

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

K. Krastel  
Konzepte und Konstruktionen zur  
laserintegrierten Komplettbearbeitung  
in Werkzeugmaschinen

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

# **Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen**

Von Dr.-Ing. Klaus Krastel  
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. Dr. h.c. mult. Uwe Heisel

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 3-8316-0176-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

## Kurzfassung

Die Lasermaterialbearbeitung gilt heute als wirtschaftlich bedeutende Schlüsseltechnologie in der modernen Produktionstechnik. Verfahrenstechnische Vorteile gegenüber konkurrierenden Fertigungsverfahren sowie die hohe Flexibilität überzeugen sowohl Fertigungsplaner als auch Entwickler und Konstrukteure. Der Laser hat dadurch neue Anwendungsgebiete in der Fertigungstechnik erobert. Der Wunsch der Anwender nach immer komplexeren Fertigungseinrichtungen mit den unterschiedlichsten integrierten Funktionsgruppen ist deutlich im Bereich der spanenden Fertigungstechnik zu erkennen. Im Vergleich dazu kommt der Laser jedoch meist in Stand-Alone-Anlagen zum Einsatz. Die Verknüpfung der Lasermaterialbearbeitung mit der spanenden Fertigung ist hier ein weiterer Schritt zur Steigerung der Komplexität solcher Maschinen. Die sich dadurch ergebenden neuen Fertigungsmöglichkeiten werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Die Arbeit gliedert sich im wesentlichen in die drei Teile: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der laserintegrierten Komplettbearbeitung, Konzepte zur Integration von Laser in Fräsmaschinen mit kartesischen Achsen und Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken sowie experimentelle Untersuchungen zur Strahlsicherheit von Werkzeugmaschinen.

Bei der Kostenbetrachtung von Bauteilen einer laserintegrierten Fertigung kann es zum Ergebnis kommen, daß die in einer Maschine und einer Aufspannung gefertigten Teile teurer sind als die Herstellung mit der konventionellen Fertigungstechnik. Einen großen Stellenwert nimmt in diesem Zusammenhang eine Nutzwertanalyse ein. Mit ihr wird der nicht monetär erfaßbare Anwendernutzen der neuen Fertigungstechnologie gegenüber der herkömmlichen Fertigung deutlich herausgestellt.

Die fasergeführte Integration eines Festkörperlaser in Fräs-/ Bohrzentren mit kartesisch angeordneten Maschinenachsen wird in unterschiedlichen Lösungsansätzen diskutiert. Zwei dieser Konzepte werden ausgearbeitet und in zwei verschiedenen Maschinentypen realisiert. Für die immer stärker auf dem Markt vertretenen hochdynamischen Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken wird ein neues Strahlführungssystem entwickelt welches gleichermaßen den Einsatz von Festkörperlaser als auch von CO<sub>2</sub>-Lasern erlaubt. Die Notwendigkeit dieser Entwicklung wird in der Darstellung der Anwendungspotentiale einer laserintegrierten Komplettbearbeitung verdeutlicht.

Die neue Maschinenteknik verlangt auch nach Sicherheit und Schutz des Werkers vor Gefährdung durch aus dem Arbeitsraum austretende Laserstrahlung. In experimentellen Untersuchungen wird dieser Forderung Rechnung getragen. Dazu werden die an Türen vorkommende Spalte in einem Aufbau simuliert, untersucht und bewertet.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>17</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>21</b>
2.1 Lasertechnik	21
2.1.1 Strahlpropagation und Strahlqualität	21
2.1.2 Strahlführung und Strahlformung	23
2.1.3 Hochleistungslaser für die Materialbearbeitung	29
2.2 Laserverfahren in Werkzeugmaschinen	38
2.3 Maschinentechnische Realisierungen der Laserintegration	43
2.3.1 Drehmaschinen	44
2.3.2 Stanz-Nibbelmaschinen	49
2.3.3 Schnellstanzen	49
2.3.4 Schleifmaschinen	50
2.3.5 Honmaschinen	50
<b>3 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit</b>	<b>52</b>
3.1 Kriterien für die laserintegrierte Komplettbearbeitung	52
3.2 Gesichtspunkte zur Bewertung einer laserintegrierten Komplettbearbeitung	55
3.2.1 Nutzwertanalyse	57
3.2.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel eines Serienteils	61
3.2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Beispiel eines Einzelteils	63
<b>4 Fasergeführte Integration in konventionelle Fräszentren</b>	<b>66</b>
4.1 Allgemeine Randbedingungen	66
4.2 Konstruktive Konzepte der radialen Zufuhr	68
4.2.1 Feste Glasfaser- und Gasankopplung am Laserwerkzeug	69
4.2.2 Integration mit automatisch lösbaren Schnittstellen	71

4.2.3	Beispielhafte Integration in das Fräs-/ Bohrzentrum MAHO MH 600C	76
4.3	Konstruktive Konzepte der axialen Zufuhr	82
4.3.1	Beispielhafte Integration in das Bearbeitungszentrum Steinel BZ 20	86
4.4	Vorschläge zu konstruktiven Maßnahmen für die Laserintegration in Bearbeitungszentren	92
4.5	Anwendungspotential und Herausforderungen laserintegrierter Fertigung	95
<b>5</b>	<b>Laserintegration in Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken</b>	<b>101</b>
5.1	Neue Werkzeugmaschinen	101
5.2	Konzepte der Strahlführung in PKM-Maschinen	103
5.3	SFS für PKM-Maschinen	106
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Strahlsicherheit</b>	<b>111</b>
6.1	Versuchsaufbau	112
6.2	Konstruktive Gestaltung der verschiedenen Spaltgeometrien	113
6.3	Versuchsdurchführung	114
6.4	Auswertung der Messungen und Ergebnisse	115
6.4.1	Ergebnisse am Stumpfstoß	115
6.4.2	Ergebnisse am Überlappstoß	118
6.4.3	Ergebnisse am U-Labyrinth	120
6.4.4	Einfluß von Werkstoff und Oberfläche	123
6.4.5	Einfluß der Abstände von Laseroptik und Detektor vom Meßspalt	124
6.5	Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse	125
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>127</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>129</b>



# Abkürzungen und Formelzeichen

a	m	Abstand des Fokus zur Eintrittsebene des Spalts
b	m	Abstand der Detektorfläche zur Spaltaustrittsöffnung
BK7		Bezeichnung der Glassorte BK7 (Borsilicat)
CO <sub>2</sub>		chem. Kurzzeichen für Kohlenstoffdioxid
cw		continuous wave, kontinuierlicher Verlauf der Strahlleistung
D	m	Durchmesser des unfokussierten Strahls auf der Linse
d <sub>0</sub>	m	Strahldurchmesser des unfokussierten Strahls
d <sub>f</sub>	m	Strahldurchmesser des fokussierten Strahls
DIN		Deutsche Industrie-Norm
d <sub>K</sub>	m	Durchmesser des Faserkerns
f	m	Brennweite
F		Fokussierzahl (f/D)
f		Gelenkfreiheitsgrad
Δf	m	Fokuslagenverschiebung
F		Freiheitsgrad
FKL		Festkörperlaser
g		Gelenk in einer kinematischen Kette
GaAs		chem. Kurzzeichen für Galliumarsenid
HLDL		Hochleistungsdiodenlaser
HSC		High-Speed-Cutting
HSK		Hohlschaftkegel nach DIN 69893
I	W·m <sup>-2</sup>	Intensität
IBS		Integrated Beam Shaping, integrierte Strahlformung
IKZ		interne Kühlmittelzufuhr
KCl		chem. Kurzzeichen für Kaliumchlorid
K-Zahl		Strahlqualitätszahl
LAM		laseraktives Medium
LAM		Laser assisted machining
L <sub>IKZ</sub>	m	Spindellänge der internen Kühlmittelzufuhr
LIPOR		Linearpolarisations-Orientierer
LLK		Lichtleitkabel
M <sup>2</sup>		Beugungsmaßzahl
MIG		Metall-Inertgas-Schweißen
MZB	W·m <sup>-2</sup>	maximal zulässige Bestrahlung
n		Brechungsindex
n		Getriebeglied in einer kinematischen Kette
n <sub>1</sub>		Brechungsindex Kern (Core)

$n_2$		Brechungsindex Mantel (Cladding)
NA		numerische Apertur
Nd:YAG		Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall
p	m	Spaltbreite
PKD		polykristalliner Diamant
PKM		Parallelkinematik
R	m	Biegeradius der Glasfaser
$R_z$	m	gemittelte Rauhtiefe nach DIN 4768
s	m	Spalthöhe
S		Spiegel
SFS		Strahlführungssystem
SK		Steilkegelschaft nach DIN 69871
SPP	mm·mrad	Strahlparameterprodukt
TCP		Tool-Center-Point, Werkzeugbezugspunkt
$w_0$	m	Strahltaille des unfokussierten Strahls
WIG		Wolfram-Inertgas-Schweißen
$w_{IKZ}$	m	Strahltaille der internen Kühlmittelzufuhr
X, Y, Z		Kartesische Maschinenachsen
Yb:YAG		Ytterbium-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall
z	m	Abstand zwischen Taille des unfokussierten Strahls und Fokussieroptik
$z_i$	m	Abstand zwischen Taille des fokussierten Strahls und Fokussieroptik
ZnSe		chem. Kurzzeichen für Zinkselelid
$z_{R0}$	m	Rayleigh-Länge des unfokussierten Strahls
$z_{Rf}$	m	Rayleigh-Länge des fokussierten Strahls
$\alpha_{\max}$	°	Grenzwinkel der Totalreflexion, Akzeptanzwinkel
$\beta$	°	Detektorwinkel
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\Theta$	rad	Divergenzwinkel des unfokussierten Strahls
$\Theta_f$	rad	Divergenzwinkel des fokussierten Strahls
$\eta_L$		Laserwirkungsgrad

# 1 Einleitung und Zielsetzung

In den letzten Jahren hat sich im Bereich der spanenden Werkzeugmaschinen der Trend in Richtung komplexer Werkzeugmaschinen mit verschiedenen integrierten Funktionsgruppen verstärkt. Dies liegt unter anderem daran, daß die Anwender immer mehr die Möglichkeit der vollständigen Bearbeitung eines Werkstücks bzw. Werkstückspektrums in einer Aufspannung mit entsprechender Genauigkeit fordern. Höhere Prozeßgenauigkeit, kombiniert mit abgesicherten Prozessen, ermöglichen die Integration mehrerer Technologien und, damit oft verbunden, die Automatisierung ganzer Prozeßketten. Am weitesten vorangeschritten ist die Integration mehrerer Bearbeitungstechnologien in Drehmaschinen, die heute neben den konventionellen Drehoperationen von Innen- und Außenkonturen, Gewindeschneidoperationen auch eine Fräsbearbeitung des Werkstückes ermöglicht. Hierfür wurden die Drehmaschinen um angetriebene Werkzeuge in Werkzeugwechselsystemen und um gesteuerte Hauptspindelachsen erweitert. Auf marktgängigen Drehmaschinen können so eine simultane Drehbearbeitung sowie die Operationen Bohren, Gewindeschneiden und Fräsen ausgeführt werden [1]. Diese vollständige und abgeschlossene spanende Bearbeitung von Werkstücken durch Ausführung zusammenhängender Arbeitsschritte einer Prozeßkette in einem Arbeitssystem wird als spanende Komplettbearbeitung definiert [2]. Ein Beispiel hierfür ist die Bearbeitung von Nockenwellen in einer Drehmaschine. Das Fräsen der Nocken substituiert gleichzeitig das Vorschleifen, so daß ein zeitaufwendiger Arbeitsgang entfällt und die Produktivität dadurch deutlich gesteigert wird [3].

Bei prismatischen Werkstücken, die weitgehend auf Fräs-/ Bohrmaschinen gefertigt werden, sind bei bahngesteuerten Maschinen neben Bohren und Fräsen auch Verfahren wie Zirkular- und Außenrundfräsen möglich [4], [5].

Betrachtet man jedoch die gesamten Fertigungsabläufe, so zeigt sich, daß das Härten, Fügen, Beschriften und Oberflächenumwandeln bzw. Oberflächenbeschichten von Werkstücken in den sonst hochintegrierten Fertigungslinien nicht enthalten ist. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Zum einen ist man heute noch nicht in der Lage, diese Operationen gemeinsam auf einer einzigen oder auf wenigen Maschinen durchzuführen, da bislang für jeden dieser Fertigungsschritte eine eigene Maschine benötigt wird. Zum anderen haben Maschinen wie zum Beispiel Härteanlagen eine palettierte Beschickung im Gegensatz zur Einzelteilbearbeitung beim Zerspanen, wodurch vor und nach solchen Stationen eine Teilepufferung notwendig wird. Dies erweist sich besonders dann als nachteilig, wenn die Werkstücke z.B. nach dem Härten für eine Feinarbeitung wieder in die spanenden Maschinen eingegliedert werden müssen.

Das Werkzeug Laser hat sich in den letzten Jahren aufgrund seiner hohen Prozeßsi-

cherheit und Flexibilität in vielen Bereichen der industriellen Fertigungstechnik fest etabliert und einen bedeutenden und stetig zunehmenden Stellenwert eingenommen. Dabei handelt es sich meist um die Substitution und Ergänzung konventioneller Verfahren wie Schweißen und Schneiden sowohl im 2D- und 3D-Bereich, Bohren, Härten und Beschriften. Bei der Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren, wie den Rapid Prototyping Technologien [6], nimmt das Werkzeug Laser eine immer stärkere Schlüsselrolle ein [7]. Stellvertretend seien hier die Verfahren Strukturiertes Abtragen, Sintern, Generatives Auftragsschweißen und Biegen genannt. Diese Fertigungsverfahren sind bislang meist nicht in die Fertigungseinrichtungen integriert, sondern werden in sogenannten „Stand-Alone“-Stationen eingesetzt.

Aufgrund seiner hohen Flexibilität und guten Ansteuerbarkeit ist der Laser als ein zusätzliches verschleißfreies Werkzeug für eine Integration in den Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine prädestiniert. Damit stehen die bekannten Lasermaterialbearbeitungsverfahren für den Einsatz in den Werkzeugmaschinen zur Verfügung. Durch die Kombination herkömmlicher Fertigungsverfahren mit der Laserbearbeitung werden neue Arbeitsgebiete erschlossen sowie neue Fertigungsverfahren und Produktionsstrategien ermöglicht.

Das Ziel einer Laserintegration im Sinne der Komplettbearbeitung ist es, die gesamte Prozeßkette vom Roh- bis zum Fertigteil in einer Maschine, d.h. in einer Aufspannung, mit herkömmlichen und neuen Fertigungsverfahren zu realisieren und den steigenden Anforderungen an Qualität, Formgenauigkeit und Verschleißfestigkeit sowie immer kürzer werdenden Innovations- und Entwicklungszeiten gerecht zu werden.

Für den Bereich der Drehzentren wurden einige Entwicklungen für die industriell einsetzbare laserintegrierten Fertigung durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit ist es, für den Bereich der konventionellen Fräs-/Bohrzentren (kartesische Achsen) konstruktive Entwicklungen und Umsetzungen für eine laserintegrierte Fertigung durchzuführen. Das Maschinenspektrum wird weiterhin um die Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken erweitert. Dabei werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten den Laser in diese Maschinentypen zu integrieren untersucht und diskutiert. In einem zweiten Schritt wird ein speziell für diese Maschinen mit Parallelkinematiken geeignetes Strahlführungssystem entwickelt. Für eine möglichst ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung ist es notwendig eine Aussage über die Lasersicherheit solcher Maschinen machen zu können. Dazu werden grundlegende Untersuchungen zur Strahlsicherheit, d.h. Austritt von Laserstrahlung aus dem Arbeitsraum der Werkzeugmaschine durchgeführt.

Zu Beginn der Arbeit werden in Kapitel 2.1 grundlegende Sachverhalte der Lasertechnologie

nik vermittelt. Dabei werden sowohl die Strahlpropagation, die Strahlführung und Strahlformung behandelt, als auch eine Darstellung der verschiedenen Laseraggregate gegeben. Neben den herkömmlichen in bereits großer Stückzahl eingesetzten und in der industriellen Fertigung etablierten CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern wird besonders auch auf die neueren Systeme der Hochleistungsdiodenlaser und auf die neuesten Entwicklungen im Bereich der Festkörperlaser eingegangen.

Ein Überblick der in Werkzeugmaschinen einsetzbaren unterschiedlichen Lasermaterialbearbeitungsverfahren wird in Kapitel 2.2 gegeben. Weiterhin werden die erweiterten Fertigungsmöglichkeiten der laserintegrierten Komplettbearbeitung herausgearbeitet.

Die bislang durchgeführten Arbeiten zu maschinentechnischen Realisierungen der laserintegrierten Fertigung werden in Kapitel 2.3 aufgeführt und erörtert. Dabei erfolgt einerseits die Diskussion an im industriellen Einsatz befindlichen Maschinen, andererseits werden auch die an Forschungsinstituten aufgebauten Prototypen behandelt.

Da in der heutigen Zeit die Frage nach der Wirtschaftlichkeit bei der Einführung eines neuen Fertigungsverfahrens oder bei der Entwicklung von neuen Werkzeugmaschinen mit neuen Fertigungstechnologien immer mehr im Vordergrund steht, wird dieser Forderung in Kapitel 3 nachgegangen. Dabei steht nicht die klassische Kostenrechnung im Vordergrund, sondern es werden vielmehr die Kriterien und Gesichtspunkte dargestellt, die einen Einsatz des Lasers in Werkzeugmaschinen berechtigen. Anhand einer Nutzwertanalyse werden für ein Serien- und ein Einzelteil die nichtmonetären Vorteile beispielhaft aufgezeigt.

Die konstruktive Gestaltung der fasergeführten Integration des Lasers in konventionelle Fräs-/Bohrzentren wird in Kapitel 4 anhand zweier unterschiedlicher Maschinentypen dargestellt. Bei einem Fräs-/Bohrzentrum MH 600C der Firma MAHO mit horizontaler und vertikaler Bearbeitungsspindel erfolgt die konstruktive Umsetzung in einer Art Nachrüstlösung ohne größere Umbaumaßnahmen an der Maschine selbst. In der zweiten Variante wird in das Bearbeitungszentrum BZ20 der Firma Steinel die Integration des Lasers durch die Bearbeitungsspindel ausgeführt. Konstruktive Änderungen und Umgestaltungen im Bereich der Spindel sind dazu notwendig.

Die immer stärker auf dem Maschinenmarkt verfügbaren Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken (Stabgelenkinematiken) sind unter anderem durch ihre hohen Beschleunigungen von über 4g am TCP gekennzeichnet. Hierfür wird in Kapitel 5 ein nicht fasergekoppeltes Strahlführungssystem für eine 6-Achs-Bearbeitung konstruktiv konzipiert.

Die bei der Lasermaterialbearbeitung auftretenden ungerichteten reflektierten Strahlungsanteile an Türspalte und Ritzen werden in Kapitel 6 näher untersucht. Dazu erfolgt eine Untersuchung der Abdichtungssysteme und Spalte an Türöffnungen von Maschinenkabinen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Lasertechnik

Die Bezeichnung der unterschiedlichen Lasertypen erfolgt im allgemeinen mit der Nennung des in der Strahlquelle für den Lasereffekt benutzten laseraktiven Mediums (LAM). Mit der Wahl des laseraktiven Mediums liegen somit auch die charakteristische Wellenlänge  $\lambda$  und die physikalischen Bedingungen zur Erzeugung der Laserstrahlung fest. Als wichtige heute industriell einsetzbare Lasertypen sind hier der Nd:YAG-Laser ( $\lambda=1064$  nm), der CO<sub>2</sub>-Laser ( $\lambda=10600$  nm) und in neuester Zeit auch der Hochleistungsdiodenlaser (808 nm  $<\lambda < 960$  nm, abhängig von dem zur Dotierung verwendeten Material) zu nennen.

Weitere Details wie zum Beispiel Resonatoraufbau, -typen, Moden, Entstehung der Laserstrahlung etc. können hier nicht diskutiert werden, vielmehr sei auf die zahlreich diesbezüglich vorhandene Literatur hingewiesen ([8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]).

Eine wichtige Grundlage stellen jedoch die Begriffe Strahlqualität und Strahlpropagation dar, da sie neben der Wellenlänge  $\lambda$  und der Laserleistung ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung unterschiedlicher Lasertypen und gleicher Lasertypen verschiedener Hersteller untereinander bilden.

#### 2.1.1 Strahlpropagation und Strahlqualität

Der Begriff Strahlqualität beschreibt die Eigenschaft des Lasers, die für seine Fokussierbarkeit, d.h. für das Erreichen eines bestimmten Fokusdurchmessers bei gegebener Fokussieroptik, verantwortlich ist. Als Grundlage zur Beschreibung dieser Eigenschaft dienen die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung von Laserstrahlen, die besagen, daß das Strahlparameterprodukt aus Radius am Ort der Strahltaile  $w_0$ <sup>(1)</sup> und dem halben Divergenzwinkel  $\Theta/2$  eines Strahles während der Propagation des Strahles konstant bleibt und der Wellenlänge  $\lambda$  proportional ist. Zudem wird es von der Auslegung des Resonators beeinflusst. Ein kleiner Wert des Strahlparameterproduktes ist gleichbedeutend mit einer hohen Strahlqualität. Es gilt:

---

<sup>(1)</sup> Die Werte für  $w_0$  bzw.  $d_0$  und  $\Theta$  beziehen sich auf die Strahlabmessung kreisrunder Strahlen, die 86,5 % der gesamten Strahlleistung (-energie) enthält.