

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 Strahlvarianten 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.

2 Geometrische Eigenschaften von Laserstrahlung

In diesem Kapitel werden die grundlegenden geometrischen Eigenschaften eines Laserstrahls vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf der Beschreibung der Laserstrahlung mit Hilfe der zweiten Momente der Wignerverteilung liegt, da diese zur Charakterisierung nach ISO 11146 verwendet werden.

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Wignerverteilung und ihre Momente kurz eingeführt. Es folgt eine Klassifizierung der unterschiedlichen Strahlklassen an Hand der Symmetrieeigenschaften der Laserstrahlung. Das Kapitel endet mit der Erläuterung der physikalischen Bedeutung der ersten und zweiten Momente der Wignerverteilung.

2.1 Wignerverteilung

Die Wignerverteilung wurde 1932 von Wigner als Verteilungsfunktion in der Mechanik eingeführt, um mechanische Zusammenhänge im Phasenraum zu beschreiben. Im Bereich der Optik setzte als erster Walther eine Wignerverteilung im Jahre 1968 ein, um partielle Kohärenz und Radiometrie zu verbinden [27]. Wenige Jahre später wurde die Wignerverteilung in weiten Bereichen der Optik, insbesondere der Fourier-Optik, angewendet [28, 29]. Die Wignerverteilung beschreibt den Laserstrahl im Phasenraum, der von Orts- und Winkelkoordinaten aufgespannt wird. Im Folgenden werden nur die für diese Arbeit notwendigen Eigenschaften der Wignerkfunktion kurz erläutert. Eine Übersicht über die Verwendung und die Eigenschaften der Wignerverteilung in der Optik wird zum Beispiel in [29] gegeben.

Für die folgenden Betrachtungen breite sich die Laserstrahlung immer entlang der z -Achse aus. Der Phasenraum wird von den Ortskoordinaten (x, y) und den Winkelkoordinaten (Θ_x, Θ_y) aufgespannt. Die Wignerverteilung $W(\vec{r}, \vec{\Theta}, z)$ eines partiell kohärenten Laserstrahls am Ort z ist definiert als die Fouriertransformierte der spektralen Kohärenzfunktion $\Gamma(\vec{r} + \vec{s}/2, \vec{r} - \vec{s}/2, z)$, wobei der Vektor \vec{s} die beiden Punkte $(\vec{r} + \vec{s}/2)$ und $(\vec{r} - \vec{s}/2)$ in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung am

Ort z (die im Folgenden als Ebene z bezeichnet wird) verbindet, deren Korrelation berechnet wird [28]

$$W(\vec{r}, \vec{\Theta}, z) = \int \Gamma(\vec{r} + \vec{s}/2, \vec{r} - \vec{s}/2, z) \exp(-ik\vec{\Theta}\vec{s}) d\vec{s} \quad (2.1)$$

mit $\vec{\Theta}$ dem Vektor der Winkelkoordinaten, \vec{r} dem Ortsvektor und $k = 2\pi/\lambda$. Die so definierte Wignerverteilung ist reellwertig und beschreibt, wieviel Strahlungsleistung an der Stelle \vec{r} in Richtung $\vec{\Theta}$ durch die Ebene z fließt. Die spektrale Kohärenzfunktion beschreibt die Korrelation der elektrischen Felder der beiden Punkte $(\vec{r} + \vec{s}/2)$ und $(\vec{r} - \vec{s}/2)$ in der Ebene z und ist die Fourier-Transformierte der wechselseitigen Kohärenzfunktion, die mit dem Zeitintegral über das Produkt der beiden elektrischen Felder berechnet wird.

Bei einer Integration der Wignerverteilung über alle Winkel ergibt sich die Leistungsdichteverteilung $E(x, y, z)$ des Strahls in der Ebene z

$$E(x, y, z) = \int W(\vec{r}, \vec{\Theta}, z) d\vec{\Theta}. \quad (2.2)$$

Während die Leistungsdichteverteilung in einer Messebene direkt, zum Beispiel mit einer Kamera, gemessen werden kann, ist die experimentelle Bestimmung der Wignerverteilung mit einem relativ großen Aufwand verbunden [13, 30, 31]. Die Gleichung 2.2 zeigt, dass wenn die Wignerverteilung bekannt ist, die Leistungsdichteverteilung am Ort z berechnet werden kann. Die Ausbreitung von Laserstrahlung durch optische Systeme kann mit Hilfe von einfachen Transformationen der Wignerverteilung beschrieben werden, das heißt, es kann die Wignerverteilung an beliebigen Positionen des optischen Systems berechnet werden [28, 32, 33].

Die Wignerverteilung enthält neben der Information über die Leistungsdichteverteilung, aus der die geometrischen Eigenschaften des Strahls wie zum Beispiel die Strahldurchmesser abgeleitet werden, auch die Kohärenzeigenschaften des Strahls, so dass zum Beispiel auch Beugungsphänomene beschrieben werden können. Die Wignerverteilung enthält damit eine Fülle von Informationen, jedoch sind für viele praktische Anwendungen die Momente der Wignerverteilung zur Beschreibung der geometrischen Strahleigenschaften ausreichend. Insbesondere ist die Bestimmung der Momente der Wignerverteilung experimentell weniger aufwendig als die Rekonstruktion der Wignerverteilung.

Mit Hilfe der Momente der Wignerverteilung und dem ABCD-Formalismus ist es möglich, die Strahlausbreitung durch aberations- und verlustfreie Systeme mit einem einfachen Matrix-Formalismus zu beschreiben. Aus diesem Grund basiert auch die Norm ISO 11146 zur Strahlcharakterisierung auf den ersten und zweiten Momenten der Wignerverteilung [2], die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.2 Momente der Wignerverteilung

Die normierten Momente der Wignerverteilung sind definiert als

$$\langle x^k y^l \Theta_x^m \Theta_y^n \rangle = \frac{\int x^k \cdot y^l \cdot \Theta_x^m \cdot \Theta_y^n \cdot W(\vec{r}, \vec{\Theta}, z) d\vec{r} d\vec{\Theta}}{\int W(\vec{r}, \vec{\Theta}, z) d\vec{r} d\vec{\Theta}} \quad \text{mit } k, l, m, n \geq 0 \quad (2.3)$$

wobei im Folgenden die Abhängigkeit vom Ort z nicht mehr explizit aufgeführt wird. Die Summe der Parameter k , l , m und n wird als Ordnung der Momente bezeichnet. Die physikalischen Eigenschaften der so berechneten Momente des Laserstrahls werden im weiteren vorgestellt.

Das Integral der Wignerfunktion über alle Phasenraumkoordinaten

$$P = \int W(\vec{r}, \vec{\Theta}) d\vec{r} d\vec{\Theta} \quad (2.4)$$

beschreibt die Gesamtleistung P des Laserstrahls.

Das erste normierte Moment einer Verteilung ist in der Statistik gleichbedeutend mit dem Erwartungswert oder in der Mechanik mit dem Schwerpunkt der Verteilung. Die ersten normierten Momente der Wignerverteilung beschreiben den Schwerpunkt des Strahls im Phasenraum, der gleichbedeutend mit dem Schwerpunkt im Ortsraum und der Ausbreitungsrichtung des Strahls ist. Es kann gezeigt werden, dass die ersten normierte Momente eines Laserstrahls sich in einem ABCD-System wie ein geometrischer Strahl ausbreiten [28].

Für die Berechnung der Ortsmomente $\langle x \rangle$ und $\langle y \rangle$ ist entscheidend, dass mit Hilfe der Gleichung 2.2 die Ortsmomente als normierte Momente der Leistungsdichteverteilung $E(\vec{r})$ berechnet werden können

$$\langle x \rangle = \frac{1}{P} \int x \cdot W(\vec{r}, \vec{\Theta}) d\vec{r} d\vec{\Theta} = \frac{1}{P} \int x \cdot E(\vec{r}) d\vec{r} \quad (2.5)$$

und

$$\langle y \rangle = \frac{1}{P} \int y \cdot W(\vec{r}, \vec{\Theta}) d\vec{r} d\vec{\Theta} = \frac{1}{P} \int y \cdot E(\vec{r}) d\vec{r} \quad (2.6)$$

so dass die Ortsmomente der Wignerverteilung durch Messung der Leistungsdichteverteilung im Ortsraum und einer entsprechenden Gewichtung direkt, das heißt ohne Bestimmung der Wignerverteilung, berechenbar sind.

Diese Überlegung gilt auch für die normierten und auf den Schwerpunkt ($\langle x \rangle, \langle y \rangle$) zentrierten Ortsmomente zweiter Ordnung

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{P} \int (x - \langle x \rangle)^2 \cdot W(\vec{r}, \vec{\Theta}) d\vec{r} d\vec{\Theta} = \frac{1}{P} \int (x - \langle x \rangle)^2 \cdot E(\vec{r}) d\vec{r} \quad (2.7)$$

$$\langle y^2 \rangle = \frac{1}{P} \int (y - \langle y \rangle)^2 \cdot W(\vec{r}, \vec{\Theta}) d\vec{r} d\vec{\Theta} = \frac{1}{P} \int (y - \langle y \rangle)^2 \cdot E(\vec{r}) d\vec{r} \quad (2.8)$$

und

$$\langle xy \rangle = \frac{1}{P} \int (x - \langle x \rangle) \cdot (y - \langle y \rangle) \cdot W(\vec{r}, \vec{\Theta}) d\vec{r} d\vec{\Theta} = \frac{1}{P} \int (x - \langle x \rangle) \cdot (y - \langle y \rangle) \cdot E(\vec{r}) d\vec{r}. \quad (2.9)$$

Diese zweiten normierten und zentrierten Ortsmomente beschreiben die geometrische Ausdehnung des Strahls, wie in Abschnitt 2.4.1 gezeigt werden wird. Die Bestimmung der Ortsmomente in mehreren Ebenen ermöglicht die Bestimmung aller zehn zweiten Momente nach der Norm 11146, die in Kapitel 4 erläutert wird.

Neben den bisher diskutierten drei Ortsmomenten zweiter Ordnung gibt es noch weitere sieben Momente zweiter Ordnung. Diese zehn zweiten normierten, für welche die Bedingung $k + l + m + n = 2$, wobei k, l, m und n natürliche Zahlen oder Null sind, gilt, werden ohne Beschränkung der Allgemeinheit auf den Schwerpunkt im Phasenraum ($\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle \Theta_x \rangle, \langle \Theta_y \rangle$) zentriert. Diese normierten und zentrierten Momente zweiter Ordnung werden im Folgenden in dieser Arbeit als zweite Momente bezeichnet. In der sogenannten Strahlmatrix P werden diese zehn zweiten Momente symmetrisch angeordnet [34]

$$P = \begin{pmatrix} W & M \\ M^T & U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xy \rangle & \langle x\Theta_x \rangle & \langle x\Theta_y \rangle \\ \langle xy \rangle & \langle y^2 \rangle & \langle y\Theta_x \rangle & \langle y\Theta_y \rangle \\ \langle x\Theta_x \rangle & \langle y\Theta_x \rangle & \langle \Theta_x^2 \rangle & \langle \Theta_x\Theta_y \rangle \\ \langle x\Theta_y \rangle & \langle y\Theta_y \rangle & \langle \Theta_x\Theta_y \rangle & \langle \Theta_y^2 \rangle \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Die 2x2-Matrix W wird mit den zweiten Ortsmomenten und die 2x2-Matrix U mit den Winkelmomenten gebildet, die die Ausdehnung des Strahls im Fernfeld beschreiben. Die Phasenfront und der sogenannte Twistparameter werden mit Hilfe der gemischten Ortswinkelmente der 2x2-Matrix M berechnet. Diese physikalischen Zusammenhänge werden in Abschnitt 2.4 erläutert.

Für die Ausbreitung der zweiten Momente durch ein verlustfreies und aberationsfreies optisches System, dessen Eigenschaften mit Hilfe der Systemmatrix S beschrieben wird, gilt das folgende Ausbreitungsgesetz [34]

$$\tilde{P} = S \cdot P \cdot S^T \quad (2.11)$$

wobei S^T die Transponierte der Systemmatrix bezeichnet und \tilde{P} die Strahlmatrix nach der Ausbreitung durch das optische System. Die Systemmatrix S muss die sogenannte Symplektizitätsbedingung erfüllen

$$J = S \cdot J \cdot S^T \text{ mit } J = \begin{pmatrix} O & I \\ -I & O \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

mit der 2x2-Einheitsmatrix I und O der 2x2-Nullmatrix.

Die Ausbreitung der zweiten Momente nach Gleichung 2.11 wird in Kapitel 3 an einigen Beispielen vorgestellt. Diese Formel wird oft auch als sogenannter ABCD-Matrix-Formalismus bezeichnet, da dieses Ausbreitungsgesetz sehr eng mit dem ABCD-Formalismus der geometrischen Optik verwandt ist. So werden zum Beispiel bei beiden Berechnungen die gleichen optischen Systemmatrizen verwendet.

2.3 Klassifizierung der Laserstrahlen

Anhand der Symmetrie der Strahlmatrix ist es möglich, drei verschiedene Typen von Strahlen zu unterscheiden. Der Strahl mit höchster Symmetrie ist der sogenann-

3 Ausbreitung von Laserstrahlen durch einige optische Systeme

Mit Hilfe des ABCD-Formalismus werden in diesem Kapitel an drei Beispielen einige fundamentale Eigenschaften der Ausbreitung von Laserstrahlen beschrieben. Im ersten Abschnitt wird die freie Ausbreitung eines Laserstrahls erläutert. Die freie Ausbreitung ist sicherlich das wichtigste, bekannteste und am häufigsten verwendete optische System neben sphärischen Linsen. In diesem Abschnitt werden des Weiteren die Zusammenhänge zwischen den Strahldurchmessern und den Momenten wie auch weiterer Strahlparameter wie zum Beispiel die Rayleighlänge eines Strahls eingeführt.

In dem darauf folgenden Abschnitt wird der Einfluss der Wahl des Koordinatensystems auf die Messung eines einfach astigmatischen Strahls beschrieben, da im Allgemeinen das Koordinatensystem der Messung nicht mit dem Hauptachsensystem des Strahls übereinstimmt.

In Abschnitt 3.3 dieses Kapitels werden die Eigenschaften von Laserstrahlen bei der Ausbreitung eines Laserstrahls durch eine Zylinderlinse vorgestellt. In den Kapiteln 7 und 8 wird die Ausbreitung durch eine Zylinderlinse verwendet, um aus einem einfach astigmatischen Strahl einen allgemein astigmatischen Strahl zu erzeugen, um diesen allgemein astigmatischen Strahl im Anschluss zu charakterisieren.

3.1 Freie Propagation eines Laserstrahls

Die Ausbreitung eines Laserstrahls über eine Strecke z wird durch die Systemmatrix [34]

$$S_{fp}(z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & z \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

beschrieben. Nach Gleichung 2.11 ergibt sich mit der obigen Systemmatrix für die freie Propagation und der Strahlmatrix P eines allgemein astigmatischen Strahls, die mit den Momenten am Ort $z = 0$ gebildet wird,

$$\begin{aligned}\langle x^2 \rangle(z) &= \langle x^2 \rangle + 2 \langle x \Theta_x \rangle z + \langle \Theta_x^2 \rangle z^2 \\ \langle xy \rangle(z) &= \langle xy \rangle + (\langle x \Theta_y \rangle + \langle y \Theta_x \rangle) z + \langle \Theta_x \Theta_y \rangle z^2 \\ \langle y^2 \rangle(z) &= \langle y^2 \rangle + 2 \langle y \Theta_y \rangle z + \langle \Theta_y^2 \rangle z^2\end{aligned}\quad (3.2)$$

für die Ortsmomente in der Ebene z und für die gemischten Ortswinkelmomente

$$\begin{aligned}\langle x \Theta_x \rangle(z) &= \langle x \Theta_x \rangle + \langle \Theta_x^2 \rangle z \\ \langle x \Theta_y \rangle(z) &= \langle x \Theta_y \rangle + \langle \Theta_x \Theta_y \rangle z \\ \langle y \Theta_x \rangle(z) &= \langle y \Theta_x \rangle + \langle \Theta_x \Theta_y \rangle z \\ \langle y \Theta_y \rangle(z) &= \langle y \Theta_y \rangle + \langle \Theta_y^2 \rangle z\end{aligned}\quad (3.3)$$

Während die Winkelmomente bei freier Propagation konstant bleiben. Die gemischten Ortsmomente besitzen eine lineare Abhängigkeit von z , während die Ortsmomente eine quadratische Abhängigkeit aufweisen. Diese quadratische Ortsabhängigkeit wird in ISO 11146 genutzt, um die zweiten Momente und die Strahleigenschaften zu bestimmen, in dem in mehreren Ebenen entlang der Ausbreitungsrichtung z die Strahldurchmesser ($d_x = 4\sqrt{\langle x^2 \rangle}$, $d_y = 4\sqrt{\langle y^2 \rangle}$) bestimmt werden. An das Quadrat der gemessenen Strahldurchmesser werden dann Parabeln wie in Gleichung 3.2 angepasst und die zweiten Momente bestimmt. Diese Verfahren wird in Kapitel 4 vorgestellt.

Aus der Definition der Strahldurchmesser 2.17 und 2.18 und der Gleichungen 3.2 folgt die folgende Gleichung, die häufig zur Beschreibung der Strahldurchmesser bei freier Propagation verwendet wird

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}, \quad (3.4)$$

wobei z die Entfernung vom kleinsten Strahldurchmesser d_0 , der sogenannten Strahltaille, und z_R die Rayleighlänge bezeichnen. Diese Gleichung kann sowohl für den Strahldurchmesser eines stigmatischen Strahls verwendet werden wie auch für die Strahldurchmesser entlang einer bestimmten azimuthalen Richtung eines nicht stigmatischen Strahles. Im Allgemeinen unterscheiden sich bei einfach astigmatischen und allgemein astigmatischen Strahlen die Taillenpositionen, Taillendurchmesser und Rayleighlängen, die dann in der obigen Gleichung verwendet werden.

Bei einer Entfernung von einer Rayleighlänge von der Strahltaile wächst der Strahldurchmesser um den Faktor $\sqrt{2}$ an. Die Rayleighlänge wird aus diesem Grund auch als Maß für die Schärfentiefe des Laserstrahls in der Materialbearbeitung verwendet. Eine andere Schreibweise der Gleichung 3.4 ist die folgende

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + (z\Theta/d_0)^2}, \quad (3.5)$$

die zeigt, dass der Strahldurchmesser für große z linear mit der Entfernung ansteigt, wobei die Größe des Anstiegs vom Divergenzwinkels Θ abhängt. Bei dieser Schreibweise wurde die Rayleighlänge durch das Verhältnis von Tailldurchmesser zu Divergenzwinkel ersetzt.

Der Zusammenhang zwischen den zweiten Momenten und ihrer physikalischen Bedeutung ist bereits in Kapitel 2 besprochen worden, ohne die aufgestellten Formeln mit Beispielen zu motivieren. Der Strahldurchmesser entlang der horizontalen Koordinatenachse ist in Kapitel 2 als der vierfache Wert der Quadratwurzel des zweiten Ortsmoment $\langle x^2 \rangle$ definiert worden. Durch Vergleich der Gleichungen 3.2 und der Gleichungen 3.4 und 3.5 zeigt sich die Motivation für die so getroffene Definition. Aus dem Vergleich dieser Formeln ist es möglich, weitere interessante Eigenschaften des Laserstrahls mit Hilfe der zweiten Momente zu beschreiben. Eine Übersicht hierzu ist in [35] zusammengefasst.

Das Minimum des Ortsmomentes $\langle x^2 \rangle$ wird an der Strahltaillenposition erreicht und befindet sich bei

$$z_{0,x} = -\frac{\langle x\Theta_x \rangle}{\langle \Theta_x^2 \rangle}, \quad (3.6)$$

wobei das Ortsmoment am Ort der Strahltaile

$$\langle x^2 \rangle(z_{0,x}) = \langle x^2 \rangle - \frac{\langle x\Theta_x \rangle^2}{\langle \Theta_x^2 \rangle} \quad (3.7)$$

beträgt.

Aus den obigen Formeln ergibt sich die Rayleighlänge in Abhängigkeit der Momente in x-Richtung als

$$z_{R,x} = \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle}{\langle \Theta_x^2 \rangle} - \frac{\langle x \Theta_x \rangle^2}{\langle \Theta_x^2 \rangle^2}}. \quad (3.8)$$

Die bisher betrachteten Größen sind alle direkt mit dem Strahldurchmesser verknüpft. Das gemischte Ortswinkelmoment $\langle x \Theta_x \rangle$ wird an der Strahltaile Null (Gleichung 3.3 und 3.6). Es ist bekannt, dass die Wellenfront an der Strahltaile eben ist, so dass der Wert des Krümmungsradius unendlich ist. In Entfernung von einer Rayleighlänge von der Strahltaile erreicht der Krümmungsradius sein Minimum und steigt dann wieder an. Für große Entfernungen von der Strahltaile steigt der Krümmungsradius linear mit der Entfernung wie bei einer Kugelwelle an. Wird das zweite Ortsmoment $\langle x^2 \rangle(z)$ durch das gemischte Ortswinkelmoment $\langle x \Theta_x \rangle(z)$ geteilt, so ergibt sich die gewünschte Abhängigkeit für den Krümmungsradius [35]

$$R_{fp,x}(z) = \frac{\langle x^2 \rangle(z)}{\langle x \Theta_x \rangle(z)} = \frac{\langle x^2 \rangle + 2 \langle x \Theta_x \rangle z + \langle \Theta_x^2 \rangle z^2}{\langle x \Theta_x \rangle + z \langle \Theta_x^2 \rangle} \quad (3.9)$$

Die obigen Gleichungen wurden alle für die x -Koordinatenachse hergeleitet, durch Drehung des Koordinatensystem ist es möglich entsprechende Gleichungen für jeden azimuthalen Winkel des Strahls zu berechnen.

Die Summe der Ortsmomente $\langle x^2 \rangle$ und $\langle y^2 \rangle$ bilden ein verallgemeinertes Moment $\langle r^2 \rangle$, das gegenüber Drehung des Strahls invariant ist und das so zur Definition eines verallgemeinerten Strahldurchmesser verwendet werden kann [34]. Die verallgemeinerte Strahltaile ist das Minimum des verallgemeinerten Moment $\langle r^2 \rangle$ und befindet sich bei

$$z_{0,g} = -\frac{\langle x \Theta_x \rangle + \langle y \Theta_y \rangle}{\langle \Theta_x^2 \rangle + \langle \Theta_y^2 \rangle}. \quad (3.10)$$

Unter Drehung des Koordinatensystems sind, wie auch schon die Summe der beiden Ortsmomente, der Nenner und der Zähler in Gleichung 3.10 jeweils konstant. Das bedeutet, dass diese drei Summen für die Definition der verallgemeinerten Strahlparameter verwendet werden können. Die verallgemeinerte Rayleighlänge beschreibt die Entfernung von der verallgemeinerten Strahltaile, bei der der verallgemeinerten Strahldurchmesser um den Faktor $\sqrt{2}$ zum Tailendurchmesser angewachsen ist und ist gegeben durch [5, 35]

$$z_{R,g} = \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle}{\langle \Theta_x^2 \rangle + \langle \Theta_y^2 \rangle} - \left(\frac{\langle x\Theta_x \rangle + \langle y\Theta_y \rangle}{\langle \Theta_x^2 \rangle + \langle \Theta_y^2 \rangle} \right)^2}. \quad (3.11)$$

Aus der Summe der beiden Winkelmomente $\langle \Theta_x^2 \rangle$ und $\langle \Theta_y^2 \rangle$ ergibt sich analog der verallgemeinerte Divergenzwinkel. Diese verallgemeinerten Größen sind unabhängig von der Orientierung des verwendeten Koordinatensystems.

Die Orientierung der Hauptachsen eines Laserstrahls ist eine weitere interessante Größe bei der Ausbreitung eines Laserstrahls. Verändert sich der Hauptachsenwinkel bei der Ausbreitung, so handelt es sich um einen allgemein astigmatischen Strahl, wobei dies eine hinreichende, aber nicht notwendige Bedingung ist. Der Hauptachsenwinkel in Abhängigkeit der Position z ist

$$\varphi(z) = \frac{1}{2} \arctan \frac{2(\langle xy \rangle + (\langle x\Theta_y \rangle + \langle y\Theta_x \rangle)z + \langle \Theta_x\Theta_y \rangle z^2)}{(\langle x^2 \rangle + 2\langle x\Theta_x \rangle z + \langle \Theta_x^2 \rangle z^2) - (\langle y^2 \rangle + 2\langle y\Theta_y \rangle z + \langle \Theta_y^2 \rangle z^2)}. \quad (3.12)$$

Für sehr große z ist der Winkel der Hauptachsen gleich dem Winkel, der sich aus den zweiten Winkelmomente ergibt

$$\varphi_\Theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\langle \Theta_x\Theta_y \rangle}{\langle \Theta_x^2 \rangle - \langle \Theta_y^2 \rangle}. \quad (3.13)$$

Der Winkel φ beträgt $\pm 45^\circ$ und wechselt das Vorzeichen, wenn das Argument der Arkustangensfunktion eine Polstelle besitzt, wenn $\langle x^2 \rangle(z) = \langle y^2 \rangle(z)$ und $\langle xy \rangle(z) \neq 0$. Anschaulich bedeutet dies, dass die Strahldurchmesser entlang der Koordinatenachsen an der Polstelle gleich groß sind und die Strahlhauptachsen entlang der Winkelhalbierenden orientiert sind. Der Winkel φ ändert an diesen Stellen das Vorzeichen, da der Winkel so definiert ist, dass er den Winkel zu der Hauptachse bezeichnet, deren Winkel zur x -Koordinatenachse geringer ist. Mit dem Vorzeichenwechsel ändert sich damit auch die Bezeichnung der Hauptachsen. Dieser Übergang ist zum Beispiel in Bild 7.15 dargestellt. Prinzipiell kann es maximal zwei solcher Polstellen geben.

Je nach Wahl der Orientierung des Koordinatensystems ist es im Allgemeinen möglich, dass eines der beiden gemischten Momente $\langle xy \rangle$ oder $\langle \Theta_x\Theta_y \rangle$ verschwindet. Wird zum Beispiel der Winkel so gewählt, dass das gemischte Winkelmoment $\langle \Theta_x\Theta_y \rangle = 0$ verschwindet, dann ist das Koordinatensystem parallel zu den Hauptachsen der Divergenzwinkel ausgerichtet. Bei der Strahlcharakterisierung werden

4 ISO 11146

In diesem Kapitel wird das Messverfahren nach DIN EN ISO 11146:2003 beschrieben. Zuerst wird die Vorschrift zur Vermessung stigmatischer und einfach astigmatischer Strahlen präsentiert. Im darauf folgenden Abschnitt wird das neue Messverfahren zur Charakterisierung eines allgemein astigmatischen Strahls nach ISO/FDIS 11146-2 vorgestellt. Es sollen in diesem Kapitel nicht die Vorgaben der Norm zitiert werden, vielmehr werden die wichtigsten Aspekte des Messverfahrens kurz erläutert.

Die Vermessung stigmatischer und einfach astigmatischer Strahlen wird seit mehr als 15 Jahren diskutiert und das Verfahren ist in den Projekten zur Strahl- und Optikcharakterisierung CHOCLAB I und CHOCLAB II ausgiebig in sogenannten Round-Robin-Experimenten getestet worden [8, 9, 10, 39, 40, 41].

Das Verfahren zur Charakterisierung allgemein astigmatischer Strahlen ist zur Zeit ein Normenvorschlag. Dieses Verfahren ist bisher nicht in einem Round-Robin-Experiment überprüft worden und wird in Kapitel 7 zur Charakterisierung eines allgemein astigmatischen Strahls eingesetzt werden. Hierbei wird der Normenvorschlag erstmals systematisch untersucht.

4.1 Charakterisierung einfach astigmatischer und stigmatischer Strahlen

Die Vermessung von Laserstrahlen basiert auf der Messung der Leistungsdichteverteilung an unterschiedlichen Positionen entlang der Ausbreitungsrichtung des zu vermessenden Laserstrahls. Im Falle eines Pulslasers ist die Leistungsdichteverteilung durch die Energiedichteverteilung zu ersetzen. Die Aufnahme der Leistungsdichteverteilung erfordert einen ortsauflösenden Detektor mit gutem Signal-zu-Rauschverhältnis. Als Detektor wird in vielen Fällen eine CCD-Kamera eingesetzt, bei der die Ortsauflösung sich aus dem Abstand der Bildpunkte ergibt. Um eine ausreichende Ortsauflösung zu erreichen, sollte die kleinst mögliche Auflösung mindestens $1/20$ des kleinsten Strahldurchmesser betragen [3, 39].

Typische Kameras zur Strahldiagnose besitzen ein Signal-zu-Rauschverhältnis von besser als 50dB. Es gilt bei jeder Messung dieses Signal-zu-Rauschverhältnis zu nutzen, das heißt bei jeder Messung ist darauf zu achten, dass die Leistungsdichteverteilung zum Beispiel mit Hilfe von Graufiltern so angepasst wird, dass die Dynamik der Kamera optimal genutzt wird. Die hierbei verwendeten Abschwächer dürfen die relative Leistungsdichteverteilung nicht beeinflussen. Die Anpassung der Leistungsdichteverteilung in den einzelnen Messebenen ist nicht nur eine notwendige Maßnahme, um ein gute Messung zu erzielen, sondern diese Anpassung bestimmt bei den meisten Messungen die notwendige Zeit, um die Vermessung des Laserstrahls durchzuführen.

Die Leistungsdichteverteilung ist in mindestens 10 Messebenen aufzunehmen, von denen die eine Hälfte innerhalb einer Rayleighlänge auf beiden Seiten der Strahltaille und 5 weitere Messebenen jenseits von zwei Rayleighlängen auf beiden Seiten der Strahltaille durchzuführen sind. Diese Vorgabe ist in Bild 4.1 dargestellt. Diese Bedingung muss für beide Koordinatenachsen erfüllt werden, das heißt für einen einfach astigmatischen Strahl mit stark unterschiedlichen Tailenposition oder unterschiedlichen Rayleighlängen sind mehr Messebenen als die geforderten 10 notwendig.

Aus den gemessenen Leistungsdichteverteilungen sind die Strahldurchmesser mit Hilfe der zweiten Ortsmomente zu berechnen. Hierzu sind Maßnahmen zur Verrin-

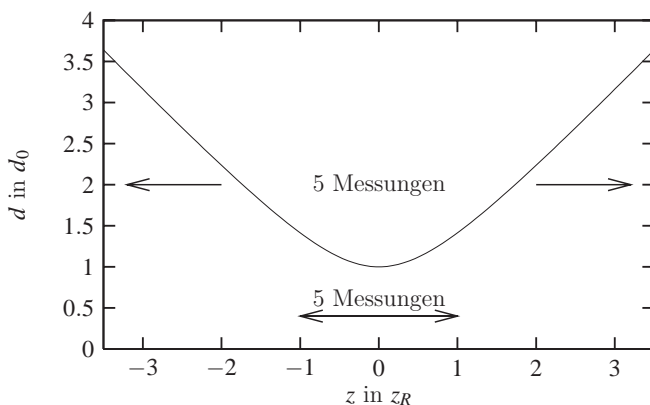


Bild 4.1: Messprinzip zur Vermessung stigmatischer und einfach astigmatischer Strahlen nach ISO 11146, die eingezeichnete Strahlkaustik ist auf den Tailendurchmesser d_0 und die Rayleighlänge z_R normiert.

5 Bestimmung der Ortsmomente

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Berechnung der Ortsmomente $\langle x^2 \rangle$, $\langle y^2 \rangle$ und $\langle xy \rangle$ aus aufgenommen Leistungsdichteverteilungen vorgestellt. In der Praxis werden meist CCD-Kameras zur Aufnahme der Leistungsdichteverteilung eingesetzt, deren Eigenschaften und Funktionsweise im Anhang A besprochen werden. In diesem Kapitel werden auch mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Genauigkeit erläutert, die im Bereich der Astronomie angewendet werden.

Im folgenden Abschnitt werden die notwendigen Methoden zur Bestimmung der Ortsmomente in der Strahldiagnose vorgestellt und diskutiert. Die Bestimmung der Ortsmomente in der jeweiligen Messebene ist die Grundlage für die Bestimmung aller Strahlparameter nach dem Verfahren in ISO 11146, das heißt eine möglichst exakte Bestimmung der Ortsmomente ist die Grundlage für eine gute Messung der abgeleiteten Strahlparameter wie zum Beispiel der Beugungsmaßzahlen oder der Divergenzwinkel.

Die Bestimmung der Ortsmomente mit einem Matrixdetektor erfordert zwei wichtige Schritte, zum einen sind Methoden notwendig, um den Bilduntergrund von den eigentlichen Messwerten zu trennen. Diese Hintergrundmethoden werden in Abschnitt 5.1.1 vorgestellt. Des weiteren ist eine Beschränkung des aufgenommen Bildes auf den Bereich des aufgenommenen Strahles notwendig, da der Wert der zweiten Momente sehr stark von den Intensitäten im Außenbereich des Bildes abhängt, da diese quadratisch mit dem Abstand gewichtet werden. Um mögliche Fehler bei der Berechnung der Momente zu minimieren, wird ein iteratives Verfahren angewendet, um diesen sogenannten Integrationsbereich zu bestimmen. In Abschnitt 5.1.2 werden hierzu vier verschiedene Geometrien des Integrationsbereiches untersucht.

Die Auswirkung von Strahllage- und Leistungsschwankungen auf die zweiten Ortsmomente wird im letzten Teil dieses Kapitels besprochen. Neben der Aufnahme von Leistungsdichteverteilungen und einer anschließenden Berechnung der Ortsmomente besteht eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der zweiten Momente, die auf einer optischen Integration und Gewichtung des Strahls basiert. Diese alternative Methode zur Bestimmung der zweiten Ortsmomente wird in Kapitel 6 vorgestellt.

5.1 Bestimmung der Ortsmomente $\langle x^2 \rangle$, $\langle y^2 \rangle$ und $\langle xy \rangle$

Zur Charakterisierung von Laserstrahlen ist es notwendig in mehreren Ebenen die Leistungsdichteverteilung mit einem geeigneten Detektor zum Beispiel einer CCD-Kamera aufzunehmen. Das aufgenommene Bild besteht aus der Leistungsdichteverteilung des Strahls und einem Hintergrund, der sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammensetzt. Bereits 1989 [42] wurde bei der Laserstrahlcharakterisierung auf die Notwendigkeit der Korrektur des Hintergrundes hingewiesen, um eine möglichst hohe Messgenauigkeit zu erzielen.

Neben der Hintergrundkorrektur ist auch die Beschränkung des Bildbereiches, der sogenannte Integrationsbereich, der zur Berechnung der Momente verwendet wird, ein wichtiger Schritt bei der Berechnung der zweiten Momente. Wird der Bereich zu klein gewählt, so ergeben sich zu geringe Werte der Momente, wird er zu groß gewählt, so können die Werte sowohl zu groß als auch zu gering werden.

Das Bild 5.1 zeigt eine aufgenommene Leistungsdichteverteilung eines allgemein astigmatischen Laserstrahls. Die Strahldurchmesser sind in Form einer Ellipse mit den beiden Hauptachsendurchmesser eingezeichnet. Das diese Ellipse einschließende Rechteck ist parallel zu den Hauptachsen des Strahls ausgerichtet und die Kantenlängen sind dreimal so lang wie die jeweiligen Hauptachsenstrahldurchmesser. Dieses Rechteck ist der Integrationsbereich wie er nach dem Normenvorschlag ISO/FDIS 11146-2 zu wählen ist. Das Rechteck entlang der Bildkanten kennzeichnet den sogenannten Randbereich, der für die Korrektur des Hintergrundes verwendet wird. In diesem Beispiel beträgt die Breite des Randbereiches, der sich von den Bildkanten bis zum eingezeichneten Rechteck erstreckt, 25 Bildpunkte.

Im Folgenden werden zuerst die Methoden zur Korrektur des Hintergrundes erläutert. Im Anschluss daran wird die Bestimmung des Integrationsbereiches vorgestellt.

5.1.1 Hintergrundmethoden

Das aufgenommene Bild einer Leistungsdichteverteilung eines Laserstrahls besteht zum einen aus der Leistungsdichteverteilung, die gemessen werden soll, und dem sogenannten Hintergrund. Der Hintergrund ergibt sich aus den Eigenschaften der

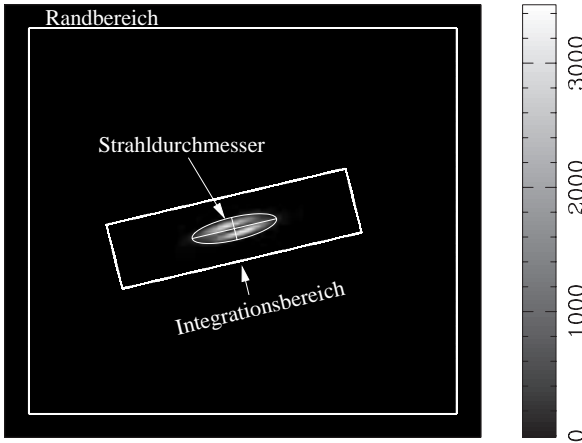


Bild 5.1: Aufnahme einer Intensitätsverteilung mit eingezeichnetem Randbereich, den Strahlhauptachsendurchmessern und dem rechteckigen Integrationsbereich, der parallel zu den Hauptachsen des Strahls ausgerichtet ist.

Kamera und zusätzlichen Lichtquellen, wie zum Beispiel Streulicht, Umgebungslicht oder auch Reflexionen des Laserstrahls an Optiken des Messaufbaus. Diese zusätzlichen Lichtquellen sind durch eine geeignete Wahl des experimentellen Aufbaus zu vermeiden. Wenn dies nicht möglich ist, so dürfen diese Lichtquellen nicht die Bereiche, die zur Auswertung der Leistungsdichteverteilung verwendet werden, das heißt insbesondere den Randbereich wie auch den Integrationsbereich, beeinflussen. Umgebungslicht kann bei Kameramessungen sehr gut durch ein Neutraldichtefilter vor dem Detektor unterdrückt werden. Trotz dieser Maßnahmen setzt sich das aufgenommene Bild aus der Leistungsdichteverteilung und einem Hintergrund zusammen, der zum Beispiel auch das Rauschen des Detektors selbst enthält. Um die Leistungsdichteverteilung des Strahls zu bestimmen, gilt es deshalb den Hintergrund zu bestimmen und diesen vom aufgenommenen Bild abzuziehen.

Die Norm unterscheidet zwischen drei Anteilen des Hintergrunds, dem homogenen Anteil, dem inhomogenen Anteil und dem hochfrequenten Anteil. Der hochfrequente Anteil ist rein statistischer Natur und verursacht keine systematischen Fehler. Er bestimmt die Wiederholgenauigkeit einer Messung. Durch Aufnahme mehrere Bilder und Mittelung dieser kann dieser Anteil verringert werden. Typischerweise werden hierfür 10 bis 30 Bilder aufgenommen.

Der homogene und der inhomogene Anteil des Hintergrunds verursachen systematische Messfehler. In Bild 5.2 sind die Häufigkeitsverteilungen der Pixelwerte zweier Dunkelbilder einer CCD-Kamera vom Typ Cohu 4912 dargestellt. Die breitere Kurve ist die Häufigkeitsverteilung eines Einzelbildes, während die deutlich schmalere Kurve die Häufigkeitsverteilung eines Bildes zeigt, das durch Mittelung über 10 Dunkelbilder erstellt wurde.

Der Mittelwert der Häufigkeitsverteilungen beträgt 35 in Bild 5.2 und entsteht durch die Anhebung der Spannung des verstärkten Signals des Photoelementes vor der Analog-Digitalwandlung (die Funktionsweise einer CCD-Kamera wird in Anhang A erläutert). Bei dieser Kamera wäre eine etwas geringere Anhebung ebenso möglich, wobei für die Qualität der Messung entscheidend ist, dass beide Flanken der Häufigkeitsverteilungen beobachtet werden können. Der Mittelwert der Verteilungen dieser Dunkelbilder ist das gemittelte Nullniveau der Kamera, das heißt dieser Wert ist im Mittel von jedem Pixel abzuziehen. Hierdurch ergeben sich auch negative Werte der Leistungsdichteverteilung, die in der nachfolgenden numerischen Auswertung auf jeden Fall zu berücksichtigen sind, auch wenn negative Pixelwerte beziehungsweise negative Leistungsdichten als solche nicht gemessen werden. Jedoch sind diese negativen Werte notwendig, um so durch Abzug des Mittelwerts, den Effekt des Rauschens zu korrigieren.

Der Abzug des Mittelwertes des Dunkelbildes beziehungsweise eines kompletten Dunkelbildes von dem aufgenommenen Laserstrahlprofil stellt eine mögliche Grob-

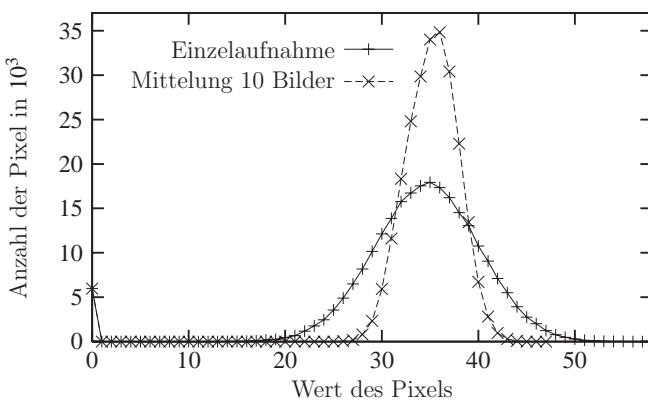


Bild 5.2: Histogramm zweier Dunkelbilder einer Kamera, wobei das Einzelbild eine deutlich breitere Verteilung besitzt als die Mittelung über 10 Dunkelbilder.

korrektur dar, da jedoch im Anschluss die zweiten Momente der Verteilung berechnet werden, bei denen geringste Leistungsanteile am Rand des aufgenommenen Bildes quadratisch gewichtet werden, sind hier große Fehler möglich [9, 13, 39, 44, 45]. Aus diesem Grund ist es notwendig den Bereich für den das zweite Momente berechnet wird zu beschränken und gleichzeitig das Verfahren zur Korrektur des Hintergrunds zu verbessern.

Der Abzug des Mittelwertes des Hintergrundes ist nur dann zulässig, wenn der Hintergrund sehr homogen ist, das heißt, der lokale Mittelwert eines Pixelbereichs darf nicht signifikant von dem Mittelwert des gesamten Hintergrundes abweichen. Eine signifikante Abweichung ist gegeben, wenn der Unterschied des lokalen zu dem globalen Mittelwert größer als die Standardabweichung der gesamten Verteilung ist.

Die Aufnahme eines Dunkelbildes sollte immer direkt vor jeder Bildaufnahme erfolgen, da der Hintergrund stark von den Betriebsbedingungen abhängt und sich schnell verändert. Kommerzielle kamerabasierte Messsysteme wie zum Beispiel das $M^2 - 200$ von Spiricon nehmen aus diesem Grund vor jedem aufgenommenen Laserstrahlprofil mehrere Dunkelbilder auf [46, 47]. Der Abzug eines Dunkelbildes wie es zum Beispiel in der Astronomie üblich ist, führt bei der Laserstrahlanalyse meist nicht zu dem erwünschten Ziel, das Nullniveau der Kamera so zu korrigieren, dass systematische Fehler ausgeschlossen werden können. Die Kameras in der Astronomie sind im Vergleich zu den in der Strahlanalyse wesentlich weniger Umwelteinflüssen ausgesetzt, die die Arbeitsweise der Kamera beeinträchtigen. So wird häufig aus einem homogenen Dunkelbild bei der Aufnahme eines Laserstrahls durch die Wechselwirkung des Strahls mit dem Detektor der Hintergrund stark inhomogen. Aus diesem Grund ist es im Allgemeinen notwendig auch den inhomogenen Hintergrund zu berücksichtigen.

Hierzu gibt es verschiedene Ansätze, von denen zwei in ISO/TR 11146-3 beschrieben werden. Zum einen eine statistische Methode und zum anderen eine Näherungsmethode. Für beide Methoden ist es wichtig einen unbelichteten Bereich des Bildes zu verwenden, aus dem der Mittelwert des Hintergrunds und die Standardabweichung der unbelichteten Bildpunkte berechnet werden. Für diese Berechnung bietet sich zum Beispiel der Randbereich des Bildes an, der im Prinzip die gleiche Information wie ein aufgenommenes Dunkelbild enthält, wenn auch die Anzahl der Bildpunkte geringer ist. Ebenso ist es möglich diese beiden Werte aus einem aufgenommenen Dunkelbild zu bestimmen.

Die statistische Methode bestimmt die Bildpunkte, die belichtet sind, indem vom Wert des Bildpunktes der Mittelwert des Hintergrundes abgezogen wird und die-

6 Alternative Methode zur Bestimmung der Ortsmomente

Neben der Aufnahme einer Leistungsdichteverteilung und einer anschließenden Gewichtung und Integration im Rechner besteht auch die Möglichkeit, die Momente mit Hilfe einer Leistungsmessung hinter Transmissionsfiltern zu messen [54, 56, 57, 58, 59, 60]. Die Momente einer Verteilung sind definiert als das Verhältnis der integrierten gewichteten Verteilung zu dem Integral über die Verteilung. Für die ersten Momente sind die Verteilungen linear und für die zweiten Momente parabolisch mit dem Ort zu gewichten. Die Gewichtung der Leistungsdichteverteilung ist nicht nur am Rechner möglich, sondern auch mit einem Transmissionsfilter, dessen Transmissionprofil senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung so vom Ort abhängt, dass die gewünschte Gewichtung der Leistungsdichteverteilung optisch erfolgt. Filter mit linearem Transmissionprofil sind für die Bestimmung der ersten Momente geeignet, während die zweiten Momente Filter mit parabolischen Transmissionverlauf benötigen. Die Integration erfolgt durch eine Leistungsmessung, somit ist es möglich, mit zwei Leistungsmessungen ein Ortsmoment zu bestimmen. Der eine Detektor misst die mit dem Transmissionfilter gewichtete Leistung, während der zweite die Gesamtleistung bestimmt. Das Verhältnis dieser beiden Leistungen ist das gesuchte Ortsmoment. In der Praxis sind für die Berechnung noch die geometrischen Eigenschaften des verwendeten Filters zu berücksichtigen, die zum Beispiel von der Art des Filters abhängen [58, 61].

Der Vorteil dieser Filter im Vergleich zur Messung der Leistungsdichteverteilung und der anschließenden Berechnung der Momente liegt im geringeren Aufwand bei der Aufbereitung der aufgenommenen Daten und der möglichen höheren zeitlichen Auflösung. Mit einer CCD-Kamera können typischerweise nur wenige Bilder pro Sekunde mit hoher Auflösung aufgenommen werden. Die Leistungsmessung hinter einem Transmissionsfilter kann zum Beispiel mit einer Photodiode erfolgen, so dass eine um einige Größenordnungen höhere zeitliche Auflösung im Vergleich zu einer Kamera möglich ist. Mit einer geeigneten schnellen Photodiode ist es so prinzipiell möglich die Ortsmomente eines hochrepetierenden Pulsasers einzelpulsgenau aufzulösen beziehungsweise hochfrequente Schwankungen bei Dauerstrichlasern zu beobachten.

Das Bild 6.1 zeigt die Messung von Strahldurchmessern entlang einer Strahlkaustik mit zwei unterschiedlichen radialsymmetrischen parabolischen Transmissionsfiltern im Vergleich zu einer Referenzmessung mit einer Kamera. Diese radialsymmetrischen Transmissionsfilter bestehen aus konzentrischen opaken Ringen aus Chrom auf einem Glassubstrat und entsprechenden transmittierenden Bereichen zwischen den Ringen. Die Filter unterscheiden sich im sogenannten Filterdurchmesser, der die Größe des parabolischen Transmissionsprofils beschreibt. Je nach Größe dieses Wertes eignet sich das Filter zur Vermessung eines bestimmten Strahldurchmesserbereichs, der bei dieser Art der Kodierung des Transmissionsfilters typischerweise etwas weniger als eine halbe Größenordnung umfasst. Dies bedeutet, dass für die Messung eines bestimmten Strahldurchmesser immer ein geeignetes Filter vorhanden sein muss.

Das Filter mit dem kleineren Filterdurchmesser von 2,6 mm ist geeignet für Strahldurchmesser zwischen 0,8 mm und 2,0 mm. Strahldurchmesser, die größer als 2,0 mm sind, werden kleiner gemessen als sie tatsächlich sind, da der Strahl größer als die Filterstruktur ist, so dass der Außenbereich des Strahls nicht gewichtet und damit das Ergebnis verfälscht wird. Dies ist in Bild 6.1 für das kleine Filter zu sehen. Das größere Filter ist für Strahldurchmesser bis 4 mm ausgelegt und kann im gesamten Bereich des Strahls, der in Bild 6.1 dargestellt ist, eingesetzt werden.

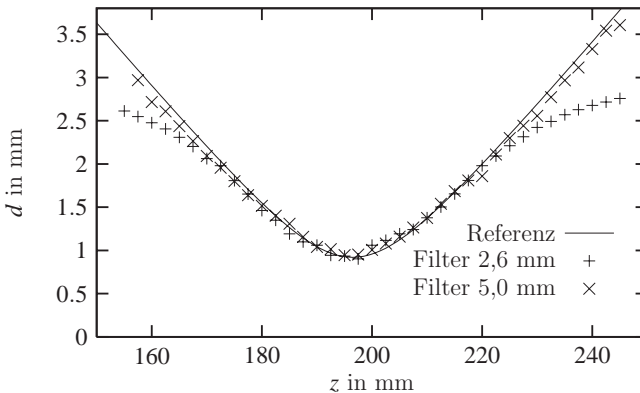


Bild 6.1: Messung eines stigmatischen Strahls mit zwei unterschiedlichen Transmissionsfiltern, die sich im Filterdurchmesser unterscheiden. Die Referenz ist mit einer Kamera aufgenommen worden.

7 Messung nach ISO/FDIS 11146-2

Der Normenvorschlag ISO/FDIS 11146-2 beschreibt ein neues Messverfahren zur Charakterisierung allgemein astigmatischer Strahlen. Zur Untersuchung dieses Verfahrens wird ein einfach astigmatischer Strahl mit Hilfe einer Zylinderlinse, deren Symmetrieachse relativ zu der des einfach astigmatischen Strahls eingestellt werden kann, in einen allgemein astigmatischen Strahl transformiert. Durch Variation des Drehwinkels ist es möglich, unter anderem den Twistparameter nach Gleichung 3.24 einzustellen. Die gemessenen Daten der so erzeugten, allgemein astigmatischen Strahlen werden mit Werten verglichen, die sich aus den Daten des einfach astigmatischen Ausgangsstrahls und des verwendeten optischen Systems ergeben.

In diesem Kapitel wird zuerst in Abschnitt 7.1 der Versuchsaufbau des Experimentes und die Messung des ausgerichteten einfach astigmatischen Ausgangsstrahles vorgestellt. Der folgende Abschnitt 7.2 beschreibt die Grundlagen, die zur Simulation der Ausbreitung der Strahlen durch das optische System eingesetzt werden. Diese Simulation wird in diesem Kapitel verwendet, um die Messdaten mit berechneten Werten zu vergleichen, die sich auf Grund der Berechnungen aus Kapitel 3 und des eingesetzten optischen Systems ergeben. Die Fehlerrechnung für die gemessenen zweiten Momente und der abgeleiteten Invarianten wird in Abschnitt 7.3 präsentiert.

Nach diesen grundlegenden Abschnitten zur Simulation und dem Versuchsaufbau werden in den Abschnitten 7.4 und 7.5 die gemessenen zweiten Momente und die hieraus abgeleiteten Strahlinvarianten in Abhängigkeit des Winkels der twisterzeugenden Zylinderlinse dargestellt. Diese Messdaten werden mit simulierten Werten verglichen, für die das optische System und die Daten des einfach astigmatischen Ausgangsstrahles eingesetzt werden.

In Abschnitt 7.6 wird die Ausbreitung der gemessenen allgemein astigmatischen Strahlen durch den Versuchsaufbau untersucht, um zu überprüfen wie gut die Messwerte für Propagationsrechnungen eingesetzt werden können. Im Rahmen dieses Kapitels wird zusätzlich der Versuchsaufbau auf mögliche systematische Fehler der durchgeführten Versuche und möglicher Auswirkungen auf die gemessenen Werte überprüft.

Die Auswirkung systematischer und statistischer Fehler bei der Bestimmung der zweiten Momente wird in Abschnitt 7.7 mit Hilfe der Simulation untersucht. Im Mittelpunkt dieses Abschnittes stehen die aus den Fehlern der Momente resultierenden Fehler der Invarianten.

In den bisher vorgestellten Abschnitten dieses Kapitels wird das Messverfahren nach ISO/FDIS-11146-2 angewendet, hierzu werden die aufgenommenen Intensitätsverteilungen mit einem rechteckigen Integrationsbereich ausgewertet. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass ein elliptischer Integrationsbereich eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Ortsmomente ermöglicht. Aus diesem Grund werden die aufgenommenen Messwerte in Abschnitt 7.8 mit einem elliptischen Integrationsbereich noch einmal ausgewertet und den Messwerten der Abschnitte 7.4 und 7.5 gegenüber gestellt. Das Kapitel endet mit einer Diskussion des Messverfahrens des Normenvorschlages ISO/FDIS-11146-2.

7.1 Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der in Bild 7.1 dargestellte Versuchsaufbau beschrieben, der in diesem Kapitel verwendet wird. Ein einfach astigmatischer Laserstrahl wird mit einer drehbaren Zylinderlinse in einen allgemein astigmatischen Laserstrahl transformiert. Die Eigenschaften des allgemein astigmatischen Laserstrahls sind von der Orientierung dieser Zylinderlinse abhängig. Die Charakterisierung der allgemein astigmatischen Strahlen wie auch des einfach astigmatischen Ausgangsstrahls erfolgt nach ISO/FDIS-11146-2. Die Messdaten des Ausgangsstrahles und des optischen Systems des Versuchsaufbaus sind die Grundlage für die Simulationen, die in diesem Kapitel verwendet werden.

Der schematische Versuchsaufbau dieses Experiments ist in Bild 7.1 dargestellt. Es wird ein Scheibenlaser verwendet, der einen nahezu perfekten TEM_{10} -Gauß-Hermite-Mode emittiert. Auf Grund des einfachen Aufbaus des Resonators ist es nicht möglich einen vollkommen reinen TEM_{10} -Gauß-Hermite-Mode zu erzielen, dies ist jedoch für das hier vorgestellte Experiment nicht notwendig.

In einem Abstand von 300 mm hinter dem Auskoppelspiegel des Lasers befindet sich eine drehbare Zylinderlinse mit einer Brennweite von 347 mm. Diese Linse transformiert den einfach astigmatischen Strahl in einen allgemein astigmatischen Strahl, wenn die Symmetrieachse der Linse nicht mit der Symmetrieachse des Strahls übereinstimmt. Die Drehung der Linse erfolgt mit einem motorisierten Halter, dessen

Winkelauflösung besser als $0,1^\circ$ ist, um so Winkelfehler zu minimieren. Ein Vergleich dieser Winkelauflösung zu den Winkelabhängigkeiten der Messwerte zeigt, dass mögliche Winkelfehler zu den anderen auftretenden Fehlern vernachlässigt werden können. So ergibt sich zum Beispiel für eine Messgröße mit einer $\cos^2(\phi)$ -Abhängigkeit ein relativer Fehler von maximal 0,17% bei einem Winkelfehler von 0,1%.

Eine sphärische Fokussierlinse mit einer Brennweite von 458 mm, die circa 2 m entfernt vom Auskoppelspiegel steht, fokussiert den Strahl, so dass hinter dieser Linse der Strahl normgerecht mit der Kamera CCD 1 entlang der Messstrecke in mehreren Ebenen aufgenommen werden kann. Alternativ zu dieser Messstrecke, die zur Bestimmung der drei Ausgleichsparabeln an die Ortsmomente $\langle x^2 \rangle(z)$, $\langle xy \rangle(z)$ und $\langle y^2 \rangle(z)$ benutzt wird, wird der Strahl mit Hilfe eines Spiegels auf die zweite Kamera CCD 2 gelenkt, die zur Bestimmung des Twistes eingesetzt wird.

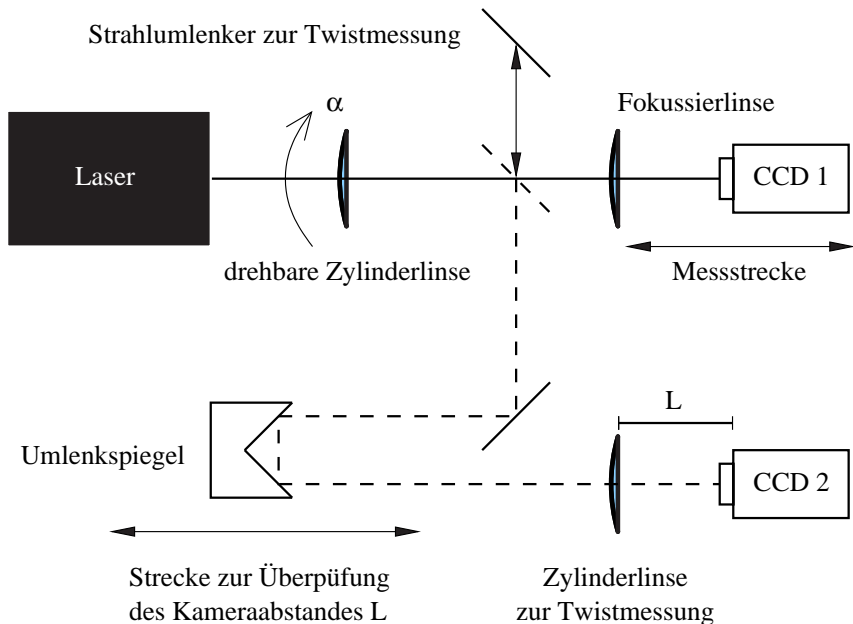


Bild 7.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, die Strecke L ist gleich der Brennweite der Zylinderlinse zur Bestimmung des Twistes, zur Einstellung dieses Abstands wird der verschiebbare Umlenkspiegel eingesetzt.

In die Messstrecke zur Bestimmung des Twistes ist eine verschiebbare Umlenkeinheit integriert, so dass der Strahlweg zwischen der Zylinderlinse zur Twisterzeugung und dem Laser verändert werden kann. Dies ist notwendig um den Abstand L zwischen der Kamera CCD 2 und der Zylinderlinse zur Twistmessung einzustellen. Die Kamera CCD 2 soll sich in der Brennebene der Zylinderlinse befinden. Zur genauen Positionierung wird der Abstand zwischen Kamera und Linse so lange variiert bis der Strahldurchmesser in fokussierender Richtung der Linse unabhängig von der Stellung der Umlenkeinheit ist, mit der der Abstand der Zylinderlinse zum Laser verändert wird. Die Brennweite der verwendeten Zylinderlinse beträgt 232 mm.

Die Verwendung zweier Messstrecken ist im Allgemeinen zur Charakterisierung eines allgemein astigmatischen Strahl nicht notwendig und nach Norm ISO/FDIS 11146-2 nicht vorgeschrieben. Der gewählte Versuchsaufbau besitzt jedoch den Vorteil, dass die Kamera CCD 2 nur einmal relativ zu der Zylinderlinse, die zur Bestimmung der beiden Twistparameter eingesetzt wird, justiert wird und dann in dieser Position verbleibt, während die Kamera CCD 1 zur Bestimmung der Ausbreitung der Ortsmomente in mehreren Ebenen prinzipiell immer verschoben werden muss. Die Verwendung zweier Kameras und der hier gewählte Versuchsaufbau erleichtert somit die Messung, da die Justage der Kamera und der Zylinderlinse zur Bestimmung des Twistes nur einmal durchgeführt werden muss.

Prinzipiell ist die Bestimmung des Twistes an jedem Ort innerhalb des Messaufbaus möglich, solange die Strahlen sich durch stigmatische optische System ausbreiten.

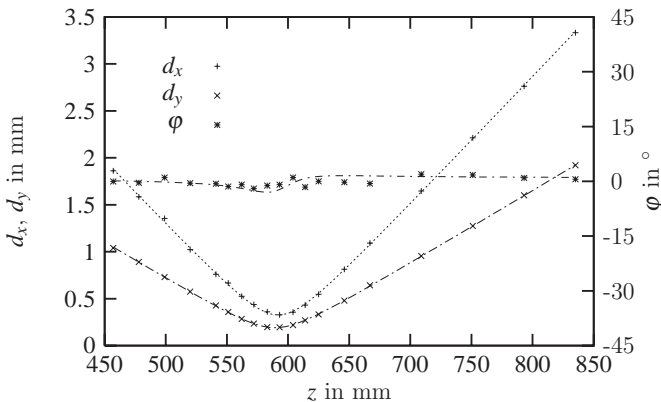


Bild 7.2: Strahldurchmesser entlang der Koordinatenachsen und Drehwinkel φ des ausgerichteten einfach astigmatischen Strahls.

Die Norm ISO/FDIS 11146-2 schlägt vor, die Zylinderlinse in einem Abstand von einer verallgemeinerten Rayleighlänge hinter der verallgemeinerten Strahltaile zu positionieren und eine Brennweite von ungefähr einer verallgemeinerten Rayleighlänge zu wählen. Diese Vorgaben sollen sicherstellen, dass die Größe der Strahldurchmesser so sind, dass im Allgemeinen die Momente gut gemessen werden können. Die in diesem Versuch gewählte Position der Twistmessung weicht von den Vorgaben der Norm ab, die Vorteile liegen in der vereinfachten Justage der Twistmessung und einer flexibleren Handhabung, da eine ganze Reihe allgemein astigmatischer Strahlen in Abhängigkeit der drehbaren Zylinderlinse vermessen wurden.

Die Strahldurchmesser d_x , d_y und der Winkel φ des ausgerichteten einfach astigmatischen Ausgangsstrahls sind in Bild 7.2 dargestellt. Das Hauptachsensystem des Strahls ist um ungefähr 2° gegenüber dem Koordinatensystem verdreht. Dieser Winkel wird bei den folgenden Untersuchungen berücksichtigt. Diese Messung ist ohne die twisterzeugende Zylinderlinse durchgeführt worden. Diese Messwerte sind die Grundlage für die Simulation, die im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

Das Bild 7.3 zeigt die Strahldurchmesser d_x , d_y und den Winkel φ , wenn der Winkel α der twisterzeugenden Zylinderlinse 30° beträgt. Im Vergleich zu dem ausgerichteten einfach astigmatischen Strahl in Bild 7.2 wird deutlich, dass dieser Strahl ein allgemein astigmatischer Strahl ist, da sich der Strahlhauptachsenwinkel entlang der Ausbreitungsrichtung stark ändert. Bei gleich großen Strahldurchmessern $d_x = d_y$ wechselt der Winkel φ von 45° nach -45° , da der Winkel φ den Winkel zwischen der x -Achse und der Hauptachse bezeichnet, die näher der x -Achse ist. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 7.6 an Hand von Bild 7.15 ausführlicher erläutert.

7.2 Grundlagen zur Simulation der Messung

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für die Simulation der Messungen eingeführt und gezeigt, dass die Simulation und die Messwerte gut übereinstimmen. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die Messwerte immer wieder mit dem hier vorgestellten Modell verglichen werden. Die Simulation basiert auf der Charakterisierung des einfach astigmatischen Strahls des Scheibenlasers und der ABCD-Matrix des optischen Systems des Messaufbaus.

Der ausgerichtete einfach astigmatische Strahl des Scheibenlasers wurde mit dem im vorangegangenen Abschnitt 7.1 vorgestellten Messaufbau charakterisiert, wobei

8 Verbessertes Messverfahren

Für die Bestimmung des Twistparameters wird in diesem Kapitel ein erweitertes Messverfahren vorgestellt, das eine mögliche Verbesserung des Messverfahrens nach ISO/FDIS 11146-2 darstellt. Dieses Messverfahren ermöglicht eine genauere Bestimmung des Twistes und verringert mögliche systematische Fehler wie sie bei Anwendung der Messvorschrift des Normenvorschlags auftreten können. Zuerst wird das neue Messverfahren vorgestellt und im Anschluss an unterschiedlichen Laserstrahlen überprüft.

8.1 Messung des Twistes

Zur Bestimmung des Twistparameters ist der Einsatz eines astigmatischen optischen Elementes notwendig. In der Norm ISO/FDIS 11146-2 wird hierzu eine Zylinderlinse eingesetzt und die gemischten Ortsmomente $\langle xy \rangle_h$ und $\langle xy \rangle_v$ in der Brennebene der Zylinderlinse bestimmt, wobei die Indizes h und v , die Fokussierichtung der Zylinderlinse bezeichnen. Dieses Verfahren wird in Abschnitt 4.2 beschrieben und wurde im vorangegangenen Kapitel eingesetzt. Eine mögliche Fehlerquelle bei diesem Verfahren ist die Positionierung der Kamera in der Brennebene.

Der Twist t ergibt sich aus der Differenz der gemischten Ortsmomente $\langle xy \rangle_h(z)$ und $\langle xy \rangle_v(z)$ in Abhängigkeit der Entfernung z zur Zylinderlinse

$$t = \frac{\langle xy \rangle_v(z) - \langle xy \rangle_h(z)}{z^2} \cdot f_c, \quad (8.1)$$

wobei f_c die Brennweite der Zylinderlinse bezeichnet. Aus dieser Gleichung ergibt sich die Formel 4.1 des Normenvorschlags zur Bestimmung des Twistes, wenn die gemischten Ortsmomente in der Brennebene der Zylinderlinse $z = f_c$ gemessen werden. Durch Umformen der obigen Gleichung ergibt sich

$$\langle xy \rangle_v(z) - \langle xy \rangle_h(z) = \frac{t}{f_c} \cdot z^2. \quad (8.2)$$

Die Differenz der gemischten Ortsmomente $\langle xy \rangle_h(z)$ und $\langle xy \rangle_v(z)$ steigt mit dem Abstand z parabolisch an. Durch Messung dieser Differenz in mehreren Ebenen in Abhängigkeit des Ortes ist es so möglich den Parameter t/f_c durch Anpassung einer Parabel zu bestimmen.

Das Bild 8.1 stellt die beiden Ortsmomente $\langle xy \rangle_h(z)$ und $\langle xy \rangle_v(z)$ in Abhängigkeit des Abstandes z dar. Der allgemein astigmatische Strahl, dessen Twistparameter gemessen wird, wurde mit einem im wesentlichen identischer Aufbau wie im vorangegangenen Kapitel 5 durch Transformation eines einfach astigmatischen Strahls durch eine Zylinderlinse erzeugt. Die Symmetrieachse der Zylinderlinse ist bei der hier dargestellten Messung um 30° gegenüber dem Hauptachsensystem des einfach astigmatischen Strahls verdreht.

Die eingezeichneten Punkte in Bild 8.1 zeigen die einzelnen Messwerte in den unterschiedlichen Messebenen, während die eingezeichneten Linien, die beiden an die Messwerte angepassten Parabeln darstellen. Bei freier Ausbreitung besitzen alle drei Ortsmomente eine parabolische Abhängigkeit vom Ort (Gleichung 3.2). Die angepassten Parabeln sollten sich eigentlich am Ort der Zylinderlinse bei $z=0$ mm schneiden, da hier die drei Ortsmomente gleich groß sind. Auf Grund des verwendeten Aufbaus ist die kürzeste Distanz zwischen Kamerachip und der Zylinderlinse 60 mm. Durch Verwendung eines geeigneten optischen Systems ist es prinzipiell möglich, die gemischten Ortsmomente direkt am Ort der Zylinderlinse aufzuneh-

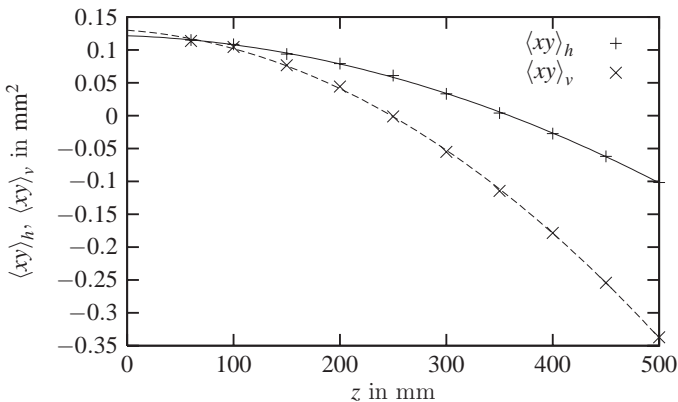


Bild 8.1: Gemischte Ortsmomente $\langle xy \rangle_h$ und $\langle xy \rangle_v$ in Abhängigkeit des Abstandes z zu der Zylinderlinse, die zur Messung des Twistes eingesetzt wird.

men, zum Beispiel durch einen 2f-Aufbau, dies ist jedoch für die Bestimmung des Twistes nicht notwendig.

Prinzipiell bestehen nun zwei Möglichkeiten die aufgenommen Werte auszuwerten. Zum einen ist es möglich jeweils eine Parabel an jedes der beiden Ortsmomente $\langle xy \rangle_h$ und $\langle xy \rangle_v$ anzupassen. Hierbei sind insgesamt sechs Parameter zu bestimmen, aus denen der Twistparameter berechnet wird. Die zweite Möglichkeit ist die Differenz der Momente in der jeweiligen Messebene zu bestimmen und im Anschluss eine Ursprungsparabel anzupassen. Bei diesem Verfahren ergibt sich direkt der Wert des Twistes geteilt durch die Brennweite. Dieses Verfahren ist damit numerisch sehr viel robuster als die zuerst vorgestellte Möglichkeit der Auswertung, jedoch setzt diese Verfahren voraus, dass die Momente jeweils paarweise in einer Messebene bestimmt werden müssen. Diese Einschränkung existiert für das erste Verfahren nicht. Das zweite Messverfahren hat sich in der Praxis als das bessere herausgestellt. In Bild 8.2 ist die Differenz der gemischten Ortsmomente aus Bild 8.1 und die daran angepasste Parabel aufgetragen.

Um eine genaue Messung mit diesem Verfahren durchzuführen, ist eine ähnliche Messvorschrift wie bei der Anpassung der Parabeln an die Ortsmomente $\langle x^2 \rangle$, $\langle xy \rangle$ und $\langle y^2 \rangle$ notwendig. Das bedeutet, es sollten mindestens zehn Wertepaare zur Bestimmung der Differenz $\langle xy \rangle_h(z) - \langle xy \rangle_v(z)$ aufgenommen werden. Diese Messpunkte sollten sowohl den Bereich nahe der Zylinderlinse, in dem die Parabel sehr flach ist, wie auch den Bereich der Parabel $z > f_c$ abdecken, die letzte Forderung

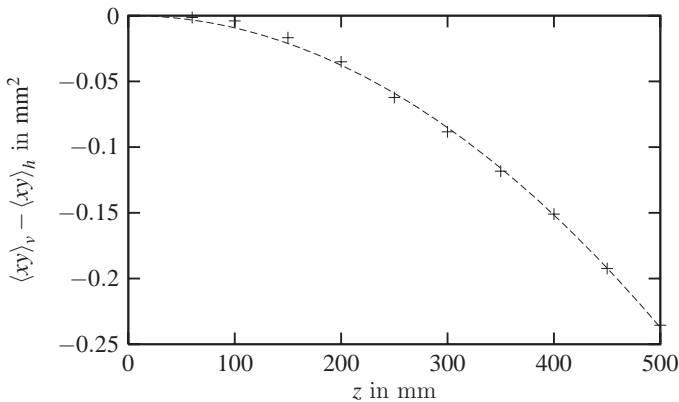


Bild 8.2: Differenz der gemischte Ortsmomente $\langle xy \rangle_h(z)$ und $\langle xy \rangle_v(z)$ und die daran angepasste Parabel zur Bestimmung des Faktors t/f_c .

ist analog der Rayleighlänge bei der Bestimmung der Strahldurchmesser gewählt. Die Qualität der gemessenen Werte kann zum einen anhand der Varianzen des Ausgleichsparameters t/f_c überprüft werden, zum anderen werden mögliche Messfehler durch eine Auftragung der Messwerte und der angepassten Parabel wie in Bild 8.2 leicht sichtbar. Die erzielbare Messgenauigkeit des Verfahrens hängt von der Genauigkeit der Messung der gemischten Ortsmomente $\langle xy \rangle_h$ und $\langle xy \rangle_v$ ab. Die Differenz dieser Momente muss größer als der Fehler der Ortsmomente sein, um eine solche Messung durchzuführen. Diese Grenze des Messverfahrens wird in den nächsten beiden Abschnitten an zwei Beispielen demonstriert.

Die oben genannten Forderungen setzen voraus, dass der Strahl in allen Messebenen normgerecht gemessen werden kann. Dies bedeutet, dass der Strahl weder zu klein, noch zu groß ist, um ihn entlang der Messstrecke aufzunehmen. Die Vorschläge zur Wahl des Ortes der Messung und der Brennweite der Zylinderlinse, die in ISO/FDIS 11146-2 zur Messung des Twistes gemacht werden, können bei dem hier vorgestellten Messverfahren ebenfalls angewendet werden. Durch die Wahl des Einbauortes der Zylinderlinse und der Wahl einer geeigneten Brennweite ist die hier vorgestellte Messung einfach in eine bestehende Messung zu integrieren. Im folgenden Abschnitt werden einige Ergebnisse vorgestellt, bei denen das vorgestellte Messverfahren eingesetzt wird.

8.2 Allgemein astigmatischer Strahl mit Twist

Für die Messungen, die im Folgenden beschrieben werden, wurde ein vergleichbarer Versuchsaufbau wie im vorangegangenen Kapitel 7.1 eingesetzt, um einen einfach astigmatischen Strahl eines Scheibenlasers mit Hilfe einer Zylinderlinse in einen allgemein astigmatischen Strahl zu transformieren. Die Twistmessung erfolgte wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben durch Messung der Differenz $\langle xy \rangle_h(z) - \langle xy \rangle_v(z)$ hinter einer Zylinderlinse, die einige Zentimeter hinter der Fokussierlinse eingebaut wurde. Zur Auswertung der Strahldurchmesser wurde ein elliptischer Integrationsbereich verwendet, der entlang der Hauptachsen ausgerichtet ist.

Die Strahldurchmesser d_x , d_y und der Winkel φ des einfach astigmatischen Strahls sind in Bild 8.3 aufgetragen. Sowohl bei den Strahldurchmessern d_x , wie auch den Winkeln φ wird eine größere Streuung beobachtet als bei der Messung, die in Bild 7.2 dargestellt ist. Die maximale Schwankung des Winkels φ beträgt 4° . Diese Schwankungen in x -Richtung wurden hin und wieder bei dem verwendeten Messaufbau beobachtet und scheinen ein Effekt der Abschwächer vor der Kamera zu sein.

Bei den folgenden Messungen der allgemein astigmatischen Strahlen wurden diese Schwankungen nicht beobachtet.

Die Messung der Differenz der beiden gemischten Ortsmomente $\langle xy \rangle_h$ und $\langle xy \rangle_v$ des einfach astigmatischen Strahls ist in Bild 8.4 dargestellt. Der Twistparameter dieses Strahl sollte Null sein, da der Strahl einfach astigmatisch ist. Die Differenz der Momente $\langle xy \rangle_h$ und $\langle xy \rangle_v$ ist zum einen sehr viel geringer als bei der Messung des allgemein astigmatischen Strahls, die in Bild 8.2 dargestellt ist, des weiteren zeigt sich eine breite Streuung um die angepasste Parabel, die nicht mit den Messwerten in Übereinstimmung zu bringen ist. Die Werte der gemessenen Ortsmomente $\langle xy \rangle_h(z)$ und $\langle xy \rangle_v(z)$ betragen zwischen $-0,15 \text{ mm}^2$ und $0,5 \text{ mm}^2$ und sind damit wesentlich größer als der Wert der Differenz, die aus diesen beiden Momenten gebildet wird und die wenige Prozent der Momente groß ist.

Hieraus folgt, dass die Bestimmung des Twistes mit dem hier vorgeschlagenen Messverfahren, ebenso wie das des Normenvorschlags ISO/FDIS 11146-2, limitiert wird durch die Genauigkeit der Messung der gemischten Ortsmomente. Auf Grund der größeren Anzahl der Messpunkte bietet das hier vorgeschlagene Verfahren Vorteile, da die Anzahl der Messpunkte größer ist, so dass die Genauigkeit des Verfahrens erhöht wird. Zusätzlich ermöglicht der Vergleich der Messwerte und der angepassten Parabel mögliche Messfehler leicht zu entdecken. Weiterhin entfällt die Notwendigkeit die Kamera möglichst genau in der Brennebene der Zylinderlinse zu

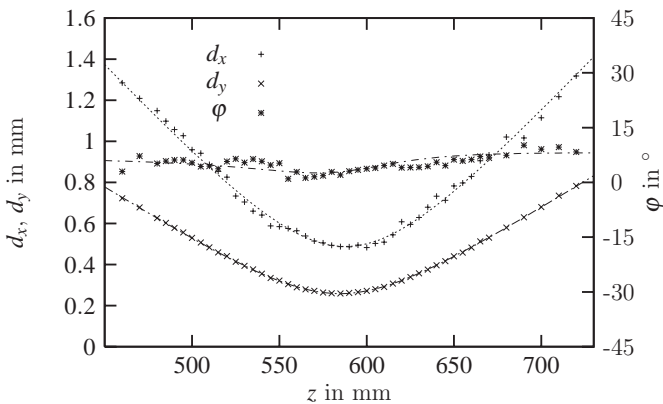


Bild 8.3: Strahldurchmesser d_x , d_y und Winkel φ des einfach astigmatischen Strahls, der für die folgenden Messungen in einen allgemein astigmatischen Strahl transformiert wird.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Charakterisierung allgemein astigmatischer Strahlen untersucht. Hierzu wurden die zehn zweiten Momente der Wignerverteilung nach dem Normenvorschlag ISO/FDIS 11146-2 bestimmt. Hierbei zeigt sich, dass die Bestimmung der zehn zweiten Momente gut möglich ist, jedoch sind die Fehler bei der Bestimmung der beiden Invarianten, der effektiven Beugungsmaßzahl und des intrinsischen Astigmatismus, sehr groß.

Zur Auswertung der aufgenommenen Leistungsdichteverteilungen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Programm entwickelt, mit dem die zehn zweiten Momente sowohl nach ISO/FDIS 11146-2 als auch nach dem vorgestellten erweiterten Messverfahrens berechnet werden können. Für diesen Zweck ist bisher weder ein Programm noch ein Messsystem auf dem Markt erhältlich. Hierzu wurden die untersuchten Verfahren, die in Kapitel 5 beschrieben sind, zur Auswertung der Leistungsdichteverteilungen in den einzelnen Messebenen umgesetzt und die notwendigen Algorithmen evaluiert. Aus den so bestimmten zehn zweiten Momenten berechnet das Programm im Anschluss die abgeleiteten Parameter wie zum Beispiel die Strahldurchmesser, die Invarianten und die Fehler der gemessenen Größen. Für die Propagation der zehn zweiten Momente wurde ein weiteres Programm entwickelt, um so die Messdaten mit der Propagation eines simulierten Strahls vergleichen zu können. Dieses Programm wurde zusätzlich zur Analyse der systematischen und statistischen Messfehlern eingesetzt.

Im Experiment wurde ein einfach astigmatischer Strahl mit einer Zylinderlinse in Abhängigkeit des Drehwinkels der Linse in einen allgemein astigmatischen Strahl transformiert. Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung bei den zweiten Momenten, bei der Ausbreitung der Strahlen durch das optische System und bei den Beugungsmaßzahlen M_x^2 und M_y^2 . Der Anstieg der Beugungsmaßzahlen M_x^2 und M_y^2 in Abhängigkeit des Drehwinkels zeigt, dass die Verwendung astigmatischer optische Systeme die Beugungsmaßzahlen stark verändern können. Die so gemessenen Beugungsmaßzahlen beschreiben zwar die Strahlqualität entlang der Koordinatenachsen, wie sie auch nach ISO 11146 für einen solchen Strahl gemessen werden, jedoch sagen diese beiden Zahlen nichts über die tatsächliche Strahlqualität des Strahls aus, die durch

A Funktionsweise und Charakterisierung von CCD-Kameras

Im Folgenden werden einige grundlegenden Eigenschaften von CCD-Kameras und die Methoden zur Hintergrundkorrektur in der Astronomie erläutert. Diese Verfahren können selbstverständlich auch im Bereich der Laserstrahlanalyse angewendet werden, jedoch unterscheiden sich die Messbedingungen in der Astronomie und der Laserstrahlanalyse besonders im Hinblick auf die zur Verfügung stehende Leistung des zu vermessenden Objektes um viele Größenordnungen.

Das Prinzip der CCD-Kamera wurde im Jahre 1969 in den Bell Laboratories erfunden und bereits im Jahr 1973 wurde ein Chip mit 100x100 Pixeln vorgestellt. Im Jahre 1976 wurde das erste Bild in der Astronomie mit einer CCD-Kamera aufgenommen. In diesem Experiment wurde zum erstenmal die sogenannte Randaufhellung des Uranus im Methanband beobachtet. Die Entwicklung der CCDs ist seit ihren Anfängen eng verknüpft mit dem Einsatz in der Astronomie, da zu Beginn der Entwicklung sehr viele Astronomen auf diesem Gebiet tätig waren, weil sie die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie erkannten.

Die Funktionsweise eines CCD-Chips basiert auf dem Photoeffekt. In einem Feldeffekttransistor, auf den ein Photon mit passender Wellenlänge trifft, wird ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Die erzeugten Ladungsträger werden durch eine angelegte Spannung getrennt. Die erzeugte Ladung ist ein Maß für das absorbierte Licht. Auf einem Chip werden entweder in einer Zeile oder in einer Matrix viele solcher Photoelemente angeordnet. Die Arbeitsweise eines solchen Chips wird meist mit einem Eimermodell verglichen. Jedes Photoelement entspricht einem Eimer. Der Inhalt des Eimers, das heißt die erzeugten Ladungsträger, werden zum Beispiel erst horizontal und dann vertikal weitergegeben. An einer Ecke des Chips wird dann der Inhalt jedes dieser Eimer gemessen. Jeder gemessenen Ladungsmenge kann ihr Entstehungsort auf dem Chip zugeordnet werden auf Grund ihrer Position innerhalb dieser Eimerkette.

Dieses Eimermodell zeigt zum einen, dass es mit typischen CCD-Chips nicht möglich ist, nur einen Teil des Chips auszulesen, so dass die Auslesezeit im Vergleich

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 11145:1999, Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlparamter Bezeichnungen und Symbole
- [2] DIN EN ISO 11146:1999, Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlparamter: Strahldurchmesser, Divergenzwinkel und Strahlpropagationsfaktor
- [3] prEN ISO 11146-2:2004(E), Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen, Teil 1: Stigmatisch und einfach astigmatische Strahlen
- [4] prEN ISO 11146-2:2004(E), Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen, Teil 2: Allgemein astigmatische Strahlen
- [5] ISO/TR 11146-3:2004, Lasers and laser-related equipment, Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios, Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods
- [6] DIN EN ISO 11670:1999, Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlparamter Strahlgestabilität
- [7] DIN-Taschenbuch 341, *Charakterisierung von Laserstrahlen und Laseroptiken*. Deutsches Institut für Normung, Beuth, 2001, ISBN 3-410-15063-3
- [8] HABICH, H.; SCHOLL, M.; MÜNTZ H. ET AL: *Evaluation of camera data: Results of a round robin test*. Proceedings of the Fourth International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, A. Giesen and M. Morin, eds., Munich, 1997
- [9] MÄSTLE, R.; EPPICH, B.; HABICH, U. ET AL: *Results of two round-robin-experiments on laser beam characterization within the EUREKA project EU-1269 "CHOCLAB"*. Proceedings of the Fourth International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, A. Giesen and M. Morin, eds., Munich, 1997
- [10] MÄSTLE, R.; LETSCH, A.; BRANDNER, M. ET AL: *Results of two round-robin experiment on laser beam characterization of highly divergent beams*. Proceedings of the Sixth International Workshop on Laser Beam and Optics

- gart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit IFSW 07-05
- [63] EISENMANN, G.: *Konzeption und Konstruktion eines Messgerätes zur Bestimmung der Laserstrahlparameter nach DIN EN ISO 11146*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit IFSW 04-01
- [64] EISENMANN, G.: *Konzeption und Konstruktion eines Messgerätes zur Bestimmung der Laserstrahlparameter nach DIN EN ISO 11146 Auswertung der experimentellen Untersuchungen*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Bericht zur Studienarbeit IFSW 04-01
- [65] EISENMANN, G.: *Entwicklung und Konstruktion eines Aufbaus zur Bestimmung der Momente der Leistungsdichteverteilung mit Hilfe optischer Filter zur Strahl diagnose*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Diplomarbeit IFSW 04-12
- [66] TAYLOR, J.: *Fehleranalyse*. Wiley-VCH, ISBN-10: 3527268782, 1988
- [67] GRÄNICHNER, H.: *Messung beendet - was nun? Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und Auswertung von Messungen*. Zürich, vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich; Stuttgart: Teubner, 1994, ISBN 3-519-03659-2

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 längsgeströimte 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 längsgeströimten 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 Prozeßeffectivität
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

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

Jiancang 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