

# **Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern**

Von Dr.-Ing. Michael Brandner  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

D93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

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. 2003

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 2003

ISBN 3-8316-0288-3

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>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>11</b>
<b>Extended abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>19</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>21</b>
2.1 Diodenlaser in der Materialbearbeitung .....	21
2.1.1 Aufbau von Hochleistungsdiodenlasern (HLDL) .....	24
2.1.1.1 Grundbaustein Diodenbarren .....	25
2.1.1.2 Methoden zur Leistungssteigerung .....	28
2.1.2 HLDL-Systeme für die Materialbearbeitung .....	29
2.1.2.1 Stack-Laser .....	29
2.1.2.2 Laser mit integrierter Strahlformung (IBS-Laser) .....	31
2.1.2.3 Fasergekoppelte Systeme .....	32
2.1.3 Vergleich mit konventionellen Strahlquellen .....	34
2.1.4 Einsatz von HLDL in der Materialbearbeitung .....	37
2.2 Laserlöten .....	41
2.2.1 Kennzeichen des Lötens .....	41
2.2.2 Einsatz des Lasers zum Weichlöten in der Elektronik .....	42
2.2.3 Einsatz des Lasers zum Hartlöten .....	46
2.3 Laserunterstütztes Kleben im Automobilbau .....	48
2.3.1 Kennzeichen des Klebens .....	49
2.3.2 Strukturkleben im Automobilbau .....	51
2.3.3 Einsatz des Lasers beim Kleben .....	54
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>57</b>

<b>4</b>	<b>Energieeinkopplung beim Löten und Kleben</b>	<b>59</b>
4.1	Kalorimetrische Absorptionsmessungen.....	61
4.2	Absorption lötspezifischer Oberflächen.....	61
4.2.1	Basiswerkstoffe.....	62
4.2.2	Lotpasten.....	64
4.3	Absorption an zu verklebenden Oberflächen.....	65
<b>5</b>	<b>Aufheizverhalten beim Löten und Kleben</b>	<b>68</b>
5.1	Simulation an typischen Modellgeometrien.....	68
5.1.1	Löten.....	70
5.1.1.1	Modellbildung.....	70
5.1.1.2	Erwärmung der Fahne-Fahne Geometrie.....	73
5.1.1.3	Einfluss der Leistungsdichteverteilung.....	77
5.1.1.4	Änderung der Oberflächeneigenschaften durch Oxidation.....	79
5.1.2	Kleben.....	81
5.1.2.1	Modellbildung.....	81
5.1.2.2	Einseitige Erwärmung.....	84
5.1.2.3	Prozessoptimierung durch beidseitige Erwärmung.....	94
5.2	Temperaturmessungen.....	98
5.2.1	Aufheizen von typischen Lötgeometrien.....	99
5.2.1.1	Fahne-Fahne Geometrie.....	99
5.2.1.2	Einfluss der Leistungsdichteverteilung.....	102
5.2.1.3	Erwärmung mit gezielter Oxidation der Oberfläche.....	103
5.2.2	Temperaturmessungen zum Kleben am einfachen Überlapp.....	105
5.2.2.1	Einseitige Erwärmung - ohne Klebstoff.....	107
5.2.2.2	Einseitige Erwärmung - mit Klebstoff.....	111
5.2.2.3	Optimierung des Aufheizzyklus durch beidseitige Erwärmung.....	115
5.2.2.4	Energiebetrachtung beim laserunterstützten Kleben.....	117
<b>6</b>	<b>Löten mit Diodenlaser</b>	<b>120</b>
6.1	Versuchseinrichtung.....	120
6.2	Weichlöten mit Lotpaste.....	121
6.2.1	Prozessfenster.....	123
6.2.2	Einfluss des Oberflächenzustandes.....	127
6.2.3	Variation der Spotposition.....	129
6.2.4	Vergleich von Dioden- und Nd:YAG-Laser.....	131
6.3	Hartlöten von Kupferwerkstoffen.....	133

6.3.1	Lötversuche mit Lotpaste.....	135
6.3.2	Lötversuche mit Lotdraht.....	138
<b>7</b>	<b>Laserunterstütztes Kleben am einfachen Überlapp</b>	<b>143</b>
7.1	Verfahrenstechnik beim Kleben.....	143
7.1.1	Anlagentechnik .....	143
7.1.2	Modellgeometrie und Werkstoffe.....	146
7.1.3	Versuchsdurchführung beim laserunterstützten Kleben .....	146
7.2	Klebeuntersuchungen bei einseitiger Erwärmung.....	148
7.2.1	Warmhärtender 1-Komponenten-Klebstoff.....	149
7.2.2	Kalthärtender 2-Komponenten-Klebstoff.....	154
7.2.3	Ergebnisse für unterschiedliche Klebstoffarten im Vergleich.....	158
7.3	Klebeuntersuchungen bei beidseitiger Erwärmung.....	160
7.4	Mögliche Prozessstrategien.....	162
7.4.1	Verfahrensstrategien zum Fixieren von Bauteilen.....	163
7.4.2	Heißhärtender 1-Komponentenklebstoff XW 1044/3.....	164
7.4.3	Kalthärtende 2-Komponentenklebstoffe 3M 5037 und 5047 .....	165
7.4.4	Bruchverhalten bei den unterschiedlichen Verfahrensstrategien.....	166
7.4.5	Fazit .....	168
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>173</b>
	<b>Anhang</b>	<b>187</b>
A.1	Daten der Marktanalyse.....	187
A.2	Systemtechnik zum Löten und Kleben.....	189
A.2.1	Laserstrahlquellen .....	189
A.2.2	Pyrometer zur Messung der Oberflächentemperatur .....	190
A.3	Werkstoffeigenschaften und -kennwerte.....	190
A.3.1	Basiswerkstoffe zum Löten .....	191
A.3.2	Lotwerkstoffe - Lotpasten.....	191
A.3.3	Basiswerkstoffe zum Kleben .....	192
A.3.4	Klebstoffe zum Strukturkleben .....	192
	<b>Danksagung</b>	<b>195</b>

# 1 Einleitung

Als Theodore Maiman 1960 den ersten Laser, einen gepulsten Rubinlaser, der Öffentlichkeit vorstellte, konnte kein Mensch ahnen, welche Bedeutung die Lasertechnik erlangen würde. Im Gegenteil, in den Anfangszeiten spötteln sogar Physiker, dass mit dem Laser eine Lösung für ein Problem gefunden sei, das erst noch gesucht werden müsse [1]. Heute, etwa 4 Jahrzehnte später, stellt der Laser eine der Schlüsseltechnologien der Gegenwart dar und ist in vielen Gebieten der Forschung, der Medizin, der Messtechnik, der industriellen Produktion und sogar im täglichen Leben vertreten.

Die Materialbearbeitung mit Laserstrahlung wird seit mehr als 20 Jahren in der Serienproduktion eingesetzt und hat sich mittlerweile als anerkannte Fertigungstechnologie etabliert [2]. Der Hauptgrund liegt in erster Linie in der außerordentlichen Flexibilität des Lasers, die es erlaubt, mit den unterschiedlichsten Verfahren wie z. B. Schneiden, Schweißen, Löten, Bohren, Markieren oder verschiedenen Verfahren der Oberflächenveredelung, verschiedenste Werkstoffe und Werkstoffkombinationen zu bearbeiten [3]. Durch die präzise, lokal begrenzte, berührungslose Energieeinbringung werden dabei hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und Bearbeitungsqualitäten erreicht.

Für die Materialbearbeitung steht eine Vielzahl von Laserstrahlquellen zur Verfügung. Wichtigste Vertreter sind nach wie vor CO<sub>2</sub>-Laser, die einen hohen Wirkungsgrad und eine sehr hohe Strahlqualität aufweisen und mit Leistungen über 20 kW verfügbar sind. Sie werden vorwiegend zum Schneiden und Schweißen eingesetzt. Zunehmend an Bedeutung für die industrielle Fertigung gewinnt in den letzten Jahren der Festkörperlaser. Hinsichtlich Wirkungsgrad und Strahlqualität dem CO<sub>2</sub>-Laser zwar unterlegen besticht er jedoch durch eine einfache Strahlführung in flexiblen Lichtleitern und eine bessere Energieeinkopplung bei Metallen aufgrund der deutlich kürzeren Wellenlänge. Die Strahlführung über Glasfaserkabel ist prädestiniert für die Bearbeitung komplexer 3D-Geometrien und hat dem Festkörperlaser den Weg für die Serienfertigung insbesondere in der Automobilindustrie geebnet. So werden bei Volkswagen weltweit über einhundert Nd:YAG-Laser im kW-Bereich eingesetzt [4]. Durch Weiterentwicklungen in Richtung verbesserter Strahlqualität und erhöhtem Wirkungsgrad mit diodengepumpten Systemen werden dem Festkörperlaser gute Zukunftsaussichten eingeräumt [5].

Bereits kurz nach der Vorstellung des Rubinlasers von Maiman wurde ein neuartiges Laserkonzept realisiert, bei dem Anregung, laseraktives Medium und Resonatoranordnung auf einem einzigen Halbleiterbauelement vereint wurden, dem Halbleiter- oder Diodenlaser. Er ist äußerst kompakt und bietet einen hohen Wirkungsgrad. Es dauerte allerdings fast 20 Jahre, bis der Diodenlaser seinen Siegeszug als Massenprodukt in der Kommunikations- und optischen Speichertechnik antreten konnte [6]. Nahezu in jedem

Haushalt verrichtet heutzutage ein Diodenlaser in CD-Playern seinen Dienst. In 2000 hatte der Diodenlaser sogar einen Marktanteil von 74 % am gesamten Lasermarkt [7].

Durch die geringe Ausgangsleistung von wenigen Milliwatt waren Diodenlaser bis vor kurzem nicht in der Materialbearbeitung einsetzbar. Erst durch die Entwicklung von Diodenbarren steht nun ausreichend Leistung zur Verfügung. Anfangs beschränkte sich der Einsatz von Hochleistungsdiolenlasern (HLDL) auf Pumpmodule von Festkörperlasern. Mittlerweile sind jedoch Systeme mit Leistungen im kW-Bereich für die direkte Materialbearbeitung verfügbar. Derartige HLDL-Systeme zeichnen sich durch einen einfachen Aufbau, einen hohen Wirkungsgrad und eine kompakte Bauform aus, die einfach in Fertigungseinrichtungen integriert werden kann [8]. Im Zusammenhang mit der einfachen Handhabung, einem nahezu wartungsfreien Betrieb und einer langen Lebensdauer der Dioden ergeben sich daraus wirtschaftliche Vorteile gegenüber den klassischen Laserstrahlquellen. Im Gegensatz dazu steht eine geringere Strahlqualität und die damit verbundene schlechtere Fokussierbarkeit, die den Einsatzbereich derzeit auf Anwendungen im unteren bis mittleren Intensitätsbereich ( $\leq 10^5 \text{ W/cm}^2$ ) begrenzt.

So besteht ein großes Potenzial für den HLDL beim Einsatz zum Laserlöten insbesondere in der Mikroelektronik oder beim Fügen elektrischer Kontakte. Durch den Trend zur Miniaturisierung mit steigender Packungsdichte bei Halbleiterbauelementen mit sinkenden Rasterabständen der Anschlüsse stoßen die konventionellen Löttechnologien an ihre Grenzen. Das Laserlöten kann hier durch die lokale, eng begrenzte Energiezufuhr die Problematik lösen. Zudem ist das Fügen bereits vormontierter bzw. temperaturempfindlicher Bauteile möglich. Die bisherige Zurückhaltung bezüglich eines Lasereinsatzes durch die geringe Produktivität und die hohen Investitionskosten kann durch den HLDL und seine systemtechnischen Vorteile positiv beeinflusst werden.

Nicht zuletzt durch steigende Kraftstoffpreise und verschärfte Umweltgesetze ist in den letzten Jahren im Fahrzeugbau ein Trend zum Leichtbau zu verzeichnen. Die Materialvielfalt nimmt dabei durch den verstärkten Einsatz von Leichtmetallen und Kunststoffen ebenso zu wie die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe. Die Entwicklung neuer Füge-technologien ist die logische Konsequenz [9]. So gewinnt das Kleben zunehmend an Bedeutung. Von Nachteil ist die geringe Anfangsfestigkeit beim Kleben. Im Rohbau werden die Bauteile daher mittels Punktschweißen fixiert, was zu Nacharbeiten insbesondere im Außenhautbereich führt. Alternative Ansätze zielen in Richtung einer lokalen Aushärtung des Klebstoffes durch Wärmezufuhr im Ofen, durch Heizstrahler oder induktive Erwärmung. Vorteile bei einseitiger Zugänglichkeit oder bei nichtleitenden Werkstoffen kann hier der Einsatz des Diodenlasers bieten.

Im Rahmen der Arbeit werden Grundlagen zum Löten und Kleben mit Hochleistungsdiolenlasern erarbeitet. Ziel ist es weiterhin, Ansätze zur Steigerung der Prozesseffizienz aufzuzeigen und das wirtschaftliche Potenzial des Diodenlasers zu unterstreichen.

## 2 Stand der Technik

Im Folgenden wird die Ausgangslage der vorliegenden Arbeit respektive der Stand der Technik bezüglich der verwendeten Strahlquelle Hochleistungsdiodenlaser sowie der untersuchten Fügeverfahren im Hinblick auf den Einsatz des Lasers erläutert.

Basierend auf einem Blick zurück in die Anfänge der Halbleiterlaser (Laserdiode) wird der heutige Entwicklungsstand<sup>1</sup> und die Bedeutung der Diodenlaser insbesondere der Hochleistungsdiodenlaser beleuchtet. Dazu werden die typischen Grundbausteine derzeit verfügbarer Lasersysteme zur Materialbearbeitung charakterisiert und die darauf basierenden unterschiedlichen Bauformen vorgestellt, aus denen sich unterschiedliche Anwendungsbereiche der Systeme in der Materialbearbeitung ergeben. Es wird demonstriert, dass der Einsatz von Hochleistungsdiodenlasern bereits aus heutiger Sicht für bestimmte Anwendungsfälle als wirtschaftlich sinnvoll angesehen werden kann.

Das Laserlöten wird schon seit längerer Zeit untersucht und befindet sich in geringerem Maße seit vielen Jahren bei verschiedenen Anwendungen im industriellen Einsatz. Durch die Entwicklung des Diodenlasers eröffnen sich neue Perspektiven hinsichtlich eines größeren Anwendungspotenzials und einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Ein kurzer Überblick soll das Laserlöten und seine Anwendungsbereiche im Kreis der konkurrierenden Lötverfahren näher beleuchten. Einige Applikationsbeispiele unterstreichen das Potenzial des Laserlötens.

Der Trend im Automobilbau geht hin zum verstärkten Einsatz der Klebetechnologie. In diesem Zusammenhang wird das Kleben als innovative Füge-technologie im Karosseriebau kurz vorgestellt. Der Einsatz des Lasers beim Kleben, sei es in Form einer Klebstellenvorbehandlung oder speziell zum Erwärmen der Fügegeometrie, ist verhältnismäßig neu und nur in Grundzügen erforscht. In diesem Zusammenhang werden bisherige Forschungsthemen und mögliche Anwendungsgebiete des Lasers beim Kleben vorgestellt. Daraus abgeleitet wird die Intention, den Laser als Werkzeug zum Fixieren von Blechen im Automobilbereich durch lokales Kleben zu nutzen, kurz erläutert.

### 2.1 Diodenlaser in der Materialbearbeitung

Bereits kurze Zeit nach der Vorstellung des ersten Lasers (Rubinlaser) 1960 durch Theodore Maiman wurde im Herbst 1962 der erste Halbleiterlaser aus Galliumarsenid (GaAs), basierend auf der Erzeugung von Laserstrahlung aus einem pn-Übergang von

---

1. Durch die rasante Weiterentwicklung auf dem Gebiet der HL DL werden der Vollständigkeit halber auch Systeme und Anwendungsbereiche berücksichtigt, die erst im Laufe dieser Arbeit entwickelt bzw. erschlossen wurden.



Hall et. al [10], demonstriert. Diese Halbleiterlaser konnten aufgrund ihrer einfachen sogenannten GaAs-Homostruktur bei Raumtemperatur nur gepulst betrieben werden, während ein cw-Betrieb nur bei tiefen Temperaturen (77 K) realisiert werden konnte.

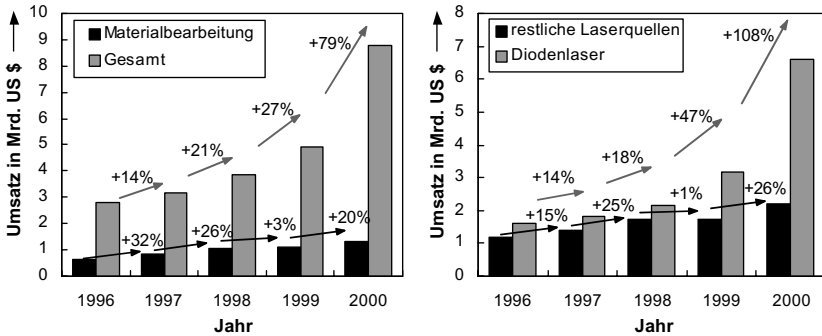
Die Voraussetzungen für einen technischen Einsatz der Halbleiterlaser wurden 1970 mit der Entwicklung von sogenannten Heterostrukturdioden mit einem mehrschichtigen Aufbau aus verschiedenen Halbleitermaterialien geschaffen. Mit den dabei umgesetzten Maßnahmen konnte die Schwellstromdichte für den Laserbetrieb deutlich reduziert und damit ein cw-Betrieb bei Raumtemperatur ermöglicht werden [11],[12].

Dies war gleichzeitig der Startschuss für eine rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Halbleiterlaser mit einem breiten Wellenlängenspektrum in Abhängigkeit vom verwendeten Halbleitermaterial von etwa 400 nm (GaN; GaInN) bis zu 30  $\mu\text{m}$  (Bleisalzlaser) und unterschiedlichsten Bauformen von kantenemittierenden Laserdioden (Doppel-Heterodiode, Quantengrabenlaser) bis hin zu oberflächenemittierenden Diodenlasern (VCSEL) [12],[13]. Daraus ergaben sich bereits frühzeitig vielfältige Anwendungsbereiche für Laserdioden mit geringer Ausgangsleistung vorzugsweise in der Nachrichtentechnik und der Konsumgüterindustrie (CD-Player, Laserdrucker).

Erst die Entwicklung von Diodenarrays mit Leistungen im W-Bereich Ende der 70er Jahre ermöglichte den Einsatz von Diodenlasern zur Materialbearbeitung. Mit Wellenlängen zwischen 800 und 940 nm sind diese prädestiniert zum Pumpen von Festkörperlasern, da verschiedene Laserkristalle in diesem Bereich ein Absorptionsmaximum besitzen. Erste Experimente mit diodengepumpten Festkörperlasern wurden bereits in den 60er Jahren publiziert [14]. Mit der Entwicklung der Diodenarrays stand dann ausreichend Leistung zur Verfügung, was zu verstärkten Forschungsaktivitäten in den 80er Jahren führte. Obwohl in der Folgezeit die Leistung der Diodenarrays drastisch gesteigert wurde, dauerte es bis zu Beginn der 90er Jahre, bis über den Direkteinsatz von Hochleistungsdiodenlasern in der Materialbearbeitung berichtet wurde [15],[16].

Die Breitbandigkeit heutiger Halbleiterlaser hat zu einer weiten Verbreitung und vielfältigen Anwendungsgebieten geführt. Der Diodenlaser hat dabei eine dominierende Rolle im weltweiten Lasermarkt erreicht, wie die Entwicklung in den letzten Jahren eindrucksvoll unter Beweis stellt. Bild 2.1 zeigt dazu die Umsatzentwicklung von Diodenlasern im Vergleich zur Summe aller anderen Laserarten der letzten Jahre. So wurde der Marktanteil von Halbleiterlasern seit 1996 von 57 % über 65 % im Jahr 1999 auf 74 % im Jahre 2000 stark ausgebaut bei einem Gesamtumsatz des weltweiten Lasermarktes in 2000 von 8,8 Mrd. US \$. Dies entspricht einer Vervierfachung des Umsatzes bei Laserdioden auf 6,6 Mrd. US \$, während der Umsatz bei allen anderen Laserstrahlquellen in dieser Zeit um 84 % auf 2,2 Mrd. US \$ angestiegen ist. Insgesamt gesehen konnte der weltweite Lasermarkt dadurch seit 1996 verdreifacht werden. Der Bereich der Lasermaterialbearbeitung wurde in dieser Zeit auf 1,33 Mrd. US \$ verdop-

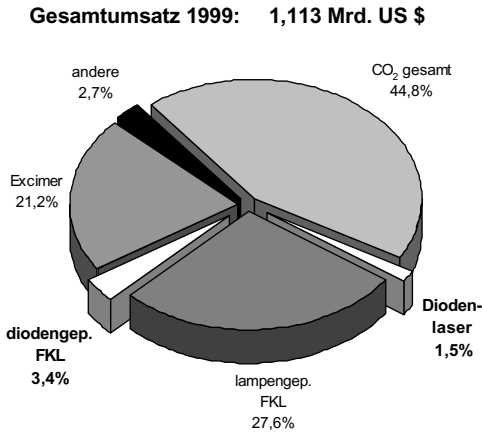
pelt und erreichte bis auf eine konjunkturelle Schwäche 1999 zweistellige Wachstumsraten von über 20 %, wie Bild 2.1 ebenfalls zeigt. Ergänzend sind im Anhang die Marktanteile der einzelnen Lasertypen beispielhaft en detail dargestellt.



**Bild 2.1:** Entwicklung des weltweiten Lasermarktes zwischen 1996 und 2000 - Umsatz des gesamten Lasermarktes im Vergleich zur Lasermaterialbearbeitung und aufgeteilt nach den Laserkategorien Laserdiode - restliche Strahlquellen (Quelle: Laser Focus World [7],[17])

Die Umsatzentwicklungen lassen sich bei genauerer Betrachtung der Umsatzzahlen bezüglich der Anwendungsgebiete für die verschiedenen Strahlquellen leicht nachvollziehen. Während die Haupteinsatzgebiete der Halbleiterlaser 1999 im Bereich der optischen Nachrichtentechnik mit 68 % und der optischen Speichermedien (CD-Player, CD-Rom, CD-RW, DVD) mit 22 % zu suchen sind, kommt die Gesamtheit aller weiterer Laserarten vornehmlich in der Lasermaterialbearbeitung zu 63 % bzw. zu 25 % in der Medizintechnik zum Einsatz. Dieser Zusammenhang kommt in ähnlichen Entwicklungen der Umsatzzahlen zum Ausdruck, siehe Bild 2.1. In den letzten beiden Jahren (1999 und 2000) ist in der Telekommunikation ein nahezu explosionsartiger Anstieg der Anwendungen zu verzeichnen, der zu einer Verfünffachung des Umsatzes über den gesamten Zeitraum von 1996 bis 2000 geführt hat. Allein im Jahr 2000 wurde ein Wachstum von 131 % gegenüber 1999 verzeichnet. Dies spiegelt sich in ähnlicher Form im Wachstum des gesamten Lasermarktes wieder. Um dem stark zunehmenden Internetverkehr Rechnung zu tragen, werden hochleistungsfähige Datenübertragungsnetze mit Übertragungsraten bis zu 10 Gb/s installiert [12]. Diese Übertragungskapazität wird mit Hilfe der sogenannten WDM-Technologie (Wellenlängenmultiplex) durch simultane Nutzung von Übertragungskanälen unterschiedlicher, dicht benachbarter optischer Wellenlängen abgedeckt. Halbleiterlaser kommen dabei sowohl zur direkten Datenübertragung (Sendeelemente) als auch zum Pumpen von Erbium-dotierten Faserverstärkern (EDFA) zur Signalverstärkung zum Einsatz. Einen weiteren bedeutenden Wachstumsmarkt stellt die optische Speichertechnik dar. Neben der weit verbreiteten

Anwendung in CD-Playern und CD-Rom Laufwerken bei PC's, werden zunehmend Computer mit CD-Brennern sowie DVD-Laufwerken ausgestattet. Darüber hinaus gewinnen DVD-Videogeräte mit ihrer sehr hohen Bildqualität langsam an Bedeutung.



**Bild 2.2:** Marktanteil der unterschiedlichen Laserstrahlquellen in der Lasermaterialbearbeitung Stand 1999 (Quelle: Laser Focus World [7],[17])

58 % in 2000 zu verzeichnen war, stehen Diodenlasersysteme für die Materialbearbeitung nach wie vor erst an der Schwelle zur industriellen Anwendung. So betrug 1999 der Marktanteil von Hochleistungsdiodenlasern bei der Lasermaterialbearbeitung lediglich 1,5 %, siehe Bild 2.2. Als Gründe dafür werden die geringe Strahlqualität und die fehlende Verfügbarkeit geeigneter Systeme bzw. der fehlende Nachweis für die Serienfertigung gesehen. Auf der Laser'99 wurden auch hier bereits gute Ansätze vorgestellt, die in absehbarer Zeit industrietaugliche Systeme erwarten lassen.

Die geschilderten Zusammenhänge und dargestellten Marktdaten stammen aus weltweiten Marktanalysen, die von der Zeitschrift Laser Focus World jährlich durchgeführt werden. Einige detailliertere Übersichten hinsichtlich der Anwendungsgebiete der unterschiedlichen Laserstrahlquellen befinden sich im Anhang.

### 2.1.1 Aufbau von Hochleistungsdiodenlasern (HLDL)

Im Gegensatz zu Gas- (CO<sub>2</sub>) und Festkörperlasern (z.B. Nd:YAG), die einen einzelnen Laserstrahl emittieren, entsteht die Strahlung von HLHL durch Überlagerung einer Vielzahl von Einzelstrahlen. Zum Grundverständnis wird im Folgenden in einem kurzen Überblick der prinzipielle Aufbau von derartigen Systemen und verschiedene Möglichkeiten zur Leistungsskalierung beschrieben.

Weit weniger spektakulär stellt sich dagegen die Situation bei den Hochleistungslaserdioden (Barren und Stacks) dar. Der Umsatz lag in den letzten Jahren im Bereich von 95 bis 110 Millionen US \$. Sie werden vornehmlich zum Pumpen von Festkörperlasern, zur direkten Materialbearbeitung und in der Medizintechnik verwendet. Während nach der Vorstellung verschiedener kommerzieller Systeme von diodengepumpten Festkörperlasern auf der Messe Laser'99 ein Wachstum von