

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Andreev
Schweißen mit dem Scheibenlaser
im Getriebebau – Prozessmerkmale
und Anlagenkonzepte

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

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

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

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

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

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte

von Dr.-Ing. Andrey Andreev
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

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., 2011

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 2011

ISBN 978-3-8316-4103-1

Printed in EC

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Kurzfassung der Arbeit

Die Einsatzpotenziale des Scheibenlasers im Getriebebau wurden im Rahmen dieser Arbeit in zahlreichen Versuchsreihen für unterschiedliche Stähle untersucht. Ziel war es, durch Grundlagenuntersuchungen die genauen Zusammenhänge zwischen den Schweißparametern zu verstehen und daraus Strategien und Konzepte zu entwickeln, die ein wirtschaftliches Schweißverfahren bei hoher Schweißnahtqualität ermöglichen. Aufgrund der Praxisorientierung dieser Arbeit erfüllten die Schweißversuche hinsichtlich der Auswahl der Werkstoffe, der Schweißoptiken und der Versuchsparameter die Anforderungen der Getriebefertigung im Automobilbau.

Bei den Grundlagenuntersuchungen zum Potenzial des Scheibenlasers im Getriebebau wurde zunächst, nach Erklärung der Besonderheiten beim Schweißen mit dem Scheibenlaser, der Einfluss einiger prozessrelevanter Größen auf das Schweißergebnis in Betracht gezogen. Sodann wurden neben der Bedeutung der Laserleistung zum Erreichen höherer Einschweißstiefen, die im Automobilbau im Zusammenhang mit steigenden Drehmomenten und Motorenleistungen entscheidend sein können, die Ergebnisse hinsichtlich der Nahtqualität aufgezeigt. Danach wurden vergleichende Untersuchungen zwischen dem CO₂- und dem Scheibenlaser sowie zwischen dem Scheiben- und dem Faserlaser durchgeführt.

Zentrales Anliegen der Arbeit war der Transfer zu erarbeitender Grundlagenkenntnisse in die Getriebefertigung. Dabei ist es, als abschließender Punkt der Grundlagenuntersuchungen, gelungen, die Vorteile des Schweißens mit dem Scheibenlaser anhand realer Bauteile der Getriebeserienfertigung, zu demonstrieren und das Einsatzpotenzial des Scheibenlasers aufzuzeigen. Hinsichtlich einiger auf die optischen Komponenten der Bearbeitungsoptik wirkenden Nachteile des Schweißens mit dem Scheibenlaser konnte durch die Entwicklung einer modifizierten Bearbeitungsoptik eine Verbesserung erzielt werden.

Die Nutzung der Einsatzpotenziale des Scheibenlasers eröffnen neue Konzept-entstellungen von Laserschweißanlagen, von denen zwei abschließend vorgestellt und hinsichtlich den zu erwartenden Wirtschaftlichkeitsaspekten beispielhaft diskutiert wurden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis	7
Verzeichnis der Symbole	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	17
1.2 Aufbau der Arbeit.....	19
2 Grundlagen und Stand der Technik	21
2.1 Laserstrahlschweißen	21
2.1.1 Verfahrensprinzip.....	21
2.1.2 Wirkungsgrade	25
2.1.3 Fokussierung.....	27
2.1.4 Qualität der Schweißnaht	29
2.2 Werkstoffe	33
2.3 Nahtvorbereitung.....	36
2.3.1 Nahtgeometrien	36
2.3.2 Oberflächenreinheit und Beschichtungen.....	41
2.3.3 Spannvorrichtung	41
2.3.4 Heften.....	41
2.4 Produktionsanlagen	42
2.4.1 Komponenten der Hauptgruppen.....	42
2.4.2 Typisches Beispiel einer Serienschweißanlage der Getriebefertigung.....	45
2.5 Verfahren zur Beurteilung von Laserschweißnähten	48
3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	52
3.1 Strahlquellen.....	52
3.2 Strahlführung und Strahlformung.....	58

3.3	Prozessadapter und Bearbeitungsstationen	60
3.4	Untersuchte Werkstoffe	64
4	Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau	66
4.1	Besonderheiten beim Schweißen mit dem Scheibenlaser	66
4.2	Grundlagenuntersuchungen	67
4.2.1	Einfluss des Fokusdurchmessers auf das Schweißergebnis	68
4.2.2	Prozessgaseinfluss	73
4.2.3	Einfluss des Divergenzwinkels auf das Schweißergebnis	75
4.2.4	Einfluss der Fokuslage auf das Schweißergebnis	76
4.2.5	Einfluss des Strahlauffreffwinkels auf das Schweißergebnis	78
4.2.6	Einfluss der Laserleistung beim Schweißen von Getriebeteilen	80
4.3	Nahtqualität	83
4.4	Vergleichende Untersuchungen zu anderen Lasertypen	85
4.5	Schweißen von realen Bauteilen mit dem Scheibenlaser	91
4.5.1	Schweißen der Antriebswelle des NAG	92
4.5.2	Tellerradschweißen	93
4.5.3	Schweißen des Hohlrads mit dem Hohlradträger	95
4.6	Synopsis	103
5	Modifizierte Bearbeitungsoptik	106
5.1	Komponenten	107
5.2	Zusammenbau der D70-3L-Bearbeitungsoptik	108
5.3	Funktionsweise und Strahlagnostik	109
5.4	Synopsis	110
6	Anlagenkonzepte mit dem Scheibenlaser als Strahlquelle	111
6.1	Konzept 1: Ersatz der Strahlquelle	111
6.2	Konzept 2: Be- und Entladung mittels Roboter	113
6.3	Wirtschaftlichkeitsberechnung	116
6.4	Synopsis	118
7	Zusammenfassung	120
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	123

Extended Abstract

Through advantages like the selective energy supply, the slim seam geometry, the higher welding speed and, hence, the lower warm stress for the material, laser welding compared to the conventional welding methods has gained in the last years a large popularity in the automotive industry. Its advantages reduce the reworking of the welded parts, facilitate the design of low weight constructions and make the laser welding, despite of the higher investment costs, to a leading profitable joining method.

In the last few years some new laser sources, the diode pumped solid state lasers of highest brilliance, were developed. Their two representatives: the fiber and the thin disc laser, combine, compared to the other solid state lasers, advantages like a very good beam quality with on the same time a high degree of efficiency. In addition, their wavelengths around $1\ \mu\text{m}$ provide the possibility for a flexible beam guide system. These advantages make these laser sources very interesting for the welding of gear parts.

Taking into consideration these aspects, the emphasis of this thesis is laid on the analysis of the laser welding process and the potentials to use the thin disc laser in the gear production. In order to understand the coherence of the various single welding parameters and their influence on welding depth, seam geometry and seam quality, detailed experiments were performed. In analysing of the process efficiency, the advantages of these laser sources are outlined. On this basis new strategies and concepts for the systems technology and the machine building were developed.

The possibility to achieve with the thin disc laser at the same time spot diameters smaller than $0,3\ \text{mm}$ and large Rayleigh lengths has led to some unforeseen results. For steel alloys, laser power of $3\ \text{kW}$ and beam spot diameters smaller than $0,2\ \text{mm}$ a reversal of the inverse proportionality between the spot diameter and the welding depth became obvious. The first explanation for this effect, which was made based on experiences with CO_2 -laser welding, were that plasma effects might be the cause. However, an analysis of the shielding gas influence clearly gives a negative answer about the existence of any plasma effects during the welding with the thin disc laser. Some changes in the shape of the seam cross section as function of the welding speed

indicates that for velocities smaller than 6 m/min the proportionality reversal might be caused by temperature gradient driven surface tension, the so-called Marangoni effect.

Analysis of the welding process with different beam divergences showed for the beam spot diameter of 0,1 mm that, on the one hand, a smaller beam divergence leads to a larger welding depth. On the other hand, it reduces the seam cross section area and the process efficiency for speeds smaller than 4 m/min.

Further trials to find the effect of the focal position on the welding result showed for the thin disc laser and large Rayleigh lengths that the largest welding depth is achieved in the range between -1 and +1 mm. Inclination of the welding optics in the range between 0 and 30° at beam spot diameters smaller than 0,2 mm did not show an effect on the welding result.

The seam geometry and the welding depth showed a degradation of the weld quality and an increase of the metal vapor, when the laser power was increased from 3 to 6 kW. The first effect can be characterised by a high number of blowouts and considerable seam porosity. The second one has an indirect detrimental influence on the welding result: the vapor jet leads to an extra thermal load of the optical components, which change their physical properties resulting in varying focusing conditions.

Comparison tests between different laser sources show the effects of wavelength, intensity profile of the laser beam in the focus, different welding optics and Rayleigh lengths on the welding result. Because of its lower wave length and higher absorption the thin disc laser leads, compared to the CO₂-laser, for welding speeds higher than 3 m/min to the achievement of higher welding depths. In addition to this advantage, a higher efficiency can be achieved with the thin disc laser, too. The larger Rayleigh length of the CO₂-laser was an advantage for velocities lower than 3 m/min and led in this range to the achievement of larger welding depths. Comparisons between the fiber and the thin disc laser showed that both laser sources could be used for the same welding tasks.

After analysing the process data, some welding parameters were used in further trials to weld real parts from the gear production of Daimler AG. Using these parameters the welding in the serial production (weld quality, seam geometry, welding depth, hardness in the weld zone) was achieved with a speed coefficient of 1,5. Due to this, for the first time it became possible to weld the ring gear with the housing of a differential without using of filler metal.

Based on the Trumpf welding optics (D70) a modified head, called 3L-module, was developed. Its purpose was to expand the collimated beam and to focus it. Thus, the combination between the D70 optics and the 3L-module (the combined optics was called “D70-3L”) led to an increase of the working distance, which improved the accessibility of the welding optics, reduced the pollution of the protective glass and hence, reduced the thermal stress of the optical components. In summary, it protected the optical components from spatters and fume, which is strongly produced in the welding process with the thin disc laser.

The increase of the welding speed during the trials with the parts from the real gear production of Daimler AG led to a reduction of the welding time, which is needed to produce one part. This fact suggested a review of the existing welding machine concepts. The mere substitution of the CO₂-laser by the thin disc laser led to a first concept, which was developed in this thesis, characterised by a reduction of the theoretical cycle time and of the throughput time. However, based on the unchanged large loading and unloading time, the laser’s uptime was reduced. In the second concept, new types of the loading and unloading components were chosen, so that the theoretical cycle time and the throughput time were increased again. In addition, this new concept has led, compared to the existing CO₂-laser welding machine, to an increase of the laser’s uptime. It allowed the highest parts production per hour and led, for high number of parts, to the lowest costs per piece.

In conclusion, the results of this thesis led to a better understanding of the welding process on gear parts using the thin disc laser. The analysis of the welding process in combination with the welding of real parts from the gear production of Daimler AG clearly demonstrated the advantages and the disadvantages of the thin disc laser. The new machine concepts, which were adapted especially for this laser source, showed the economical potentials of the thin disc laser in the gear parts production.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Das Strahlwerkzeug Laser zusammen mit dem Laserstrahlschweißen als Fügeverfahren gewinnt in der industriellen Fertigungstechnik in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Die Gründe hierfür sind die Vorteile des Laserstrahlschweißens gegenüber den klassischen Schweißverfahren wie gezielte Energieeinbringung, schlanke Nahtgeometrie und geringe Wärmebelastung des Bauteils. Diese Vorteile ermöglichen eine reduzierte Nachbearbeitung nach dem Schweißprozess. Insgesamt führen sie somit sowohl zur Entwicklung materialsparender Konstruktionen als auch zu geringeren Prozesskosten. Darüber hinaus ist das Laserstrahlschweißen bezogen auf die Schweißgeschwindigkeit den konventionellen Schweißverfahren deutlich überlegen. Zusätzlich ist das Verfahren selbst bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten reproduzierbar und lässt sich in automatisierte Abläufe gut integrieren. Dank dieser Eigenschaften ist das Laserstrahlschweißen trotz hoher Anschaffungskosten in vielen Fällen wirtschaftlicher als die konventionellen Schweißverfahren.

Das Laserstrahlschweißen hat sich in den letzten Jahren im Antriebstrang des Automobilbereichs, der aus Getriebe-, Achsen- und Motorenbau besteht, sehr stark verbreitet und ist inzwischen, wie mit Bild 1.1 gezeigt, als gängiges Fügeverfahren in der Automobilindustrie etabliert.



Bild 1.1: Abtriebswelle des neuen automatischen Getriebes (NAG): axiale Schweißung (links) und radiale Schweißung (rechts) [Quelle: Daimler AG].

Im Getriebebau werden vom Laserstrahl sehr gute Zugänglichkeitseigenschaften und sehr gute Fokussierbarkeit vorausgesetzt, da die geschweißten Bauteile nur eine geringe Wärmeausdehnung nach dem Schweißen aufweisen dürfen, um nicht nachgearbeitet werden zu müssen. Dank seiner guten Strahlqualität und damit sehr guten Fokussierbarkeit erfüllte bis vor kurzem nur der CO₂-Laser diese Bedingungen, siehe Bild 1.2. Im Getriebebau wurden deshalb trotz komplizierter und unflexibler Strahlführungen, deren Notwendigkeit durch die Wellenlänge des Lasers bestimmt ist, überwiegend CO₂-Laser als Standardgeräte für den Schweißprozess eingesetzt.

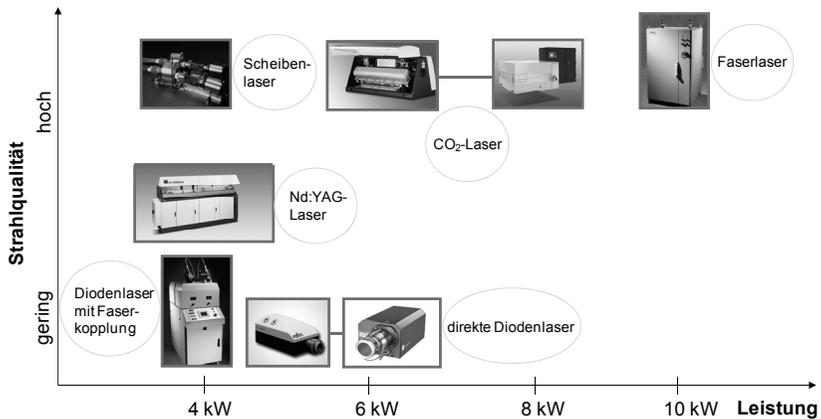


Bild 1.2: Qualitative Einordnung der Strahlquellen auf dem Markt bezüglich deren Strahlqualität- und Ausgangsleistung (Stand: Anfang 2005).

Basierend auf den Festkörperlaser wurden in den letzten Jahren die so genannten diodengepumpten Festkörperlaser höchster Brillanz (Scheiben- und Faserlaser) entwickelt. Diese Strahlwerkzeuge haben besondere Vorteile gegenüber den CO₂- und den herkömmlichen lampen- oder diodengepumpten Festkörperlaser, sodass ihr Einsatz im Getriebebau untersucht werden muss. Ihre Vorteile liegen in der sehr guten Strahlqualität bei gleichzeitig hohem Gesamtwirkungsgrad und durch die kürzere Wellenlänge möglicher flexibler Strahlführung.

Unter diesen Gesichtspunkten soll im Rahmen dieser Arbeit das Einsatzpotenzial des Scheibenlasers im Getriebebau untersucht werden, wobei es gilt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schweißparametern zu verstehen, die erzeugten Nahtgeometrien zu untersuchen, die Prozesswirkungsgrade zu analysieren und daraus unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit neue Strategien zum Anlagenbau im Getriebebau zu entwickeln, die ein effizientes Schweißen bei hoher Schweißnahtqualität

ermöglichen. Eingebettet in das BMBF-Projekt „Scheibenlaser höchster Brillanz“ wurden die Untersuchungen im Rahmen einer Zusammenarbeit des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge) der Universität Stuttgart mit der Daimler AG durchgeführt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Das Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit basieren auf dem Stand der Technik und der o. g. Zielsetzung. Zunächst wird in Kapitel 2 der bisherige Stand der Kenntnisse zum Laserstrahlschweißen erklärt. Dabei wird auf das Verfahrensprinzip, dessen Einflussgrößen und typische Prozessphänomene eingegangen. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel die im Getriebebau meist verwendeten Werkstoffe und ihre Eigenschaften, die Nahtvorbereitung, der Stand der Anlagentechnik heutiger Laserschweißanlagen in der Getriebefertigung und die Verfahren zur Beurteilung von Laserschweißnähten erläutert.

In Kapitel 3 wird die verwendete Systemtechnik, beginnend von den Strahlquellen und den optischen Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung, über die Prozessadapter und die Bearbeitungsstationen bis hin zu der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe, beschrieben.

Als Grundlage weiterer Entwicklungen wird in Kapitel 4 das Schweißen von Stahllegierungen mit dem Scheibenlaser detailliert untersucht. Ziel dabei ist, die genauen Abhängigkeiten des Prozesses und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schweißparameter zu verstehen und daraus Ergebnisse zu liefern, die ein effizientes Schweißen bei hoher Schweißnahtqualität ermöglichen. Zusätzlich werden neben einem Strahlquellenvergleich die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen auf reale Bauteile bzw. Bauteilgruppen der Daimler-Getriebefertigung übertragen.

In Kapitel 5 wird eine modifizierte Bearbeitungsoptik, die auf der D70-Optik der Firma Trumpf basiert, vorgestellt. Durch sie wird der kollimierte Strahl aufgeweitet. Die daraus entstehenden Vorteile werden in diesem Kapitel diskutiert.

In Kapitel 6 werden für den Zusammenbau (ZB) Hohlrad basierend auf den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen neue Anlagenkonzepte entwickelt. Dabei werden alle Vorteile, die sich vom Einsatz des Scheibenlasers ergeben, dargestellt und genau analysiert. Um die Untersuchungen zu komplettieren, wird eine Wirtschaftlich-

keitsberechnung erstellt. Neben der Wirtschaftlichkeit stellt die Nahtqualität einen zentralen Punkt der Untersuchungen dar.

Abschließend werden im Kapitel 7 alle Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

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

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

Plaaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

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 3-89675-819-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

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

Angstenberger, Birgit

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

Bachhofer, Andreas

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

Breitschwerdt, Sven

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

Mochmann, Gunter

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

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötlens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozesssicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. 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 Nahteigenschäften 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 Leistungskalierung
von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-
symmetrischen Bauteilen
2011, 160 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebe-
bau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1