu Erfüllung der genannten Ziele liefern.

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

Plaß, 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.

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 Fokuszmatrixtechnik

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 Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

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

Andreas Josef Birnesser

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

Christoph Neugebauer

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

Andreas Dauner

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

Axel Heß

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

Christian Gehrke

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

David Schindhelm

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

Moritz Vogel

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

Andreas Michalowski

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

Georg Stöppler

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

Patrick Mucha

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

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügspalt
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