

# **Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser**

Von Dr.-Ing. Steffen Erhard  
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. phil. habil. Hans Tiziani

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 3-8316-0173-9

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>Symbolverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1 Hintergrund und Zielsetzung . . . . .	15
1.2 Strukturierung der Arbeit . . . . .	16
<b>2 Grundlagen</b>	<b>18</b>
2.1 Das Prinzip des Scheibenlasers . . . . .	18
2.2 Das laseraktive Medium Yb:YAG . . . . .	19
2.3 Der Matrizenformalismus der Optik . . . . .	22
2.3.1 Paraxiale Strahlenoptik . . . . .	22
2.3.2 ABCD-Formalismus in der Resonatortheorie . . . . .	25
2.3.2.1 Allgemeiner Formalismus für beliebige Resonatoren . . . . .	25
2.3.2.2 Vereinfachter Formalismus für Stehwellenresonatoren . . . . .	26
<b>3 Pumpoptiken für den Scheibenlaser</b>	<b>29</b>
3.1 Pumpkonzepte für Festkörperlaser . . . . .	29
3.2 Quasi-endgepumpte Anordnungen für den Scheibenlaser . . . . .	30
3.2.1 Vielfachdurchgänge mit Hilfe direkter Abbildungen . . . . .	32
3.2.1.1 Anordnung für kleine Anzahlen an Durchgängen . . . . .	36
3.2.1.2 Grenzen der direkten Abbildung . . . . .	38
3.2.2 Vielfachdurchgänge mit Hilfe telezentrischer Abbildungen . . . . .	40
3.2.2.1 Eigenschaften der telezentrischen Abbildung . . . . .	40
3.2.2.2 Vorteile der telezentrischen Abbildung . . . . .	41
3.2.3 Kompakte Pumpoptik mit Hilfe eines Parabolspiegels . . . . .	43
3.2.3.1 Pumpoptik für sechzehn Pumpstrahlungsdurchgänge . . . . .	43
3.2.3.2 Mögliche Realisierungen der Umlenkeinheiten . . . . .	44
3.2.3.3 Variationen zur Erhöhung der Durchgangszahl . . . . .	47
3.2.4 Neues Umlenkkonzept für die Parabolspiegelpumpoptik . . . . .	48
3.2.4.1 Anordnung für sechzehn Pumpstrahlungsdurchgänge . . . . .	48
3.2.4.2 Beispiele für mehr als sechzehn Durchgänge . . . . .	51
3.2.4.3 Maximales Öffnungsverhältnis des Parabolspiegels . . . . .	51
3.2.4.4 Positions- und Winkeltoleranzen . . . . .	53

3.2.5	Kollimationsoptiken und Pumpquellen . . . . .	58
3.2.5.1	Optimale Anordnung der Kollimationsoptik . . . . .	58
3.2.5.2	Minimale Strahldichte der Pumpquellen . . . . .	60
3.2.6	Gleichzeitiges Pumpen mehrerer Scheiben . . . . .	63
3.2.6.1	Pumpanordnungen mit Hilfe von Parabolspiegeln . . . . .	63
3.2.6.2	Pumpanordnungen mit Hilfe von torischen Spiegeln . . . . .	65
3.3	Seitengepumpte Anordnungen für den Scheibenlaser . . . . .	67
3.4	Zusammenfassung und Fazit zu Kapitel 3 . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Resonatoren für den Scheibenlaser</b>	<b>72</b>
4.1	Eigenschaften von Resonatoren mit thermischen Linsen . . . . .	73
4.1.1	Thermische Linse innerhalb des Resonators . . . . .	73
4.1.2	Thermische Linse am Ende des Resonators . . . . .	78
4.2	Resonatoren mit der Scheibe als Endspiegel . . . . .	80
4.3	Resonatoren mit der Scheibe als Umlenkspiegel . . . . .	86
4.3.1	Einfach gefaltete Resonatoren . . . . .	86
4.3.2	Zweifach gefaltete Resonatoren . . . . .	92
4.3.3	Resonatoren für mehrere Scheiben . . . . .	95
4.4	Resonatoren für die resonatorinterne Frequenzverdopplung . . . . .	98
4.5	Zusammenfassung und Fazit zu Kapitel 4 . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>106</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>110</b>
A.1	Die Strahldichte einer Strahlquelle . . . . .	110
A.2	Die analytische Berechnung dynamisch stabiler Resonatoren . . . . .	111
	<b>Danksagung</b>	<b>114</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Aufgrund der teilweise einzigartigen Eigenschaften von Laserstrahlung haben sich Lasersysteme in den verschiedensten Bereichen von Forschung und Technik etabliert. Darunter fallen vor allem die Medizintechnik, die Messtechnik, die Nachrichtentechnik, die optische Informationsspeicherung sowie die Materialbearbeitung. Durch den vermehrten Einsatz des Strahlwerkzeugs Laser wurden beispielsweise in der Materialbearbeitung eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder erschlossen [1]. Damit stiegen jedoch auch die Anforderungen an kommerzielle Lasersysteme hinsichtlich der Ausgangsleistung und des Wirkungsgrads der Strahlquellen sowie der Fokussierbarkeit der Laserstrahlung.

Derzeit beherrschen in der Materialbearbeitung immer noch die CO<sub>2</sub>-Laser den Markt, da sie Ausgangsleistungen bis in den Kilowatt-Bereich mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität bieten. Wegen ihrer Wellenlänge von etwa 10  $\mu\text{m}$  ist allerdings nur eine Strahlführung mit Hilfe von Spiegel- oder Linsensystemen möglich. In den letzten Jahren gewinnen daher Festkörperlasersysteme immer mehr an Bedeutung, weil deren Wellenlängen im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  einen wesentlich flexibleren Strahltransport in Glasfasern erlauben. Darüberhinaus können bei vielen Werkstoffen und Prozessen wegen des höheren Absorptionsgrades und der geringeren Plasmaabsorption bessere Effizienzen erzielt werden [1].

Die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung von bisher erhältlichen Festkörperlasersystemen im Kilowatt-Bereich erreicht jedoch trotz der kürzeren Wellenlänge noch nicht die Werte der CO<sub>2</sub>-Laser. Der Grund für die wesentlich schlechtere Strahlqualität dieser Lasersysteme ist vor allem das Auftreten einer so genannten thermischen Linse in den verwendeten Laserstäben, die aus der Aufheizung des laseraktiven Materials beim optischen Pumpen resultiert [2]. Mit dem Ersetzen der ursprünglich zur Anregung verwendeten Blitzlampen durch Diodenlaser, deren Emissionsspektrum auf das Absorptionsspektrum des Laserkristalls angepasst ist, wird zwar die Erzeugung von Verlustwärme im Laserstab verringert, die wesentlich bessere Strahlqualität der Diodenlaser bleibt dagegen ungenutzt.

Aufgrund der guten Fokussierbarkeit der Diodenlaserstrahlung ist man nicht mehr auf die Stabform angewiesen, um eine nahezu vollständige Absorption der Pumpstrahlung zu erreichen, und kann daher die Geometrie des laseraktiven Materials derart

verändern, dass das Verhältnis der Fläche, über die die Kühlung erfolgt, zum angeregten Volumen maximiert wird [3]. Am Ende dieses Optimierungsprozesses erhält man dann ein laseraktives Material in Form einer langen Faser oder einer dünnen Scheibe. Während bei der Faser die Kühlung weiterhin über den Mantel erfolgt, wird bei der Scheibe die Wärme über eine oder beide Stirnflächen abgeführt.

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich das Prinzip des Scheibenlasers betrachtet, der seit 1992 von dem Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in einer Zusammenarbeit entwickelt wird. Der entscheidende Vorteil dieses Prinzips beruht auf einer effizienten Kühlung der Scheibe und einer drastischen Reduktion der thermischen Linse, da der Wärmefluss in der Scheibe fast ausschließlich in Richtung der Scheibennormalen verläuft. Für die erfolgreiche Umsetzung dieser neuen Kristallgeometrie in einem Laser mit hohem Wirkungsgrad und guter Strahlqualität sind aber noch zwei weitere Arbeitspunkte von entscheidender Bedeutung: die Entwicklung an die Kristallgeometrie angepasster Pumpoptiken mit hohen Absorptionsgraden für die Pumpstrahlung sowie die Auslegung geeigneter Resonatoren, da diese letztendlich die Eigenschaften der erzeugten Laserstrahlung bestimmen. Das Ziel dieser Arbeit ist daher, die Grundlagen von Pumpoptiken und Resonatoren für Scheibenlaser zu untersuchen, um einerseits neue Anordnungen für die Zuführung der Pumpstrahlung in den Laserkristall zu entwerfen und andererseits ein allgemeines Resonatorkonzept zu entwickeln, das höchste Strahlqualität bei einer geringen Justageempfindlichkeit des Resonators ermöglicht.

## 1.2 Strukturierung der Arbeit

In Kapitel 2 sind zunächst die benötigten Grundlagen zusammengestellt. Dabei werden zuerst das Prinzip des Scheibenlasers und die wichtigsten Eigenschaften des laseraktiven Materials Yb:YAG vorgestellt, um die Voraussetzungen für die Auslegung von Pumpoptiken und Resonatoren zu definieren. Anschließend wird der Matrizenformalismus der Optik in dem Umfang erläutert, wie er für das Verständnis der Arbeit benötigt wird.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Pumpoptiken für den Scheibenlaser. Dabei werden zuerst quasi-endgepumpte Anordnungen betrachtet. Wegen der geringen Dicke der Scheibe werden Vielfachdurchgänge der Pumpstrahlung durch die Scheibe für eine vollständige Absorption der Pumpstrahlung benötigt, wodurch man aber gleichzeitig auch die für einen hohen Wirkungsgrad notwendige Entkoppelung der Absorption der Pumpstrahlung von der Reabsorption der Laserstrahlung in Quasi-Drei-Niveau-Systemen wie Yb:YAG erhält. Für die Erzeugung der Vielfachdurchgänge wird die wiederholte Abbildung der Pumpstrahlung auf die Scheibe untersucht. Dabei ergeben sich deutliche Vorteile für die Verwendung von telezentrischen Abbildungen. Die Umsetzung dieses Prinzips wird anhand einer Pumpoptik, die einen Parabolspiegel als zentrales optisches Element enthält, diskutiert. Diese Pumpoptik bildet dann die Grundlage für eine weitere Erhöhung der Durchgangszahl mit einer festen Anzahl an

optischen Komponenten. Im Anschluss daran werden die mit der Erhöhung der Durchgangszahl ansteigenden Forderungen an die Strahlqualität der Pumpquelle untersucht. Die an den Pumpoptiken für eine Scheibe gewonnenen Erkenntnisse bilden weiterhin die Grundlage für das gleichzeitige Pumpen mehrerer Scheiben. Als Alternative zu den quasi-endgepumpten Anordnungen für Pumpleistungen im Kilowatt-Bereich werden schließlich seitengepumpte Anordnungen diskutiert.

In Kapitel 4 werden systematisch Resonatorkonfigurationen für den Scheibenlaser untersucht. Dazu wird zunächst die allgemeine Theorie für Resonatoren mit thermischen Linsen vorgestellt, die auf das Konzept der dynamischen Stabilität führt, bei dem sich der Resonatormode nur leicht mit der Brechkraft der thermischen Linse verändert. Vor diesem Hintergrund werden dann Resonatoren mit der Scheibe als Endspiegel und als Umlenkspiegel betrachtet. Dabei steht neben der dynamischen Stabilität auch die Kompaktheit des Resonators und die Justageempfindlichkeit seiner Komponenten im Vordergrund. Auf diesen Ergebnissen aufbauend werden außerdem Resonatoren für mehrere Scheiben untersucht. Am Beispiel der resonatorinternen Frequenzverdopplung wird schließlich noch die Berücksichtigung zusätzlicher Bedingungen bei der Auslegung eines Resonators vorgestellt.

Am Ende der Arbeit werden die gewonnenen Ergebnisse nochmals zusammengefasst und ein Ausblick auf eine mögliche Fortführung der vorgestellten Untersuchungen gegeben. Ergänzende Anmerkungen zur Strahldichte einer Strahlquelle und der analytischen Berechnung dynamisch stabiler Resonatoren sind Gegenstand des Anhangs.