

# **Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung**

Von Dr.-Ing. Guido Hergenhan  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · München

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in  
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ. 2004

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2004

ISBN 3-8316-0376-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

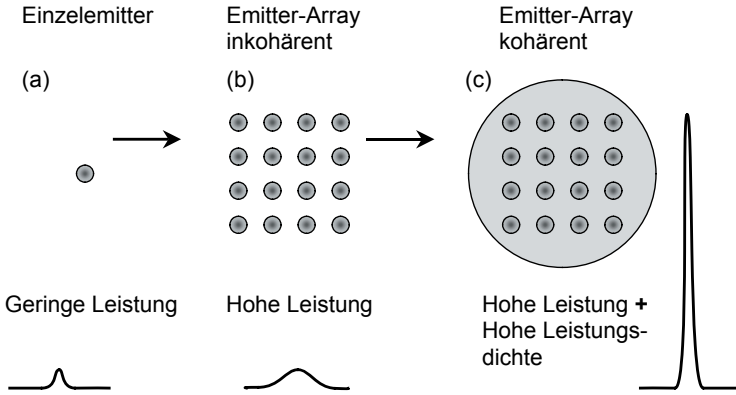
<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Verzeichnis der Symbole</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>19</b>
2.1 Diodenlaser .....	19
2.2 Methoden der kohärenten Kopplung von Diodenlasern .....	22
2.2.1 Selbstorganisierte Kopplung .....	23
2.2.2 Hierarchische Kopplung .....	25
<b>3 Eigenes Konzept</b>	<b>28</b>
3.1 Master-Slave-Kopplung von VCSEL-Arrays .....	28
3.1.1 Injection-Locking .....	28
3.1.2 Frequenzabstimmung .....	32
3.1.3 Integration der Vorwiderstände .....	33
3.1.4 Optischer Aufbau .....	34
3.2 Strahlzusammenführung .....	35
3.2.1 Strahlüberlagerung in der Fernfeld-Ebene .....	36
3.2.2 Steigerung der Effizienz der Strahlzusammenführung .....	43
3.3 Möglichkeit der Realisierung eines kompakten Aufbaus .....	50
3.4 Modulation der Kohärenz .....	51
3.4.1 Motivation .....	51
3.4.2 Prinzip der Kohärenzmodulation .....	51
3.4.3 Umsetzung der Kohärenz- in eine Leistungsmodulation .....	52
3.4.4 Abhängigkeit der Master-Frequenzmodulation von der Modulationsfrequenz .....	54
3.4.5 Einstellung und Zerfall der Kohärenz .....	57
3.4.6 Zusammenfassung zum Kapitel 3.4 .....	58
<b>4 Aufbau und Technologie</b>	<b>59</b>
4.1 Array-Technologie und Miniaturisierung .....	59
4.1.1 Motivation .....	59
4.1.2 Justagetoleranzen .....	60
4.1.3 Justage- und Montagetechnik .....	63
4.2 Optomodul .....	67
4.2.1 Vertikalemitter-Chip .....	67

4.2.2	Wärmeableitung .....	70
4.2.3	Einzelansteuerung .....	71
4.2.4	Mikrolinsen-Array .....	72
4.2.5	Justage und Montage .....	75
4.3	Trimmen von Mikrowiderstands-Arrays .....	77
4.3.1	Hybrid Aufbau .....	77
4.3.2	Trimmstation .....	78
4.3.3	Einstellgenauigkeit .....	79
4.3.4	Einfluss der Trimmgeometrie .....	79
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>81</b>
5.1	Prozedur der Kohärenz- und Phaseneinstellung .....	81
5.2	8 x 8-VCSEL-Array .....	84
5.2.1	Frequenzabgleich mit konventionellen Vorwiderständen .....	84
5.2.2	Frequenzabgleich mit Mikrowiderständen .....	85
5.2.3	Stabilität der phasenrichtigen Überlagerung .....	86
5.3	19 x 19-VCSEL-Array .....	89
5.3.1	Strahlüberlagerung in der Fernfeld-Ebene .....	89
5.3.2	Strahlüberlagerung durch Strahltransformationselemente .....	91
5.4	Kohärenzmodulation .....	95
5.4.1	Frequenzmodulation des Master-Lasers .....	96
5.4.2	Frequenzabhängigkeit der Kohärenzmodulation .....	99
5.4.3	Datenübertragung .....	99
5.4.4	Optischer Transistor .....	100
<b>6</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>102</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>106</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>

# 1 Einleitung

Durch die Vielzahl der unterschiedlicher Laserarten wurde für den Laser bereits ein sehr breites Anwendungsfeld geschaffen, in dem weltweit jährlich mehrere Milliarden Euro umgesetzt werden. Die Anwendungen reichen vom Schneiden, Schweißen und Beschichten im Automobilbau über schonende Verfahren in der Medizin, Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung in Glasfasernetzen bis zum millionenfachen Einsatz in der Unterhaltungselektronik in CD- oder DVD-Laufwerken [1]. Die Kriterien für eine bestimmte Anwendung eines Lasers ergeben sich aus der Kombination seiner Eigenschaften wie der Wellenlänge, der Leistung und Leistungsdichte der ausgesendeten Strahlung im Verhältnis zu dessen Größe sowie Anschaffungs- und Unterhaltungskosten. Es lässt sich heute leicht abschätzen, dass sich das Marktvolumen bei Verbesserung dieses Verhältnisses von Leistung zu Preis noch vervielfachen ließe. Das größte Potenzial auf diesem Entwicklungsweg bringt der Diodenlaser mit sich. Aufgrund seiner kostengünstigen Herstellbarkeit, Kompaktheit, hohen Effizienz, langen Lebensdauer, einfachen Modulierbarkeit und wartungsfreien Betriebsart kommt er in vielen Bereichen schon millionenfach zur Anwendung. Auch die Breite des verfügbaren Wellenlängenspektrums, welches sich bereits vom nahen Ultraviolett- bis in den mittleren Infrarotbereich erstreckt, eröffnet im Prinzip ein universelles Anwendungsfeld. Dieses wird jedoch vorrangig durch die prinzipiell begrenzte, für viele Anwendungen zu geringe, maximale Ausgangsleistung von Grundmode-Diodenlasern mit hoher zeitlicher und/oder räumlicher Kohärenz eingeschränkt (Bild 1.1a). Hohe optische Ausgangsleistungen können nur durch die Addition der Strahlung von vielen Diodenlasern erreicht werden. Bei der inkohärenten Strahladdition lässt sich somit aber die Leistungsdichte (bei gegebener numerischer Apertur) nicht über die eines einzelnen Diodenlasers steigern (Bild 1.1b). Nur durch die Strahladdition von kohärent gekoppelten Lasern addieren sich sowohl Leistung als auch Leistungsdichte (Bild 1.1c).

Die grundlegende Eignung der kohärenten Kopplung von Diodenlasern zur Skalierung von Leistung und Leistungsdichte wurde insbesondere in einer früheren Arbeit [2] bereits demonstriert. Für eine praktische Anwendung war dieses System jedoch zu komplex, da es für jeden Einzellaser aktive Regelungen der Temperatur, des Stromes, der Phase und der Kohärenz erforderte.



**Bild 1.1:** Querschnitt der Leistungsichte in der Fokusebene (a) für einen Einzelemittter, (b) für eine ideal inkohärente Überlagerung von 16 Emittern und (c) für eine ideale kohärente Überlagerung von 16 Emittern (gleiche numerische Apertur vorausgesetzt).

Die Entwicklung neuer Bauformen der Diodenlaser, besonders der Fortschritt bei den vertikal emittierenden Diodenlasern, gab Anlass sich der technischen Umsetzung der kohärenten Kopplung erneut zu widmen. Aufbauend auf der früheren Arbeit [2] wurde eine erweiterte Aufgabenstellung formuliert, die in der Entwicklung eines Konzepts und dessen experimentelle Verifizierung für ein Lasersystem bestand, welches folgende Anforderungen erfüllen sollte:

- basierend auf Diodenlasern
- in Leistung und Leistungsdichte skalierbar
- in kompaktem Aufbau realisierbar
- hoher optisch-elektrischer Wirkungsgrad
- schnelle Leistungsmodulation

Lösungen der gestellten Aufgabenstellung wurden im Rahmen zweier Dissertationen bearbeitet. Die erste Arbeit [3] beschäftigt sich vorrangig theoretisch und experimentell mit den Grundlagen des Kopplungsmechanismus. Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung des Konzepts entsprechend der Reihenfolge der Anforderungen in der Aufgabenstellung und die experimentelle Verifizierung entscheidender Teile des Konzepts.