

Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente

von Dr.-Ing. Andreas Letsch
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. Thomas Graf
Mitberichter: PD Dr. Adolf Giesen
Prof. Dr. Hartmut Bartelt

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., 2009

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 2009

ISBN 978-3-8316-0896-6

Printed in Germany

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

Kurzfassung

Die Bestimmung der zehn zweiten Momente der Wignerverteilung ermöglicht eine einfache Berechnung der geometrisch optischen Eigenschaften von Laserstrahlen bei der Ausbreitung durch optische Systeme. Die Norm ISO 11146 wurde Mitte der Neunziger Jahre verabschiedet und beschreibt ein Messverfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von stigmatischen und einfach astigmatischen Laserstrahlen, die durch ihre Symmetrieeigenschaften gekennzeichnet sind. Seit 2000 wird an einer Erweiterung dieser Norm gearbeitet (ISO/FDIS 11146-2), um ein Regelwerk zu schaffen, mit dem auch allgemein astigmatische Strahlen vermessen werden können, so dass jegliche Art von Laserstrahlung normgerecht charakterisiert werden kann.

In Kapitel 2 dieser Arbeit werden die grundlegenden Eigenschaften der Beschreibung von Laserstrahlen mit Hilfe ihrer zweiten Momente vorgestellt. Die Ausbreitung von Laserstrahlen durch optische Systeme wird in Kapitel 3 an Hand einiger Beispiele erläutert. Die effektive Beugungsmaßzahl und der intrinsische Astigmatismus sind zwei Kennzahlen, die bei der Ausbreitung durch optische Systeme invariant sind. Die effektive Beugungsmaßzahl beschreibt die Qualität eines Laserstrahls im Vergleich zu einem idealen, beugungsbegrenzten Strahl, während der intrinsische Astigmatismus mit der Symmetrie verknüpft ist.

Die Norm ISO 11146 zur Vermessung stigmatischer und einfach astigmatischer Strahlen und der Normenvorschlag ISO/FDIS 11146-2 für die Charakterisierung allgemein astigmatischer Strahlen werden in Kapitel 4 erläutert. Die Bestimmung der Strahleigenschaften erfolgt durch Berechnung der zweiten Momente von aufgenommen Leistungsdichteverteilungen in mehreren Messebenen. Das Verfahren zur Bestimmung der zweiten Momente wird in Kapitel 5 vorgestellt und gezeigt, dass durch die Wahl eines elliptischen Integrationsbereiches die Messgenauigkeit verbessert werden kann. Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der Ortsmomente sind Transmissionsfilter, bei denen die Gewichtung mit Hilfe eines geeigneten Transmissionsfilters erzielt wird, die in Kapitel 6 an Hand eines entwickelten Messgerätes beschrieben werden.

In Kapitel 7 wird ein einfach astigmatischer Strahl durch eine Zylinderlinse in einen allgemein astigmatischen Strahl transformiert, da die Symmetrieachse der

Linse nicht mit der des Strahles übereinstimmt. Der so entstandene allgemein astigmatische Strahl wird in Abhängigkeit des Drehwinkels der Zylinderlinse mit dem Verfahren des Normenvorschlags charakterisiert. Da die Eigenschaften des optischen Systems wie auch die des einfach astigmatischen Strahls bekannt sind, ist es möglich die Strahlparameter zu berechnen und mit den gemessenen Werten zu vergleichen. Hierbei wird bei den zweiten Momenten eine gute qualitative wie auch quantitative Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation beobachtet. Jedoch können die Strahlinvarianten nur mit großen Fehlern bestimmt werden. Diese Aussage wird mit Simulationen bestätigt, bei denen der Einfluss von systematischen und statistischen Fehlern der zweiten Momente auf die Strahlinvarianten untersucht wurde. Kapitel 8 stellt eine Erweiterung des Messverfahrens vor, mit dem die Messgenauigkeit des sogenannten Twistparameters erhöht wird.

Diese Arbeit zeigt, dass allgemein astigmatische Strahlen durch Bestimmung der zehn zweiten Momente charakterisiert werden können. Die gemessenen Momente können zum Beispiel für die Berechnung der Ausbreitung von Strahlen durch optische Systeme eingesetzt werden. Jedoch ist die Bestimmung der Strahlinvarianten nicht möglich, da hier kleinste Messfehler, die mit den heutigen Messverfahren unvermeidbar sind, zu so großen Fehlern führen, dass die Bestimmung der Invarianten nicht möglich ist.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	19
2 Geometrische Eigenschaften von Laserstrahlung	23
2.1 Wignerverteilung	23
2.2 Momente der Wignerverteilung	25
2.3 Klassifizierung der Laserstrahlen	27
2.4 Physikalische Bedeutung der Momente	30
2.4.1 Ortsmomente $\langle x^2 \rangle$, $\langle y^2 \rangle$ und $\langle xy \rangle$	30
2.4.2 Winkelmomente $\langle \Theta_x^2 \rangle$, $\langle \Theta_y^2 \rangle$ und $\langle \Theta_x \Theta_y \rangle$	32
2.4.3 Gemischte Ortswinkelmomente $\langle x \Theta_x \rangle$, $\langle x \Theta_y \rangle$, $\langle y \Theta_x \rangle$ und $\langle y \Theta_y \rangle$	32
2.4.4 Invarianten	35
3 Ausbreitung von Laserstrahlen durch einige optische Systeme	39
3.1 Freie Propagation eines Laserstrahls	39
3.2 Drehung eines ausgerichteten einfach astigmatischen Strahls	44
3.3 Propagation durch eine Zylinderlinse	47
3.4 Zusammenfassung	51
4 ISO 11146	52
4.1 Charakterisierung einfach astigmatischer und stigmatischer Strahlen	52
4.2 Vermessung allgemein astigmatischer Strahlen	54
5 Bestimmung der Ortsmomente	58
5.1 Bestimmung der Ortsmomente $\langle x^2 \rangle$, $\langle y^2 \rangle$ und $\langle xy \rangle$	59
5.1.1 Hintergrundmethoden	59
5.1.2 Bestimmung des Integrationsbereiches	64

5.1.3	Zusammenfassung	77
5.2	Auswirkung von Schwankungen des Strahls	78
6	Alternative Methode zur Bestimmung der Ortsmomente	81
7	Messung nach ISO/FDIS 11146-2	87
7.1	Versuchsaufbau	88
7.2	Grundlagen zur Simulation der Messung	91
7.3	Fehlerbetrachtung mit Hilfe der Ausgleichsrechnung	95
7.4	Bestimmung der zweiten Momente	99
7.5	Bestimmung der abgeleiteten Parameter M_{eff}^2 , M_x^2 , M_y^2 , a , t und J .	101
7.6	Ausbreitung der gemessenen Strahlen durch das Messsystem	108
7.7	Untersuchung der Auswirkung von Messfehlern auf die Invarianten .	116
7.7.1	Systematische Messfehler	116
7.7.2	Statistische Messfehler	126
7.8	Analyse mit elliptischem Integrationsbereich	131
7.9	Diskussion der Messung nach ISO 11146-2	134
8	Verbessertes Messverfahren	138
8.1	Messung des Twistes	138
8.2	Allgemein astigmatischer Strahl mit Twist	141
8.3	Allgemein astigmatischer Laser mit verschwindendem Twist	146
8.4	Zusammenfassung	150
9	Zusammenfassung	152
A	Funktionsweise und Charakterisierung von CCD-Kameras	155
	Literaturverzeichnis	161

1 Einleitung

Während der letzten 20 Jahre hat der Laser immer neue Anwendungsgebiete in Industrie, Medizin und Forschung erobert. Mit der Weiterentwicklung der Strahlquellen wurden neue Verfahren zum Beispiel in der Fertigung entwickelt, die ohne Laser nicht möglich wären. Für den Anwender wie auch den Hersteller der Strahlquellen ist deshalb die Charakterisierung des Strahlwerkzeuges Laser eine unabdingbare Notwendigkeit. Seit Anfang der Neunziger Jahre wurde aus diesem Grund intensiv auf nationaler und internationaler Ebene an der Normung der Laserstrahlen und Optik gearbeitet, da die Vermessung eines Laserstrahls ebenso standardisiert sein sollte wie die Angabe eines Gewindes einer Schraube. Die Normungsarbeit wurde unter anderem von den beiden europäischen Projekten CHOCLAB und CHOCLAB II unterstützt (CHARacterization of Optical Components and LASer Beams). In diesen Projekten wurden zum Beispiel die Normenvorschläge mit sogenannten Round-Robin-Experimenten untersucht, bei denen möglichst viele Teilnehmer die Messvorschriften in Blindversuchen testeten. Diese Untersuchungen haben zu einem umfangreichen Normenwerk für die Lasertechnik geführt [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Die geometrischen Eigenschaften von Laserstrahlen wie Strahldurchmesser, Divergenzwinkel und Strahlqualität werden nach ISO 11146 bestimmt [2]. Das Messverfahren wurde in mehreren Round-Robin-Experimenten überprüft und weiterentwickelt [8, 9, 10]. Die zweiten Momente der Intensitätsverteilung werden verwendet um die Strahldurchmesser zu definieren [11], da diese Definition die Berechnung der Ausbreitung des Laserstrahls durch verlust- und aberrationsfreie optische Systeme auf einfache Weise ermöglicht. Jeder Laserstrahl kann durch zehn unabhängige zweite Momente seiner Wignerverteilung charakterisiert werden. Die Wignerverteilung ist eine Funktion, die verwendet werden kann, um Laserstrahlen im Phasenraum zu beschreiben. Sie ermöglicht eine sehr viel weitergehende Beschreibung des Strahles als die Angabe der zehn zweiten Momente, jedoch ist die Bestimmung der Wignerverteilung im Vergleich zum Normenverfahren sehr viel aufwendiger und in vielen Fällen ist die Information der zehn zweiten Momente für die Beschreibung eines Laserstrahles ausreichend.

Das Verfahren nach ISO 11146 ermöglicht die Charakterisierung stigmatischer und einfach astigmatischer Strahlen. Stigmatische Strahlen sind rotationssymmetrisch

und werden durch drei unabhängige Momente zweiter Ordnung charakterisiert. Einfach astigmatische Strahlen besitzen einen elliptischen Strahlquerschnitt, deren Symmetrieachse bei Ausbreitung durch rotationssymmetrische optische Systeme konstant ist. Diese Strahlen werden mit sechs unabhängigen zweiten Momenten und dem Winkel zwischen der Symmetrieachse des Strahls und dem Laborkoordinatensystem beschrieben. Neben diesen beiden Strahlklassen, die durch ihre Symmetrie gekennzeichnet sind, gibt es noch eine weitere Strahlklasse, die sogenannten allgemein astigmatischen Strahlen. Hierbei handelt es sich um die allgemeinste Klasse von Laserstrahlen, zu denen zum Beispiel die Strahlen mit elliptischem Strahlprofil gehören, deren Hauptachsenwinkel sich entlang der Ausbreitungsrichtung ändert. Seit 2000 wird an einer Erweiterung der Norm ISO 11146 gearbeitet, um auch für diese Strahlklasse ein geeignetes Messverfahren zu finden. Mit diesem Messverfahren ist es möglich allgemein astigmatische Strahlen, die sich bei freier Ausbreitung wie stigmatischen oder einfach astigmatischen Strahlen verhalten von tatsächlich stigmatischen und astigmatischen Strahlen zu unterscheiden [12]. Die scheinbar stigmatischen oder einfachen astigmatischen Strahlen unterscheiden sich von tatsächlich stigmatischen und einfach astigmatischen Strahlen bei der Ausbreitung durch astigmatische optische Elemente.

In dieser Arbeit wird das Messverfahren dieses Normenvorschlages ISO/FDIS 11146-2 zur Vermessung von allgemein astigmatischen Strahlen untersucht. Diese Strahlen werden häufig auch als „twistende“ Laserstrahlen bezeichnet. Diese Namensgebung ist jedoch nicht zu verwechseln mit dem sogenannten Twistparameter des Strahls, der den Drehimpulsfluss bezogen auf die Leistung des Strahles beschreibt [13]. Ein Laserstrahl, dessen Twistparameter nicht Null ist, ist auf jeden Fall ein allgemein astigmatischer Strahl, jedoch gibt es auch allgemein astigmatische Strahlen mit verschwindendem Twistparameter. Die Eigenschaften allgemein astigmatischer Strahlen wurden zuerst an Gauß-Schell-Strahlen bei Ausbreitung durch nicht rotationssymmetrische optische Systeme untersucht [14, 15, 16, 17, 18]. Bei diesen Untersuchungen wurde der Twist als eine Eigenschaft interpretiert, die sich aus der teilweisen Kohärenz der Gauß-Schell-Strahlen ergibt und die bei kohärenten Strahlen verschwindet. Diese Interpretation ist falsch wie sich bei der Ausweitung der Theorie auf allgemein partiell kohärente Laserstrahlung zeigte [17, 19]. Der Twist ist verknüpft mit dem Drehimpuls des Strahlungsfeldes [13].

Bereits 1969 untersuchten Arnaud und Kogelnik die Auswirkung von astigmatischen optischen Systemen auf einfach astigmatische Gauß-Strahlen und stellten fest, dass diese Strahlen, wenn ihre Symmetrieachse nicht mit der des optischen Systems übereinstimmen, elliptische Strahlprofile besitzen, deren Ausrichtung sich

bei freier Propagation ändert [20]. Die Wirkung einer Zylinderlinse auf einen rechteckigen Lichtstrahl wurde 1979 von Arsenault untersucht [21]. Bei einem solchen Lichtbündel, das zum Beispiel durch eine Schlitzblende erzeugt wurde, ist die Orientierung der Symmetrieachse von der Entfernung und dem Drehwinkels der Zylinderlinse abhängig. Das Rechteck dreht sich entlang der Ausbreitungsrichtung, wenn die Zylinderlinse nicht symmetrisch zu dem Bündel ausgerichtet ist. Dieses Beispiel eines geometrisch optischen Lichtbündels zeigt bereits einige der charakteristischen Eigenschaften, die bei der Propagation eines einfach astigmatischen Strahles durch eine Zylinderlinse, deren Symmetrieachse nicht gleich der des Strahls ist, auftreten. Die Orientierung der Strahlhauptachsen ist nach der Zylinderlinse vom Ort und dem Drehwinkel der Zylinderlinse abhängig und der ehemals einfach astigmatische Strahl wird in einen allgemein astigmatischen Strahl transformiert.

Prinzipiell kann die Strahlklasse durch geeignete optische Systeme verändert werden. So kann zum Beispiel jeder Strahl mit Hilfe astigmatischer optischer Systeme so geformt werden, dass er rotationssymmetrisch ist [19, 22, 23, 24, 25, 26]. Bei der Propagation durch rotationssymmetrische optische System bleibt die so geschaffene Rotationssymmetrie erhalten. Eine solche Umwandlung ermöglicht zum Beispiel einen stark astigmatischen Strahl eines Diodenlasers in einen runden Strahl zu transformieren und diesen dann effizient in eine Glasfaser einzukoppeln.

Jeder Laserstrahl kann durch zwei unabhängige Kennzahlen beschrieben werden, der effektiven Beugungsmaßzahl M_{eff}^2 und dem intrinsischen Astigmatismus a . Diese beiden Zahlen sind bei der Ausbreitung des Strahls durch verlustfreie lineare optische Systeme invariant. Die effektive Beugungsmaßzahl beschreibt wie gut der Strahl mit einem geeigneten optischen System fokussiert werden kann, während der intrinsische Astigmatismus mit der Symmetrie des Strahls zusammenhängt.

Diese Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung allgemein astigmatischer Strahlen. Die theoretischen Grundlagen der Beschreibung von Laserstrahlen mit den zweiten Momenten der Wignerverteilung werden in Kapitel 2 vorgestellt. Die physikalische Bedeutung der zweiten Momente wird ebenso wie die Klassifizierung der Laserstrahlen und der Strahlinvarianten erläutert.

Kapitel 3 behandelt einige Beispiele der Ausbreitung von Laserstrahlen durch optische Systeme. Insbesondere wird hier die freie Ausbreitung von Laserstrahlen, die die Grundlage für das Messverfahren nach ISO 11146 darstellt, wie auch die Propagation von einfach astigmatischen Strahlen durch eine Zylinderlinse besprochen. Bei der Propagation von einfach astigmatischen Strahlen durch eine Zylinderlinse, deren Symmetrieachse nicht mit der des Strahles übereinstimmt, wird der Strahl in

einen allgemein astigmatischen Strahl umgewandelt. Diese Transformation wird in den Kapiteln 7 und 8 zur Erzeugung allgemein astigmatischer Strahlen verwendet.

Die Norm ISO 11146 und der Normenvorschlag ISO/FDIS 11146-2 werden in Kapitel 4 vorgestellt. Während die Norm ISO 11146 zur Charakterisierung stigmatischer und einfach astigmatischer Strahlen ausgiebig untersucht wurde und als Standard akzeptiert ist, ist der Normenvorschlag ISO/FDIS 11146-2 bisher nicht systematisch untersucht worden. Bei beiden Messverfahren wird die Leistungsdichteverteilung in mehreren Ebenen bei freier Propagation aufgenommen, um hieraus die Strahleigenschaften zu bestimmen. Die Charakterisierung allgemein astigmatischer Strahlen erfordert eine zusätzlich Messung mit einer Zylinderlinse, um den Twistparameter zu messen. Von jeder aufgenommen Leistungsdichteverteilung sind die drei zweiten Ortsmomente zu berechnen, die die Strahldurchmesser in dieser Ebene beschreiben. Die Berechnung der zweiten Momente erfordert eine geeignete Aufbereitung der Daten, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen. Die hierzu notwendigen Verfahren werden in Kapitel 5 vorgestellt. Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der Ortsmomente sind Transmissionsfilter, bei denen die Gewichtung mit Hilfe eines geeigneten Transmissionsfilters erzielt wird, die in Kapitel 6 beschrieben werden.

Das neue Messverfahren nach ISO/FDIS 11146-2 wird in Kapitel 7 erstmalig systematisch untersucht. Durch eine Zylinderlinse wird ein einfach astigmatischer Strahl in einen allgemein astigmatischen Strahl transformiert. Je nach Orientierung der Symmetrieachse der Zylinderlinse zu der Symmetrieachse des einfach astigmatischen Strahls ergeben sich allgemein astigmatische Strahlen mit unterschiedlichen Eigenschaften, die in Abhängigkeit des Drehwinkels gemessen werden. Mit den Daten des einfach astigmatischen Ausgangsstrahls und des verwendeten optischen Systems des Experiments werden diese Messdaten verglichen. Die Fehler bei der Bestimmung der zweiten Momente und ihre Auswirkung auf die Invarianten wird sowohl im Experiment wie auch mit Hilfe von Simulationen untersucht.

Eine Erweiterung des Messverfahrens wird in Kapitel 8 präsentiert, die die Bestimmung des Twistparameters verbessert. In diesem Kapitel wird auch die Charakterisierung eines allgemein astigmatischen Strahles vorgestellt, der durch zueinander verkippte astigmatische Elemente im Resonator entsteht. Diese Arbeit endet mit einer Zusammenfassung in Kapitel 9.

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

Griebisch, 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

Laserschweißbeignung 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

Pläß, Wilfried

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

Schaller, Markus K. R.

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

Hack, Rüdiger

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

Krupka, René

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

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

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

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

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 Hochleistungsdiodelnlasern
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 Festkörperlaser 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-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität 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 keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

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

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- 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 Präzision 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 Aluminiumgusslegierungen 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. 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 Ferti-gungssystemen

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 Naht-eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen 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