

# **Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung**

Von Dr.-Ing. Rüdiger Mästle  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

D 93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Prof. Dr. Ing. habil. H. Weber

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme  
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0113-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Symbole</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>19</b>
1.1 Hintergrund .....	19
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	20
<b>2 Eigenschaften und Ausbreitung von Laserstrahlung</b>	<b>22</b>
2.1 Einführung .....	22
2.2 Geometrische Optik, paraxiale optische Systeme .....	23
2.3 Kohärente, paraxiale Felder .....	25
2.4 Partiiell kohärente, quasimonochromatische, paraxiale Felder .....	27
2.5 Theoretische Modellstrahlen .....	30
2.5.1 Gauß-Strahlen .....	30
2.5.2 Gauß-Hermite- und Gauß-Laguerre-Strahlen .....	34
2.5.3 Super-Gauß-Strahlen .....	35
2.5.4 Gauß-Schell-Strahlen .....	36
2.6 Statistische Momente paraxialer Felder .....	37
2.6.1 Definition der statistischen Momente .....	38
2.6.2 Erste Momente .....	39
2.6.3 Zweite Momente .....	41
2.6.4 Anmerkungen zur Praxisrelevanz der Momente .....	49
<b>3 Charakterisierung von Leistungsdichteverteilungen</b>	<b>54</b>
3.1 Einführung .....	54
3.2 Grundlagen .....	55
3.3 Messprinzipien und Fehlerquellen .....	57
3.3.1 Strahlpräparation .....	58
3.3.2 Matrixdetektoren .....	61
3.3.3 Abtastende Messverfahren .....	62
3.3.4 Bilduntergrund und Rauschen .....	64
3.3.5 Digitalisierung .....	65
3.4 Bilduntergrund- und Nullpegelkorrektur .....	68
3.4.1 Referenzbildabzug .....	68
3.4.2 Numerische Verfahren .....	69
3.5 Begrenzung des Integrationsbereichs .....	72
3.5.1 Schwellwertmethoden .....	72

3.5.2	Statistische Methoden .....	73
3.5.3	Beschnittene Momente der Leistungsdichteverteilung .....	74
3.6	Rauschbegrenzte Genauigkeiten .....	76
3.7	„Round-Robin“-Experiment: Auswertung von Leistungsdichteverteilungen .....	80
<b>4</b>	<b>Charakterisierung der Propagationseigenschaften</b> .....	<b>83</b>
4.1	Einführung .....	83
4.2	Grundlagen .....	84
4.2.1	Ortsmomente und Propagationseigenschaften .....	84
4.2.2	Strahlklassifikation .....	85
4.3	Propagationsmessung .....	88
4.3.1	Messprinzip und Fehlereinflüsse .....	89
4.3.2	Rauschbegrenzte Genauigkeiten .....	90
4.4	ABCD-Rücktransformation .....	93
4.5	„Round-Robin“-Experiment: Charakterisierung eines CO <sub>2</sub> -Hochleistungslasers .....	95
4.6	Charakterisierung beugungsbeeinflusster Strahlung .....	99
<b>5</b>	<b>Kombinierte Leistungsdichte- und Phasengradientenverteilungsmessungen</b> .....	<b>107</b>
5.1	Einführung .....	107
5.2	Grundlagen .....	108
5.2.1	Orts-/Winkelmomente und Propagationseigenschaften .....	108
5.2.2	Anwendbarkeit auf partiell kohärente Felder .....	109
5.3	Messprinzipien und Fehlerquellen .....	111
5.3.1	Matrixdetektoren .....	111
5.3.2	Abtastende Messverfahren .....	113
5.4	Rauschbegrenzte Genauigkeiten .....	120
5.4.1	Orts-/Winkelmomente .....	121
5.4.2	Abgeleitete Strahlpropagationsparameter .....	127
5.5	„Round-Robin“-Experiment: Charakterisierung eines HeNe-Lasers .....	129
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>140</b>
	<b>Danksagung</b> .....	<b>148</b>
	<b>Anhang A: Fehlerfortpflanzung</b> .....	<b>A-1</b>
A.1	Grundlagen .....	A-1
A.1.1	Erwartungswert und Standardabweichung .....	A-1
A.1.2	Dichtefunktionen .....	A-2
A.1.3	Fehlerfortpflanzung .....	A-3
A.2	Auswertung von Leistungsdichteverteilungen .....	A-4
A.2.1	Leistung .....	A-6
A.2.2	Strahlage .....	A-7
A.2.3	Strahlmessung .....	A-8

A.2.4	Gemischtes Moment .....	A-10
A.2.5	Azimetwinkel .....	A-11
A.3	Auswertung von Propagationsmessungen .....	A-11
A.3.1	Herleitung der Normalgleichungen .....	A-12
A.3.2	Messunsicherheiten der Strahlpropagationsparameter .....	A-13
A.4	ABCD-Transformation von Strahlparametern .....	A-16
A.4.1	Messunsicherheiten der Strahlpropagationsparameter .....	A-17
A.4.2	Systematische Fehler der Strahlpropagationsparameter .....	A-19
A.5	Auswertung kombinierter Leistungsdichte und Phasengradientenmessungen .....	A-21
A.5.1	Abtastender Einzel-Element-HartmannSensor .....	A-21
A.5.2	Laserstrahlinduzierte Rauschquellen .....	A-26
A.5.3	Hartmann-Shack-Sensoren .....	A-28
A.5.4	Kalibrierfehler .....	A-29
A.5.5	Abgeleitete Parameter .....	A-29

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der von Laserstrahlquellen emittierten Strahlungsfelder, wie der spektralen Schmalbandigkeit, der hohen Direktionalität und der damit verbundenen Möglichkeit extrem hohe Leistungs- beziehungsweise Energiedichten zu erzielen, hat der Laser als universelles Werkzeug zahllose Anwendungsbereiche in der industriellen Fertigung erobert. Hierbei werden heute verschiedenste Lasertypen verwendet: neben Gaslasern (vor allem CO<sub>2</sub>-Laser und Excimer-Laser), optisch angeregten Festkörperlaser (insbesondere Nd:YAG-Laser) kommen zunehmend auch Halbleiterlaser zur Anwendung. Die eingesetzten Leistungen reichen von wenigen Watt bis in den Multikilowatt-Bereich, die Wellenlängen vom UV-Bereich bis ins ferne Infrarot. Weiterhin kommen gepulste und Dauerstrich-Strahlquellen mit stabilen oder instabilen Resonatoren zum Einsatz. Neben der Wellenlänge, der Polarisation und der Laserleistung unterscheiden sich die emittierten Strahlungsfelder insbesondere durch die Gestalt und Ausdehnung der transversalen Leistungsdichteverteilung sowie deren Formänderungen im Verlauf der Strahlpropagation.

Zur Beurteilung und zum Vergleich verschiedener Strahlquellen ist es sinnvoll (und eigentlich auch notwendig) den Informationsgehalt der erzeugten optischen Felder auf einige, wenige Kennzahlen zu reduzieren, die den Strahl hinsichtlich des gewünschten Merkmals vollständig charakterisieren. Der Definition der Strahlparameter kommt hier fundamentale Bedeutung zu. Diese sollten

- möglichst allgemein auf Laserstrahlen anwendbar sein, um die Eignung verschiedener Strahlquellen für einen Prozess abschätzen zu können und
- aussagekräftig hinsichtlich der gewünschten Anwendung sein, so dass zum Beispiel prozesskritische Veränderungen der Strahleigenschaften detektiert werden können.

Die Strahleigenschaften in der Bearbeitungsebene ergeben sich als Resultat aus den Eigenschaften der Strahlquelle und den Auswirkungen sämtlicher optischer Elemente im Strahlengang, so dass man zur Beurteilung der tatsächlich vorliegenden Verhältnisse auf Messungen angewiesen ist. Neben der eindeutigen Parameterdefinition sind somit klare Vorschriften zu Messmethoden zur Bestimmung der relevanten Laserstrahlcharakteristika zu geben, um präzise messbare und damit vergleichbare Kennzahlen zu erhalten. Im Vordergrund stehen hier:

- die Anwendbarkeit der Messmethodik in industrieller Umgebung,
- die Vermeidung beziehungsweise Minimierung systematischer und statistischer Fehler und
- die Abschätzbarkeit der auftretenden Messfehler und Messunsicherheiten.

Im Spannungsfeld zwischen Laser- beziehungsweise Lasersystemherstellern und Laseranwendern entsteht unmittelbar die Notwendigkeit, sowohl die Begriffsdefinitionen als auch die Messmethoden zu vereinheitlichen und verbindlich in Normen festzulegen.

Vor diesem Hintergrund und im Hinblick auf die in Zukunft weiter wachsende Bedeutung des Lasers in der Industrie wurde 1995 das „EUREKA“-Projekt „CHOCLAB“ (Characterization of Optical Components and Laser Beams) initiiert. Die wesentlichen Ziele dieses Projektes waren es, die Normentwürfe zur Laserstrahlcharakterisierung durch Grundlagenuntersuchungen auf

eine wissenschaftlich fundierte Basis zu stellen sowie die Anwendbarkeit der Normentwürfe auch unter praxisnahen Bedingungen zu verifizieren. Letzteres wurde durch sogenannte „Round-Robin“-Experimente erreicht, bei denen mehrere Partner die gleichen Strahlquellen entsprechend den Normentwürfen zu charakterisieren hatten und anschließend die Vergleichbarkeit der Ergebnisse überprüft wurde.

Heute steht im Bereich der Laserstrahlcharakterisierung ein umfangreiches ISO-Normenwerk zur Verfügung, das die Terminologie und die Messmethoden für die wichtigsten anwendungsrelevanten Laserstrahlparameter definiert ([1] bis [8]). Die Bestimmung von Leistung (Energie) entsprechend ISO 11554 und der Polarisation entsprechend ISO 12005 ist bei Verwendung kalibrierter Detektoren sowie hochwertiger optischer Komponenten mit hoher Genauigkeit durchführbar. Die relativ jungen Normprojekte zur Phasenverteilung (ISO 15367) und zu den spektralen Eigenschaften von Laserstrahlen (ISO 13695) erfordern noch viel Grundlagenuntersuchungen und werden zur Zeit international bearbeitet. Von besonderem praktischem Interesse sind die Normentwürfe ISO 11146 (Strahldurchmesser, Divergenzwinkel und Strahlpropagationsfaktor), ISO 13694 (Leistungs- beziehungsweise Energiedichteverteilung), der in der heutigen Fassung vor allem anwendungsspezifische Strahlformparameter (zum Beispiel Plateau-Uniformität, Kantensteilheit und so weiter) definiert, sowie ISO 11670 (Strahlgestabilität).

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Der Erarbeitung weltweit verbindlicher Normen ist wegen der erforderlichen internationalen Abstimmungen ein langwieriger und oft schwieriger Prozess. Die aktuellen Normen hinken aufgrund dessen zwangsläufig dem Stand von Wissenschaft und Technik um Jahre hinterher und sind wegen der Kompromissfindung auf internationaler Ebene manchmal aus wissenschaftlicher Sicht auch wenig befriedigend. Aus der Vielzahl anwendungsrelevanter Laserstrahlcharakteristika werden in dieser Arbeit ausschließlich die Strahlpropagationseigenschaften betrachtet, da insbesondere die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung, das heißt, die Möglichkeit der Erzeugung eines schmalen Lichtbündels, das auch über weite Propagationsdistanzen seinen engen Querschnitt behält, für zahlreiche Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung die zentrale Rolle spielt. Die messtechnische Ermittlung der Strahlpropagationseigenschaften betrifft insbesondere die Normentwürfe ISO 11146, ISO 13694 und ISO 15367.

Grundlage zur parametrischen Beschreibung der Strahlpropagation ist die Definition eines Strahldurchmessers, beziehungsweise einer Strahlabmessung. Hierfür wurden in der Vergangenheit verschiedene Möglichkeiten erörtert, unter anderem der „86,5%“-Durchmesser, die „ $1/e^2$ “-Strahlabmessung, die „Messerschneiden“-Strahlabmessung und die Varianzabmessung, die durch das zweite Moment der Leistungsdichteverteilung definiert ist (bezüglich Definitionen siehe [1], [2]). Diese Diskussion wurde in normativer Hinsicht durch das ISO-Komitee beendet, indem die Varianzabmessung als Primärstandard definiert wurde. Obwohl diese Definition - auf den ersten Blick - wenig anschaulich und auch messtechnisch problematisch ist, hat sie gegenüber den anderen Definitionen den Vorteil, dass für paraxiale, partiell kohärente, quasimonochromatische Strahlungsfelder und damit für quasi alle heutzutage verwendeten Lasertypen ein theoretisch ableitbares und einfaches Propagationsgesetz existiert. Tatsächlich ist die Korrelierbarkeit der Strahlabmessungen an verschiedenen Orten elementar, da in vielen Fällen eine Messung direkt am Bearbeitungsort nicht möglich ist und somit eine Propagationsrechnung erforderlich wird. Ziel dieser Arbeit ist neben der Darstellung des Formalismus der zweiten Momente und dessen Gültigkeitsbereiches vor allem die Diskussion der bei der messtechnischen Ermittlung der Strahlpropagationseigenschaften auftretenden Fehler sowie der erreichbaren Genauigkeiten.

In Kapitel 2 werden in einer Übersicht zunächst die Grundlagen der Transformation paraxialer, partiell kohärenter, quasimonochromatischer Strahlungsfelder durch paraxiale optische Systeme rekapituliert. Eine ausführliche Diskussion aller damit verbundenen Aspekte ist im Rahmen dieser Arbeit allerdings weder möglich noch beabsichtigt. Zentraler Punkt ist hier die parametrische Beschreibung der Propagation von Laserstrahlen durch den Formalismus der statistischen Momente der optischen Feldfunktion, die auch mit theoretischen Modellstrahlen verdeutlicht wird.

Die Bestimmung der Strahlabmessung in einer definierten Ebene wird in Kapitel 3 behandelt. Das wichtigste und heute am häufigsten verwendete Messprinzip hierfür ist die numerische Auswertung gemessener zweidimensionaler Leistungsdichteverteilungen. Neben den prinzipiellen Messverfahren und den damit verbundenen Fehlerquellen wird insbesondere die Problematik der Fehlerkorrektur und Fehlerminimierung angesprochen.

Die Charakterisierung der Fokussierbarkeit erfolgt meist durch eine sogenannte Propagationsmessung, indem bei freier Strahlpropagation obige Messung an verschiedenen axialen Orten durchgeführt wird, das heißt, die Abhängigkeit des Strahldurchmessers von der axialen Propagationsdistanz wird aufgezeichnet. Daraus kann dann sowohl der engste Querschnitt als auch die zunehmende Vergrößerung (die Divergenz) des Strahles ermittelt werden. Dieses Messprinzip, die auftretenden Fehler, sowie die erreichbaren Genauigkeiten bei der Propagationsberechnung aus Messwerten ist Thema von Kapitel 4.

Ein potentiell eleganteres Messverfahren zur Bestimmung der Fokussierbarkeit besteht darin, in einer Ebene sowohl die Leistungsdichte- als auch die Phasenverteilung zu messen und über numerische Verfahren alle Strahlpropagationseigenschaften zu ermitteln. Im Unterschied zur Propagationsmessung sind hier außerdem auch die Kohärenzeigenschaften des Feldes zu betrachten. Diese Vorgehensweise und dessen eingeschränkte Anwendbarkeit auf partiell kohärente Felder wird in Kapitel 5 dargestellt.

In allen genannten Fällen werden die primären Messdaten numerisch weiterverarbeitet, um die eigentlich relevanten Kenngrößen zu gewinnen. Die Fehlerfortpflanzung wird zu allen Messverfahren explizit durchgeführt, da sich so erstens die Hauptfehlerquellen identifizieren lassen und zweitens auf dieser Basis optimierte, fehlerminimierende Algorithmen abgeleitet werden können. Die Herleitungen zur Fehlerfortpflanzung werden in Anhang A gesammelt dargestellt.