

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und -führung für die Mikrotechnik

Von Dr.-Ing. Knut Jasper
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. Dipl.-Ing. Hans Tiziani

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 3-8316-0205-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Formelzeichenverzeichnis	9
Extended Abstract	11
1 Einleitung	15
2 Beschreibungsmethoden von Laserstrahlen	17
2.1 Strahlcharakterisierung	17
2.2 Strahltransport	21
3 Grundlegende Qualitäts- und Effizienzmerkmale der abtragenden Bearbeitung	25
3.1 Materialeigenschaften	25
3.2 Fokussierendes Verfahren	28
3.3 Abbildendes Verfahren	35
4 Konzepte für abbildendes Verfahren	45
4.1 Effizienzsteigerung durch Nutzung des gesamten Strahlquerschnitts	45
4.1.1 Herkömmliche Grundprinzipien der Homogenisierung von Laserstrahlen	46
4.1.2 Entwicklung eines neuen Homogenisiererkonzeptes	56
4.1.2.1 Prinzip der Homogenisierung	56
4.1.2.2 Theoretische Betrachtungen	59
4.1.2.3 Realisierung und Charakterisierung des Homogenisierers	75
4.2 Effizienzsteigerung durch mehrfache Maskenbeleuchtung	78
4.2.1 Konzept mit definierter Abbildung beider Strahlachsen	79
4.2.1.1 Entwicklung des Konzepts	79
4.2.1.2 Realisierung und Charakterisierung	97
4.2.2 Konzept mit definierter Abbildung einer Strahlachse	100
4.2.2.1 Entwicklung des Konzepts	100
4.2.2.2 Realisierung und Charakterisierung	109
5 Konzept für fokussierendes Verfahren	115

5.1 Potentiale des Trepanierens und Wendelbohrens mit Anstellwinkel	115
5.2 Entwicklung einer neuen Trepanieroptik	117
5.2.1 Strahlablenkung	117
5.2.2 Fokussierung	127
5.2.3 Integration in eine Bearbeitungsmaschine	128
5.2.4 Realisierung und Charakterisierung	134
6 Zusammenfassung	145
7 Literaturverzeichnis	147

1 Einleitung

Der Laser hat als Strahlquelle mit seinen ganz besonderen Eigenschaften weit über die Grenzen von Universitätslabors hinaus große Verbreitung gefunden. Er ist in der optischen Meßtechnik, der Spektroskopie, der Umwelttechnik, der Nachrichtenübertragung, dem Fernsehen, der Medizin und zunehmend als Strahlquelle mit ausgesprochen intensiver Strahlung in der Materialbearbeitung zu finden. Besonders hervorzuheben sind im letztgenannten Bereich die Anwendungen des Schneidens, Schweißens, Beschichtens und Härtens sowie die Erzeugung diamantähnlicher Schichten. Hierbei werden meistens cw-Laser wie CO₂-Laser und Nd:YAG-Laser eingesetzt. Gepulste Lasersysteme wie z.B. gütegeschaltete Nd:YAG-Laser und Excimerlaser haben zwar in der Regel eine geringere mittlere Leistung, doch durch ihre kurzen Pulszeiten, die bis in den Sub-ns-Bereich reichen, stehen hohe Pulsspitzenleistungen zur Verfügung, die sich zum Abtragen und Bohren eignen.

In der Feinwerktechnik werden diese Laser zunehmend für die Herstellung von Bohrungen und Konturen im Größenbereich von 100 µm und kleiner eingesetzt, während mechanische Verfahren an ihre Grenzen stoßen. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich von der Elektronikindustrie über die Textilindustrie bis hin zur Automobilindustrie. Der treibende Faktor ist zum einen der Bedarf an immer mehr miniaturisierten Düsen wie z.B. bei Tintenstrahldruckern, Einspritzdüsen und Spinn-
düsen und zum anderen die Miniaturisierung von Bohrungen in der Leiterplattentechnik, beispielsweise zur Durchkontaktierung von verschiedenen Leiterplatten-
ebenen.

Allerdings befindet sich der Laser je nach konkreter Anwendung und zu bearbeitendem Material in Konkurrenz mit anderen Verfahren wie z.B. Senkerodieren, Elektronenstrahlätzen und Plasmaätzen. Die Aspekte, die für die Auswahl eines bestimmten Verfahrens eine Rolle spielen, sind vor allem die Wirtschaftlichkeit und die erzielbare Qualität des Bearbeitungsergebnisses. Der Laserstrahl kann dabei durch seine Verschleißfreiheit und durch die Möglichkeit der Bearbeitung an der Umgebungsatmosphäre Vorteile erlangen. Demgegenüber stehen die hohen Kosten des Werkzeugs Laserstrahl im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren sowie teilweise die Präzision des Bearbeitungsergebnisses. Darum werden für eine breite industrielle Einführung des Lasers Wirtschaftlichkeit und hohe Konturtreue des Bearbeitungsergebnisses immer wichtiger.

Seit seiner Einführung hat sich der Excimerlaser zunehmend für die Bearbeitung von Kunststoffen durchgesetzt. Er verfügt zwar über eine hohe Pulsenergie, besitzt aber eine schlechte Strahlqualität. Um trotz seiner schlechten Fokussierbarkeit zu den

geforderten kleinen Strukturgrößen zu gelangen, hat sich unter anderem das Maskenabbildungsverfahren etabliert. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen werden möglichst viele Strukturen auf die Maske gebracht, die dann gleichzeitig hergestellt werden können. Allerdings sinkt der Prozeßwirkungsgrad durch die an der Maske reflektierte oder absorbierte Laserenergie. In Kombination mit dem ohnehin kleinen Wirkungsgrad dieses Lasertyps sinkt der Gesamtwirkungsgrad auf einige Zehntel Prozent. Da mit diesem Bearbeitungsverfahren die erzielbare Qualität bereits sehr gut ist, ist es bei diesen Systemen durch eine optimierte Strahlausnutzung wünschenswert, die Effizienz des Gesamtsystems zu verbessern. Dieser Thematik ist innerhalb dieser Arbeit das Kapitel 4 gewidmet.

Während mit Excimerlasern kleine und flache Strukturen ($1\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$) mit Aspektverhältnissen (Bohrungstiefen zu -durchmessern) kleiner 1 ohne größere Schwierigkeiten mit hoher Qualität hergestellt werden können, erfordern Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen einen anderen Lasertyp. Für diese Aufgabe eignen sich besonders gut gepulste Festkörperlaser in fokussierender Anordnung. Sie sind dem Excimerlaser hinsichtlich der Prozeßeffizienz deutlich überlegen, und die größere Wellenlänge dieses Lasertyps ist vor allem beim Material Stahl kein großer Nachteil.

Gerade Bohrungen in Metallen mit Durchmessern zwischen $50\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ finden neue Anwendungen als Einspritzdüsen in der Automobilindustrie. Stand der Technik war bisher, daß der Kraftstoff durch eine relativ große Öffnung (Durchmesser im $200\ \mu\text{m}$ -Bereich) in den Brennraum gelangt. Um eine bessere bzw. gezieltere Verteilung des Kraftstoffs im Brennraum zu erreichen, werden neuerdings Konzepte verfolgt, bei denen viele kleine Bohrungen (Durchmesser bis $100\ \mu\text{m}$) mit unterschiedlichen Größen und Wandwinkeln benötigt werden. Um den benötigten hohen Einspritzdrücken von einigen Hundert bis Tausend bar gerecht zu werden, kommen Materialien wie Edelstahl mit Wanddicken um einen Millimeter zur Anwendung. Daraus ergeben sich Aspektverhältnisse der Bohrungen von 10 und größer. Für die Herstellung der benötigten Geometrien kommt erschwerend hinzu, daß es sich bei den Düsenkörpern meistens um Hohlkörper handelt, die nur von der Außenseite her zugänglich sind. Um jedoch die gewünschte Kraftstoffverteilung im Brennraum zu erzielen, besteht ein besonders großer Bedarf an zylindrischen Bohrungen und an Bohrungen, die auf der Innenseite des Düsenhohlkörpers einen größeren Querschnitt haben als auf der Außenseite und deshalb einen Hinterschnitt aufweisen müssen. Um letztendlich die gewünschten Wandwinkel mit hoher Effizienz bei guter Bohrungsqualität mit einem gepulsten Festkörperlaser herzustellen, bedarf es jedoch zusätzlich geeigneter Strategien der Laserstrahlbewegung auf dem Werkstück, wie sie beispielsweise durch die in Kapitel 5 dieser Arbeit beschriebenen Konzepte realisiert werden können.

2 Beschreibungsmethoden von Laserstrahlen

Für die Zielsetzung dieser Arbeit ist es unerlässlich auf Strahltransport bzw. -propagation in Zusammenhang mit Strahlqualität und Beugungseffekten an Aperturen, die in den Strahlengang eingebracht werden, einzugehen. Deshalb sollen die in dieser Arbeit verwendeten Formalismen zur Beschreibung von Laserstrahlen in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden. Für eine detaillierte Darstellung und Herleitung sei auf die jeweilige Literatur verwiesen, beispielsweise [1] bis [3].

2.1 Strahlcharakterisierung

Wie bereits angedeutet, finden in dieser Arbeit Laser mit stark unterschiedlichen optischen Eigenschaften Anwendung. Für Laserstrahlung von Gas- und Festkörperlaser mit verhältnismäßig guter Strahlqualität ist das real vorhandene Strahlprofil mit Hermitschen bzw. Laguerreschen Polynomen, also mit Eigenmoden der Freiraumausbreitung, in guter Näherung darstellbar, und die Propagation bzw. der Strahltransport kann mit Hilfe von Gauß-Bündeln und deren höheren Moden sehr gut beschrieben werden. Bei der Mikromaterialbearbeitung werden für fokussierende Anordnungen meistens Laser benutzt, deren Strahlqualitäten dem Grundmode TEM_{00} sehr nahe kommen. Für diesen Fall ergibt sich eine Gaußsche Leistungsdichteverteilung an der Stelle z entlang des Strahls:

$$E(r, z) = E_0(z) \cdot e^{-2r^2/w^2(z)}. \quad (2.1)$$

Der Strahlradius wird per Definition bei $E = E_0(z)/e^2$ bei $r(z) = w(z)$ festgelegt. Mit w_0 als Strahlradius an der Stelle des kleinsten Strahlquerschnitts (Strahltaile) bei $z = 0$ gilt für den Strahlradius entlang der Propagationsstrecke

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad (2.2)$$

wobei z_R die Rayleigh-Länge darstellt, die definiert ist durch

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Sie symbolisiert die Entfernung von der Strahltaile, in der die Leistungsdichte auf der Strahlachse halb so groß ist wie in der Strahltaile. Für große Entfernungen $|z|$ von der Strahltaile ergibt sich aus (2.2) die Fernfelddivergenz mit

$$\phi = \frac{w_0}{z_R}. \quad (2.4)$$

Der Taillendurchmesser für den Grundmode entspricht dem kleinsten bei einer bestimmten Wellenlänge und Divergenz erreichbaren Brennfleckdurchmesser. Er ist gegeben durch:

$$2w_0 = \frac{2\lambda}{\pi \cdot \phi}. \quad (2.5)$$

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist das Strahlparameterprodukt. Es ist Eigenschaft eines jeden Laserstrahls und bleibt für jede beliebige Strahlformung in einem aperturfreien Strahlengang konstant:

$$w_0 \cdot \phi = konst. \quad (2.6)$$

Die Eigenschaften der betrachteten Laserstrahlen differieren jedoch von den idealen Strahleigenschaften. Diesem Unterschied wird durch die sogenannte K -Zahl Rechnung getragen. Sie ist definiert als

$$K = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{z_R}{w_0^2} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0 \cdot \phi}, \quad (2.7)$$

wobei es sich bei z_R , w_0 und ϕ_0 um die real vorhandenen Größen handelt. Hierbei gilt $K \leq 1$, so daß bei realen Laserstrahlen bei gegebener Rayleighlänge z_R der Strahlradius w_0 in der Strahltaille meist größer ist als in dem idealen Fall. Die Strahlkaustik läßt sich dann beschreiben durch:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R \cdot K} \right)^2}. \quad (2.8)$$

Bei der Fokussierung Gaußscher Strahlen wird die Strahlkaustik durch die in den Strahlengang eingebrachte Linse bzw. das Objektiv mit der Brennweite f transformiert. Die Fokusslage bzw. die Position der Strahltaille des transformierten Strahls muß aufgrund von Beugungseffekten nicht notwendigerweise in der Brennebene des Objektivs liegen. Ihre Lage z_T' nach einer Linse läßt sich berechnen durch

$$z_T' = \frac{(z_T \cdot f - z_T^2 - z_R^2) \cdot f}{(z_T - f)^2 + z_R^2}, \quad (2.9)$$

wobei z_T die Position der Strahltaille vor der Linse ist und sich z_R auf den zu fokussierenden Strahl bezieht. Die Rayleighlänge z_R' der Strahltaille nach der Linse