

# **Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG- Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßstabilität, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung**

Von Dr.-Ing. Bernd Hohenberger  
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. rer. nat. Siegfried Schmauder

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., 2002

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 3-8316-0223-9

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>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1 Hintergrund und Zielsetzung der Arbeit .....	15
1.2 Aufbau der Arbeit.....	16
<b>2 Stand der Kenntnisse</b>	<b>18</b>
2.1 Prozeß- und anlagentechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO <sub>2</sub> -Laser .....	18
2.2 Doppelfokustechnik .....	22
<b>3 Systemtechnik</b>	<b>27</b>
3.1 Strahlquellen.....	27
3.2 Strahlführung und -formung.....	27
3.2.1 Kollimations- und Fokussieroptiken .....	27
3.2.2 Doppel- und Dreifachfaser .....	28
3.2.3 Teileroptik .....	30
3.2.4 Begriffsdefinitionen.....	32
3.3 Bearbeitungsanlagen .....	34
3.4 Versuchsaufbau zur Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse.....	35
3.4.1 Visualisierung der Schmelzbadoberfläche .....	35
3.4.2 In-situ-Röntgendurchstrahlung .....	37
3.5 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Einkoppelgrades .....	38
3.6 Probenmaterial .....	40
<b>4 Ausbildung der Dampfkapillare</b>	<b>42</b>
4.1 Modellvorstellungen.....	42
4.2 Experimentelle Untersuchung der Kapillardynamik .....	45
4.3 Auswertungen der zeitlich gemittelten Kapillargeometrie.....	48
4.3.1 Einfluß des Fokusabstandes.....	49
4.3.2 Einfluß der Fokusanordnung .....	51
4.3.3 Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit .....	52
4.4 Zusammenfassung .....	55

<b>5</b>	<b>Steigerung der Prozeßstabilität</b>	<b>57</b>
5.1	Entstehungsmechanismen von Nahtimperfectionen .....	57
5.1.1	Prozeßporen .....	57
5.1.2	Schmelzbadauswürfe .....	61
5.1.3	Unregelmäßigkeiten der Nahtoberraupe .....	69
5.2	Ergebnisse zur Prozeßstabilisierung .....	75
5.3	Zusammenfassung .....	82
<b>6</b>	<b>Steigerung der Flexibilität</b>	<b>84</b>
6.1	Gestaltung des Nahtquerschnitts .....	85
6.1.1	Stahl .....	85
6.1.2	Aluminium .....	87
6.1.3	Ergebnisse mit Dreifachfokustechnik .....	90
6.2	Steigerung der überbrückbaren Spaltweite .....	91
6.2.1	Stahl .....	92
6.2.2	Aluminium .....	94
6.3	Zusammenfassung .....	95
<b>7</b>	<b>Steigerung der verfügbaren Laserleistung</b>	<b>96</b>
7.1	Aluminium .....	96
7.2	Stahl .....	103
7.3	Ergebnisse mit Dreifachfokustechnik .....	104
7.4	Zusammenfassung .....	105
<b>8</b>	<b>Industrielle Anwendungsbeispiele</b>	<b>107</b>
8.1	Tailored Blanks .....	107
8.2	Aluminium-Kühlkörper .....	109
8.3	Aluminium-Fahrwerk .....	110
8.4	Anwendungen in der Luftfahrt .....	111
<b>9</b>	<b>Potential und Ausblick</b>	<b>113</b>
9.1	Zusammenfassung .....	117
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>118</b>
	<b>Literatur</b>	<b>121</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>129</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Zielsetzung der Arbeit

Das Schweißen mit Laserstrahlung ist ein Fertigungsprozeß, der in zunehmendem Maße Einzug in die Produktion hält. Hohe Prozeßgeschwindigkeiten, der kraftfreie und sehr gezielte Energieeintrag, schlanke Nahtgeometrien bei geringen Verzügen und die gute Automatisierbarkeit sind die Vorteile, die das Laserstrahlschweißen für den Serieneinsatz so geeignet machen. Zusätzlich eröffnet der Laser neue Möglichkeiten in der Verbindungstechnik, die von der Materialauswahl bis hin zur Gestaltung der Fügstellengeometrie reichen und Produkte mit technologischen Vorteilen entstehen lassen.

Zum Einsatz kommen in der industriellen Fertigung hauptsächlich CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Laser, wobei sich deren Einsatzgebiete bisher kaum überschneiden. Im Bereich des Tiefschweißens mit cw-Lasern dominiert der CO<sub>2</sub>-Laser aufgrund der höheren verfügbaren Laserleistung, wohingegen das gepulste Schweißen fast vollständig von Nd:YAG-Systemen abgedeckt wird. Erst seit kurzem stehen auch Nd:YAG-Strahlquellen mit ausreichender Ausgangsleistung im Dauerstrichbetrieb und mit akzeptablen Strahlqualitäten für die Fertigung zur Verfügung. Der Nd:YAG-Laser bietet aus verfahrenstechnischer Sicht weitreichende Vorteile gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Laser. Seine kürzere Wellenlänge zeigt ein günstigeres Prozeßverhalten und eröffnet mit der Möglichkeit der Strahlführung in Glasfasern eine leichte Handhab- und Integrierbarkeit, so daß der CO<sub>2</sub>-Laser in zunehmendem Maße Konkurrenz auf dem bislang von ihm dominierten Feld erfährt.

Die Doppelfokustechnik - darunter wird in dieser Arbeit das simultane Einwirken von zwei sehr nahe beieinanderliegenden Foki verstanden - ist als Verfahren zur Stabilisierung des Schweißprozesses und zur Verdopplung der zur Verfügung stehenden Laserleistung aus dem Bereich des CO<sub>2</sub>-Lasers bekannt und hat dort seine Fertigungstauglichkeit bereits unter Beweis gestellt. Mit Hilfe der Doppelfasertechnik wurde diese Technologie auf den Nd:YAG-Laser übertragen, um auch bei der kurzen Wellenlänge die Vorteile der Doppelfokustechnik zu nutzen. Erste Stichversuche zeigten die Tauglichkeit des Verfahrens im Hinblick auf eine Leistungsskalierung und eine Verbesserung der Prozeßstabilität.

Tiefere Kenntnisse über die Wechselwirkung der neuen, durch das Verfahren des Doppelfokus zur Verfügung stehenden Parameter liegen jedoch nicht vor, woraus sich die Zielsetzung der Arbeit ableitet: Die gezielte Überprüfung des Potentials der Doppelfokustechnologie mit cw-Nd:YAG-Laser zur Lösung der Problemstellungen der Prozeßstabilität, der Prozeßflexibilität und der Leistungsskalierung.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Aus der Zielsetzung wie dem bisherigen Stand der Technik leitet sich die methodische Vorgehensweise und der Aufbau der Arbeit ab. Zunächst wird in Kapitel 3 die verwendete System- und Meßtechnik beschrieben, die durch die neuen Parameter der Doppelfokustechnik notwendig gewordenen Begriffsdefinitionen durchgeführt und das Probenmaterial beschrieben. Um das Potential der Doppelfokustechnik hinsichtlich seiner Fertigungstauglichkeit auszuloten und um ein möglichst breites Spektrum technisch relevanter Werkstoffe abzudecken, wurden drei verschiedene Materialien mit stark unterschiedlichem Prozeßverhalten ausgewählt. Der Schwerpunkt wurde auf Aluminiumwerkstoffe gelegt, da der Schweißprozeß bei diesem Werkstofftyp im Gegensatz zum Stahlschweißen weitaus schwieriger beherrschbar ist und die Doppelfokustechnik mit dem Nd:YAG-Laser das Potential besitzt, die noch existierenden Probleme zu lösen. Ausgewählt wurden die aushärtbare und gut schweißbare Legierung AlMgSi1 sowie AlMg4,5Mn, eine naturharte Legierung, die aufgrund ihres hohen Magnesiumgehalts als schwer schweißbar gilt. Als Stahlwerkstoff wurde der gut schweißbare Feinkornbaustahl StE 690 eingesetzt.

Grundlage des Prozeßverständnisses und zentrales Anliegen der Arbeit ist die Beschreibung der Dampfkapillare in Kapitel 4. Nach der Diskussion der relevanten Modellvorstellungen zur Kapillarausbildung wird basierend auf der Röntgendurchstrahlung und den kalorimetrischen Untersuchungen zum Einkoppelgrad der Vergleich der Kapillaren bei der Doppel- und der Einzelfokustechnik durchgeführt. Im darauffolgenden Kapitel „Steigerung der Prozeßstabilität“ werden die Entstehungsmechanismen der laserspezifischen Nahtimperfectionen beim Schweißen von Aluminium am Beispiel der Legierung AlMg4,5Mn auf der Basis von Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen in der Auflichtbetrachtung und der Röntgendurchstrahlung diskutiert. Darauf aufbauend wird ein Modell entwickelt, welches das Entstehen der Nahtfehler Prozeßporen, Schmelzbaudauswürfe und eine unregelmäßige Nahtoberraupe auf Instabilitäten der Dampfkapillare zurückführt. Im nächsten Schritt wird gezeigt, wie die Kapillare und damit der Schweißprozeß mit der Doppelfokustechnik zielgerichtet stabilisiert und Prozeßporen vermieden oder zumindest sehr stark reduziert werden können.

Kapitel 6 zeigt die Möglichkeiten der Doppelfokustechnik zur Nahtformung und wie die größere Flexibilität des Verfahrens genutzt werden kann, um die überbrückbare Spaltweite zu steigern. Kapitel 7 beinhaltet die Untersuchungen zur Strahladdition, d. h. die Steigerung der verfügbaren Laserleistung zum Zwecke der Erhöhung von Einschweißtiefe und Prozeßgeschwindigkeit. Eine Konsequenz der erreichten Ergebnisse ist eine weitere Erhöhung der Strahlleistung zur Steigerung des Prozeßwirkungsgrades, welche mit der Addition von drei Strahlquellen und einer damit verfügbaren Strahlleistung am Werkstück von bis zu 10 kW realisiert wurde.

Die Umsetzung der bisher erarbeiteten Ergebnisse in der industriellen Anwendung wird in Kapitel 8 dargestellt. Verschiedene Anwendungsbeispiele zeigen, daß die Doppel-

fokustechnik trotz erhöhtem Systemaufwand durch Synergieeffekte bei der Qualität und Produktivität wirtschaftlich ist.

Im darauffolgenden Kapitel „Potential und Ausblick“ wird der Bezug zur aktuellen Entwicklung der Strahlquellen hergestellt und die Chancen der Doppelfokustechnik im Zusammenhang mit diodengepumpten Lasersystemen höchster Strahlqualität erörtert. Kapitel 10 enthält zum Abschluß eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit.

## 2 Stand der Kenntnisse

### 2.1 Prozeß- und anlagentechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Laser

Der Nd:YAG-Laser ist im Begriff, beim Laserstrahlschweißen in den Bereich des CO<sub>2</sub>-Lasers einzubrechen und ihn zunehmend zu verdrängen. Sein Potential liegt in der um den Faktor 10 kürzeren Wellenlänge. Daraus resultiert ein stark verändertes Absorptionsverhalten der Laserstrahlung, was neben der Möglichkeit der *Strahlführung* in Glasfasern, ein größeres *Prozeßfenster*, einen höheren *Prozeßwirkungsgrad* und eine höhere *Prozeßstabilität* zur Folge hat [1],[2],[3].

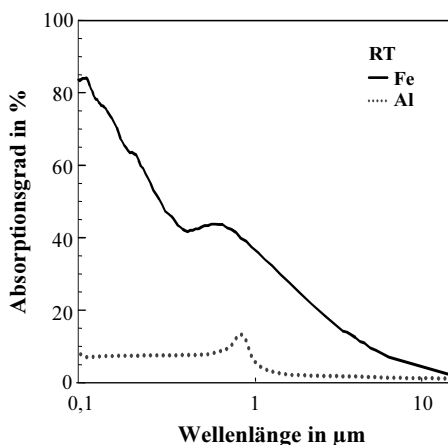


Abb. 2.1: Absorptionsgrad von Eisen und Aluminium bei Raumtemperatur als Funktion der Wellenlänge [1].

Der Hauptgrund für den zunehmenden Einsatz des Nd:YAG-Lasers in der Produktion ist die geringe Absorption seiner Wellenlänge  $\lambda=1,064 \mu\text{m}$  in Gläsern und die damit verbundene Möglichkeit der Strahlführung in Glasfasern. Mit den kommerziell erhältlichen Glasfasersystemen<sup>1</sup> kann der Laserstrahl ohne jede Sicherheitsmaßnahme praktisch frei durch die Produktionsumgebung geführt werden. Die hohe Flexibilität der Fasern bei gleichbleibenden Strahleigenschaften erfordert keine steifen, hochpräzisen

---

1. Strahlführungssystem bestehend aus Glasfaser, Faserendsteckern und Ummantelung zur Gewährleistung von Reproduzierbarkeit, Robustheit in industrieller Umgebung und zur Überwachung gegen ungewollten Strahlaustritt.



und damit teuren und wenig flexiblen Strahlführungseinheiten mit Spiegeln. Dadurch wird eine einfache, robuste und gleichzeitig leichte Handhabung und Integration in neue und bereits bestehende Fertigungsanlagen ermöglicht [4], [5]. Aufwendige Justagearbeiten entfallen und der präventive Einbau einer Ersatzfaser steigert die Verfügbarkeit der Anlagen.

Die Übertragung der Laserstrahlung in Glasfasern erfolgt nahezu verlustfrei. Lediglich an den Stirnflächen entstehen Ein- und Auskoppelverluste in der Größenordnung von jeweils 3-4 %. Aus diesem Grund können Glasfasersysteme fast beliebig lange ausgeführt werden. Aus der Literatur sind Anwendungen mit der Strahlführung in Glasfasern von mehreren hundert Metern Länge [6] bekannt. Laser und Bearbeitungsstelle können dadurch räumlich getrennt werden, was einerseits wertvollen Raum in den Produktionsanlagen einspart, und andererseits erlaubt, beinahe an jeder Stelle der Produktion Strahlleistung zur Verfügung zu stellen.

Transmissive Strahlformungselemente haben zudem den Vorteil, daß eine Prozeßüberwachung oder -visualisierung über dieselben optischen Elemente erfolgen kann, die zur Strahlformung und -führung des Leistungsstrahls eingesetzt werden [7],[8]. Zusätzliche Anbauten im Bereich der Bearbeitungsstelle können dadurch vermieden werden. Die Zugänglichkeit wird gesteigert.

Die bessere Absorption der kurzen Wellenlänge  $\lambda=1,064 \mu\text{m}$  in Metallen ist ein weiterer Vorteil des Nd:YAG-Lasers. Bei Aluminium liegt die Fresnel-Absorption bei senkrechtem Strahleinfall und Schmelztemperatur mit 11% doppelt und bei Eisen mit 30% etwa dreimal so hoch wie mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung [9]. Für den Schweißprozeß hat dies zur Folge, daß die Schwelle, bei der das Tiefschweißen einsetzt, mit dem Nd:YAG-Laser bereits bei geringeren spezifischen Leistungen  $P/d_f$  erreicht wird [10]. Weiterhin wird im Verhältnis zur Verfügung stehenden Leistung mehr Laserleistung in Wärme umgesetzt. Der Wirkungsgrad des Prozesses ist höher, was in der Praxis bedeutet, daß der Nd:YAG-Laser für dieselbe Schweißaufgabe weniger Laserleistung benötigt.

Ein weiterer großer Vorteil der kurzen Wellenlänge liegt in der erhöhten Prozeßstabilität, welche aus der geringen Wechselwirkung der Laserstrahlung mit teilionisierten Metalldämpfen resultiert. Inhärent mit dem Tiefschweißen von Metallen und der Ausbildung der Kapillare verbunden ist die Bildung von Metalldampfplasma im Dampfkanaal und einer über der Kapillare fluktuierenden Wolke aus ausströmendem Materialdampf. Aufgrund der hohen Leistungsdichte der Laserstrahlung beim Schweißen von typischerweise mehreren  $10^6 \text{ W/cm}^2$  wird der Metalldampf stark erhitzt und teilweise thermisch ionisiert. In der Metalldampf Wolke über dem Werkstück werden die optischen Eigenschaften des Bearbeitungsstrahles durch *Absorption, Streuung* und *Brechung* verändert.

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  im teilionisiertem Metalldampf steigt mit der Wellenlänge im Quadrat an [3], was zur Folge hat, daß wesentlich weniger Strahlung des Nd:YAG-Lasers vom Metalldampf absorbiert wird und sich der Metalldampf nicht so stark erhitzt wie bei größeren Wellenlängen. Dies hat weitreichende Konsequenzen für die Prozeßsicherheit. Messungen der Temperatur und der Elektronendichten in der

Schweißfackel zeigen, daß bei der Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers kein laserinduziertes Plasma erzeugt wird und die Absorptionslängen um ein Vielfaches über denen des CO<sub>2</sub>-Lasers liegen. Die Abschwächung des Strahles durch Absorption spielt somit für die kurze Wellenlänge des Festkörperlasers eine untergeordnete Rolle [11],[12]. Eine Plasmaabschirmung wird mit den Leistungsdichten heutiger cw Nd:YAG-Laser nicht erreicht. Die obere Prozeßgrenze wird damit zu größeren Werten hin verschoben, siehe Abbildung 2.2. Auf Mittel zur Vermeidung von Plasmen wie Schutzgase mit hohem Ionisationspotential, hoher Wärmeleitfähigkeit und/oder den Einsatz eines Gasjets kann verzichtet werden, vorausgesetzt die Oxidation der Nahtberraupe ist zulässig. Ein Anwendungsbeispiel an Baustahl in [5] zeigt, daß sich dadurch deutliche Reduzierungen der Betriebskosten gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Laser erreichen lassen.

Ein zweiter Effekt ist die Linsenwirkung der Schweißfackel. Die räumliche Variation der Temperatur und der Elektronendichte führt zu einer Brechungsindexverteilung im Metalldampf [11],[13],[14]. Bei angenommener Rotationsymmetrie und einer stationären Ausbildung der Metalldampf Wolke hat diese die Wirkung einer defokussierenden Linse. Zeitlich hochaufgelöste Messungen der Temperaturverteilung in der Metalldampf Wolke zeigen jedoch starke räumliche, hochfrequente Fluktuationen [15],[16]. Dadurch wird der Bearbeitungsstrahl undefiniert deformiert und unterliegt hochfrequenten Änderungen von Fokusslage, -position und Leistungsdichteverteilung. Instabilitäten, die dem Prozeß somit von außen aufgeprägt werden [16],[17], sind aus den oben genannten Gründen bei Nd:YAG-Lasern weit weniger stark wirksam wie bei CO<sub>2</sub>-Lasern.

Ein weiterer Mechanismus, der zu Veränderungen der Leistungsdichteverteilung des Laserstrahls vor dem Auftreffen auf das Werkstück führen kann, ist die Streuung der Laserstrahlung an ultrafeinen Partikeln, die mit dem Metalldampf aus der Kapillare ausströmen [18],[19]. In der Theorie nimmt der Einfluß der Streuung mit kürzerer Wellenlänge zu. Messungen [5] zeigen jedoch einen geringen Einfluß dieses Mechanismus für den Nd:YAG-Laser, der deutlich unter den theoretischen Werten liegt und deshalb vernachlässigt werden kann.

Neben der Metalldampf Wolke über dem Werkstück besitzt auch das laserinduzierte Plasma in der Kapillare einen erheblichen Einfluß auf deren Stabilität. Nach dem Modell der reibungsbehafteten Strömung des Metalldampfes in der Kapillare [13] steigt mit zunehmender Temperatur die Zähigkeit des Dampfes und damit die Reibung an. Die Geschwindigkeitsverteilung des ausströmenden Dampfes kann sich durch die erhöhte Reibung derart verändern, daß es zu einer Blockade des abströmenden Metalldampfes und in der Folge zu einem Kollaps der Dampfkapillare oder zu einem Auswurf der Schmelze kommt. Mit zunehmender Temperatur des Metalldampfes steigt also die Empfindlichkeit gegenüber Störungen der Kapillargeometrie und damit die Anfälligkeit des Prozesses bezüglich dieser Fehler an. Experimentelle Untersuchungen von [5],[20],[21] unterstützen die Thesen des Modells und belegen die deutlich höhere Prozeßstabilität bei kurzer Wellenlänge aufgrund der geringeren Temperaturen in der Kapillare.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das Prozeßfenster beim Tiefschweißen von Eisen- und Aluminiumwerkstoffen beim Nd:YAG-Laser deutlich größer ist als das des CO<sub>2</sub>-Lasers, siehe Abbildung 2.2. Sowohl die Schwelle zum Tiefschweißen als untere Grenze, als auch die Plasmaabschirmung als obere Prozeßgrenze kann mit der kurzen Wellenlänge zu günstigeren Werten hin verschoben werden. Die geringere Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Metall Dampf führt zu einer erhöhten Prozeßstabilität und gesteigerten Prozeßsicherheit. Insbesondere das Schweißen von Aluminiumwerkstoffen wird mit dem Nd:YAG-Laser dadurch besser beherrschbar [3],[22].

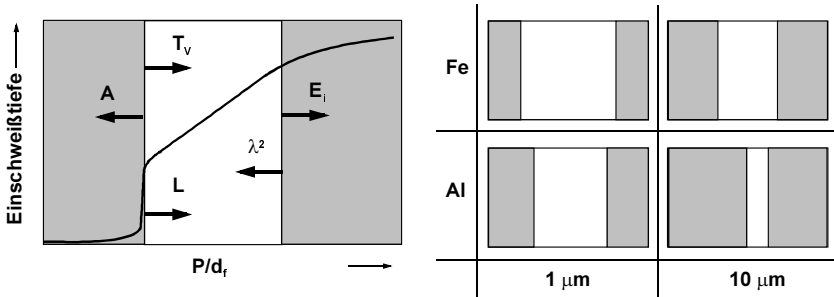


Abb. 2.2: Prozeßfenster beim Laserstrahlschweißen abhängig von Strahl- und Werkstoffparametern [3]. (Absorptionsgrad A, Verdampfungstemperatur  $T_v$ , Wärmeleitfähigkeit L, Wellenlänge  $\lambda$ , Ionisationsenergie des Werkstoffs  $E_i$ )

Diesen Vorteilen des Nd:YAG-Lasers steht jedoch das Manko der geringen verfügbaren Laserleistung gegenüber. Im Vergleich erreichen kommerziell verfügbare Nd:YAG-Laser bis  $P=3$  kW [23] und CO<sub>2</sub>-Laser bis  $P=50$  kW Laserleistung im Dauerstrichbetrieb [24],[25]. Bei gleicher Leistung erreichen moderne CO<sub>2</sub>-Lasersysteme zudem nahezu Gauß-Mode, d. h. sie besitzen eine wesentlich bessere Strahlqualität, wodurch sich bei gleicher Fokussierzahl<sup>1</sup> geringere Fokussdurchmesser erzielen lassen. Mit seiner höheren Laserleistung und besseren Fokussierbarkeit erreicht der CO<sub>2</sub>-Laser größere Einschweißtiefen und Prozeßgeschwindigkeiten.

Die Entwicklung neuer leistungsstärkerer Festkörperlaser, aufbauend auf den Konstruktionsprinzipien aktueller Systeme, stößt zunehmend an Grenzen, da die Skalierung der Laserleistung bisher durch das sequentielle Anordnen von Kristallstäben erfolgt, die jeweils eine Leistungsausbeute von etwa 600 W erreichen. Der Hauptgrund für die zunehmenden Schwierigkeiten ist die Verschlechterung des Strahlparameterprodukts mit zunehmender Leistung durch thermisch induzierte optische Inhomogenitäten, dem sogenannten „thermischen Linseneffekt“ [1]. Das laseraktive Medium (LAM) kann in der Stabgeometrie nur an der Mantelfläche gekühlt werden, wodurch sich ein näherungsweise parabelförmiger Temperaturverlauf über den Querschnitt und eine entsprechende Änderung des Brechungsindex einstellt. Mit zunehmender Anzahl an Stäben

1. Verhältnis aus Brennweite zu Strahldurchmesser auf der Fokussieroptik.

nimmt die Strahlqualität deshalb sukzessive ab. Der minimal einsetzbare Glasfaserdurchmesser, welcher ein Maß für die Strahlqualität ist, nimmt in der Folge ebenso zu wie die am Werkstück erzielbaren Fokusedurchmesser. In Bezug auf die Leistungsdichte kann dies dazu führen, daß der Zugewinn an Strahlleistung durch zusätzlicher Kavitäten durch die Vergrößerung des Fokusedurchmessers überkompensiert wird.

Neue Konzepte zur Steigerung der Laserleistung von Nd:YAG-Lasern erfordern eine geringere Wärmefreisetzung oder eine effizientere Kühlung. Ersteres wird realisiert durch den Einsatz von Diodenlasern zum selektiven Pumpen des LAM anstatt den breitbandig anregenden Bogenlampen. Dies hat den Vorteil, daß die Wellenlänge des Pumplichts genau an die Pumpbänder des LAM angepaßt werden kann und so weniger Verlustwärme entsteht. Eine effizientere Kühlung wird erreicht durch neue Geometrien des LAM, wie beispielsweise beim Scheiben- [26], [27] oder Faserlaser [28],[29]. Die verfügbare Laserleistung dieser Strahlquellen ist jedoch für die meisten technischen Anwendungen noch zu gering.

## 2.2 Doppelfokustechnik

Ein einfaches Mittel zur Erhöhung der verfügbaren Laserleistung am Werkstück ist die Addition der Strahlung mehrerer Strahlquellen. Dieses Verfahren ist aus dem Bereich des CO<sub>2</sub>-Lasers bekannt und wurde für das Schweißen und Beschichten von Stahl- und Aluminiumwerkstoffen erprobt und tiefgehend untersucht [20],[30],[31],[32].

Für Festkörperlaser werden in der Literatur verschiedene Ansätze zur Strahladdition beschrieben, welche im folgenden dargestellt werden. Die Hauptunterscheidungsmerkmale dieser Ansätze sind die geometrischen Anordnung der Laserstrahlen und die Betriebsmodi der Strahlquellen. Neben der Kombination mehrerer Optiken nebeneinander wird durch den Einsatz transmissiver Optiken bei Nd:YAG-Lasern auch die Addition kollimierter Strahlen über eine gemeinsame Fokussierlinse, die Fokussierung mehrerer Laserstrahlen in eine gemeinsame Glasfaser und die Verwendung von Doppelfasern möglich (siehe Abbildung 2.3). Diese Varianten erlauben jeweils die Kombination von Lasern im Dauerstrichbetrieb (cw), im Pulsbetrieb (pw) als auch die Kombination beider Betriebsmodi. Cw-Laser besitzen im allgemeinen eine höhere mittlere Leistung, welche die Prozeßgeschwindigkeit bestimmt, wohingegen gepulste Lasersysteme kurzzeitig eine höhere Maximalleistung besitzen und dadurch höhere Einschweißtiefen erzielen. Die Zielsetzung der Kombination von cw- und pw-Lasern ist die Nutzung der jeweiligen Vorteile, d. h. das Erreichen eines robusten Prozesses durch eine stabile, dauerhaft geöffneten Dampfkapillare, einer hohen Prozeßgeschwindigkeit sowie einer großen Einschweißtiefe. Da gepulste Lasersysteme zudem kostengünstiger sind als cw-Systeme, verspricht die Kombination beider Lasertypen auch einen betriebswirtschaftlichen Nutzen.

Die einfachste Methode der Strahladdition ist die Verwendung von separaten Optiken (siehe Abbildung 2.3, a). Bei dieser Methode ist das Gesamtsystem sehr flexibel. Sowohl die Anordnung und der Abstand der Foki als auch die Fokuslage können