

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

<p>Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme</p> <p>Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich</p>

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 CO₂-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

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungen und Formelzeichen	9
Extended Abstract	11
1 Einleitung und Zielsetzung	17
2 Stand der Technik	21
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
3 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit	52
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
4 Fasergeführte Integration in konventionelle Fräszentren	66
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
5	Laserintegration in Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken	101
5.1	Neue Werkzeugmaschinen	101
5.2	Konzepte der Strahlführung in PKM-Maschinen	103
5.3	SFS für PKM-Maschinen	106
6	Experimentelle Untersuchungen zur Strahlsicherheit	111
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
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
8	Literatur	129

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 ₂		chem. Kurzzeichen für Kohlenstoffdioxid
cw		continuous wave, kontinuierlicher Verlauf der Strahlleistung
D	m	Durchmesser des unfokussierten Strahls auf der Linse
d ₀	m	Strahldurchmesser des unfokussierten Strahls
d _f	m	Strahldurchmesser des fokussierten Strahls
DIN		Deutsche Industrie-Norm
d _k	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 ⁻²	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 _{IKZ}	m	Spindellänge der internen Kühlmittelzufuhr
LIPOR		Linearpolarisations-Orientierer
LLK		Lichtleitkabel
M ²		Beugungsmaßzahl
MIG		Metall-Inertgas-Schweißen
MZB	W·m ⁻²	maximal zulässige Bestrahlung
n		Brechungsindex
n		Getriebeglied in einer kinematischen Kette
n ₁		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 Zinkselenid
z_{R0}	m	Rayleigh-Länge des unfokussierten Strahls
z_{Rf}	m	Rayleigh-Länge des fokussierten Strahls
α_{\max}	°	Grenzwinkel der Totalreflexion, Akzeptanzwinkel
β	°	Detektorwinkel
λ	m	Wellenlänge
Θ	rad	Divergenzwinkel des unfokussierten Strahls
Θ_f	rad	Divergenzwinkel des fokussierten Strahls
η_L		Laserwirkungsgrad

Extended Abstract

The complete processing of complex workpieces in one setting in turning or milling centres is recognised today as an appropriate way to ensure high accuracies at justifiable costs and time. Therefore, the developments in the branch of machine tools for metal cutting went into the direction of machines with different integrated functions. Regarding the processing steps, it shows that for example hardening as well as joining and marking are often not integrated in these automated processing machines. One reason is, that some of these processes are not available with standard cutting tools. For each operation another machine has to be used. The other reason is that for instance case hardening machines process multiple parts simultaneously, whereas cutting machines have a single processing. Because of this reason a rearrangement of parts before and after each of these processing steps is necessary.

In the past years laser have found new applications in production engineering as tools for surface treatment, cutting, welding, drilling and marking. So far, the laser is mainly used in specialised laser processing machines („Laser-only“), or directly integrated in a production line, or serve as stand-alone stations in the workshop. On the basis of high flexibility, good automation, beam delivery by glass fibre (Nd:YAG and diode lasers) and the availability of high power diode lasers with small dimensions makes the laser as an integrated tool in a machine tool predetermined. Applications of laser caving, hardening, welding, and drilling of production parts in combination with the conventional cutting operations can serve different purposes. The main advantages are a reduction of the material flow between the production machines, which leads to a reduction in processing time and logistics, and an enhancement of manufacturing quality due to the processing in one setting. In addition to this approach new processing technologies like laser assisted machining are possible.

Lasertechnologies

The laser processes with respect to the idea of integrated manufacturing may serve three different purposes:

- the laser process can be considered as a technique „equivalent“ to a classic one (e.g. laser cutting in stamping-cutting machines, laser drilling in milling centres),
- the laser beam can be used as a tool in addition to the conventional cutting process (e.g. laser hardening, - drilling in a turning centre, laser welding in a stamping-cutting machine),

- the laser beam can be used as a tool „supporting“, or „assisting“ a cutting process to increase the process efficiency or just to enable a cutting process of materials with difficult cutting properties.

A summary of different laser processes can be integrated in different machine tools. Laser drilling, scribing, cutting, trimming, and caving are technologies which enhance the conventional cutting technologies due to extended geometry or additional materials can be processed. Drilling, scribing, caving and trimming can be used for all types of parts, whereas cutting is only possible on thin materials. Therefore the laser cutting process will be used very seldom in milling machines at processing of prismatic parts, whereas a usage in turning centres for processing of tubes is possible.

Laser joining, laser surface treatment processes and rapid prototyping, as generally separated external or subsequent following production steps, can be included in one production sequence of metal cutting and laser processing inside the machine centre. The spectrum of technologies is enhanced and a complete processing in one setting can be performed.

Laser supporting or assisting processes increase the process efficiency or just enable a cutting process. Examples are chip breaking or laser assisted machining of ceramics and alloys with low machinability. At these techniques the laser beam must be present simultaneously to the cutting tool.

Realisation of Laserintegration

The different possibilities of laser integration into machine tools have to meet the following requirements:

- the laser equipment (fibre, optics) must not interference with the characteristic features of the machine tool,
- the laser tool is handled and must be available like the conventional cutting tool,
- the laser control has to be included in the machine control,
- the design of the beam delivery and the laser tool should not make any limitations for laser material processing inside the machine tool.

The following different possibilities of laser integration were investigated for turning and milling centres more detailed. A Nd:YAG-Laser has been chosen, because in comparison to CO₂-lasers the beam guiding system can be realised by fibre and with the shorter wavelength advantages at some applications (e.g. laser hardening) will be offered.

Since several years different possibilities of laser integration (CO₂- and Nd:YAG-Laser) into turning centres at research institutes are well known. Now commercial available turning centres with a Nd:YAG laser are available. In 1993 the Traub company presented the first turning centre, where the beam guiding fibre is mounted pivoting and coaxial to the upper turret. The laser tool is mounted at the position of a cutting tool. The turning INDEX GS 200 of the Index company has designed and realised an optimised system, where the glass fibre is completely mounted in the turret.

Investigations of laser integration in milling centres have been made only at research institutes. The principle solutions for integration of a laser tool in a milling centre can be subdivided into three main groups:

- laser tool and beam delivery is fixed together,
- laser beam (glass fibre) and gas support are coupled in the front part of the spindle by an interface radial to the tool axis,
- laser beam and process gas are guided axially through the spindle.

For a radial beam delivery with an interface between machine and laser tool, the laser beam as well as the processing gas are coupled radial in a special designed optical tool. The fibre coming from the laser and the optical system for beam collimation are fixed together at the machine tool. The collimated laser beam (interface between glass fibre and laser tool) is coupled into the laser tool and will be deflected parallel to the tool axis. This integration was realised in a four axis milling centre MH600C from the MAHO company. A particular feature of this machine is a vertical and horizontal work spindle. In combination with the pivoting milling head the spindles can be changed. Each spindle is equipped with a separate glass fibre, so that each laser tool can be used either in the horizontal or vertical spindle. The different tools – which essentially are beam shaping optics with nozzles and cross jets, depending on the application built in modular design – are stored with the cutting tools in the tool storage.

Most milling centres on the market today have an internal coolant supply. Through the rotating union the coolant lubricant is transported with high pressure (up to 70 bar) into the hollow spindle and is then either guided through the middle of the tool holding fixture into the tool, or eccentrically into the spindle nose. The intensive cooling and lubrication of the lips of a tool, as well as a continuous chip removal, is ensured. The bore in the middle of the spindle can also be used for axial beam delivery. There are various possibilities of realisation for this beam delivery with different designs of the interface:

- 1) The beam delivery inside the spindle and in the tool collet chuck is character-

ised by free propagation of the laser beam. The fibre that is coming from the laser is fixed at the end of the spindle in the rotating union, where the optical system is collimating the laser beam. Small inner diameters of the spindles will often disable this alternative.

- 2) Only one fibre from the laser through the spindle to the laser tool is used. The fibre has to be mounted in a tube inside the coolant bore and has to be seated in special ball bearings avoiding any torsion of the fibre during the rotation of the spindle. Special fibre connectors without compatibility to standard systems are needed. Another problem is the high rotary frequency (up to 12000 min^{-1}) and the needed coolant lubricant flow can not be guaranteed.
- 3) A „connecting“ fibre is mounted inside the spindle. The fibre coming from the laser ends in the rotating union. The installed optical system couples the laser beam into the second fibre that is mounted in a tube with special designed profile (the needed flow of coolant lubricant is guaranteed) in the spindle. In this case the fibre is rotating with the spindle during all cutting processes.

Alternative 3) is the most promising solution for applications and was installed in the spindle the a machining centre BZ 20 from the Steinel company. Some losses of beam quality and laser power have to taken into account, yet.

In addition, in all three alternatives the laser tool can be rotated using the spindle. This is important for laser processing with asymmetrical beam spots used for hardening or cladding.

The solution with radial beam delivery represents a low cost expansion kit, which can be adapted to many types of machine tools. The beam delivery through the spindle is a general solution suitable for a new milling centre series with fully integrated laser tools.

Economic aspects

A discussion of the economics of the approach discussed herein has to consider the particular case of application since the main causes for cost reduction due to integrated laser processing depends on the amount of parts manufactured on this machine.

By increasing the technological degree of compactness, a complete manufacturing process like milling, hardening and hardmilling/ harddrilling becomes possible in one machine. This has implications to the achievable production quality as a consequence of manufacturing in one setting and the better quality of laser processing. Due to a re-

duction of processing steps advantages in logistics arise and intermediate stocking is reduced. When the requirements for a shortening of production time are established allowing shorter delivery periods, a quicker reaction to the market or a later start of production becomes possible, and the capital costs are reduced.

The time period the laser is used in a particular machine is in general small compared to cutting times. Hence the rate of utilisation of the laser would not be very high if connected to only one cutting machine. If the laser is shared on several machining centres, the hourly running costs of the evaluated machine increase by acceptable amounts. Hence, time sharing appears as an important concept to reduce costs. It shall be emphasised that, due to the flexible adjustment of laser power and/ or intensity, the same laser can be used for different technologies in different machines.

In the following the costs of two different parts were evaluated by a machine hours rate calculation. The first one is a typical large scale production part for hydraulics, and the second one a customised body of a blade milling cutter tool produced on small amounts.

The conventional carburize process was substituted by laser hardening in a laser integrated cutting machine. A comparison of the costs for conventional processing with those for integrated laser processing for the mass production part, a cost saving of almost 18% has been demonstrated. The reasons were a reduction in processing time and in processing steps (reduction of 25%), and less reworking for final processing because less distortion occurred during hardening.

In the case of the small scale production part the direct production costs did not decrease. At the fore was the saving of tools and the reduction of logistic measurement. As some working operations can be dealt with in one machine, the number of necessary working stations reduces. This again leads to a highly noticeable reduction of processing time of 33%. The cost per item on the other hand increased by approximately 25%. Because here most advantages cannot be judged monetarily, a benefit analysis comparing items like higher processing flexibility, improvements of quality, punctual deliveries or higher capacity showed a superior result.

Conclusions

Technical solutions for laser integration have been shown for two types of machining centres, a turning centre and a milling centre. Laser integration is possible as an expansion kit as well as a fully integrated tool without any restrictions. Using a laser system in a time shared operation – which is the state of art – leads to sharing and hence to a

reduction of investment costs.

Three different production techniques – cutting (material removal, drilling), joining and hardening – have demonstrated the feasibility of a laser integrated complete machining in machine tools, extending the machining functions in one setting. The Nd:YAG-Lasers available today cover the whole range of applications from fine cutting up to welding and surface treatment.

Time and cost savings, reduced flow of material and higher quality are the main advantages of laser integration. This has been proved by an analysis for large and small scale production parts, where the conventional hardening was replaced by laser hardening. For large scale production a return of investment of two years has been calculated if one laser is used in a time sharing system together with several machine tools. In small scale production the time savings and non monetarily items are dominating.

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 Feinbearbeitung 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 Schlüsselfunktion 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 Lasertech-

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 CO₂- 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 λ 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 CO₂-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 λ 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 Strahltaille $w_0^{(1)}$ und dem halben Divergenzwinkel $\Theta/2$ eines Strahles während der Propagation des Strahles konstant bleibt und der Wellenlänge λ proportional ist. Zudem wird es von der Auslegung des Resonators beeinflusst. Ein kleiner Wert des Strahlparameterproduktes ist gleichbedeutend mit einer hohen Strahlqualität. Es gilt:

⁽¹⁾ Die Werte für w_0 bzw. d_0 und Θ beziehen sich auf die Strahlabmessung kreisrunder Strahlen, die 86,5 % der gesamten Strahlleistung (-energie) enthält.

$$SPP = w_0 \cdot \frac{\Theta}{2} = \frac{d_0 \cdot \Theta}{4} = \frac{d_f \cdot \Theta_f}{4} = const. \quad (1)$$

Bei nichtkreisförmigen Strahlquerschnitten werden die Divergenzwinkel, die Strahldurchmesser und die Strahlparameterprodukte für die x- bzw. die y-Richtung durch die jeweiligen Größen getrennt bestimmt. Die Kennzeichnung erfolgt durch die entsprechenden Indizes, z.B. SPP_x , d_x , Θ_x [15]. Dies ist vor allem bei der Charakterisierung von Diodenlasern (s. Kapitel 2.1.3.3) notwendig.

Strahltaillen treten im Laserstrahl beim Verlassen des Resonators, in Teleskopen und im Fokus auf. Die in der Lasermaterialbearbeitung relevanten geometrischen Größen eines Laserstrahles nach dem Verlassen des Resonators und nach dessen Fokussierung sind in Bild 1 dargestellt.

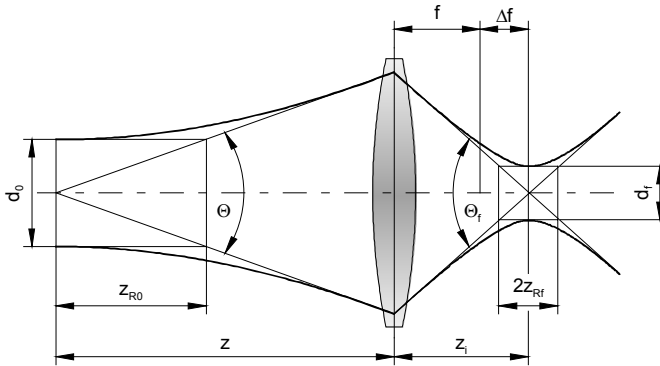


Bild 1: Geometrische Größen eines Laserstrahles beim Verlassen des Resonators und nach der Fokussierung [8].

Zum Vergleich verschiedener Laser gleicher Wellenlängen dient der Strahlpropagationsfaktor $K^{(2)}$ oder die Beugungsmaßzahl M^2 , wobei

$$K = \frac{1}{M^2} \quad \text{und} \quad (2)$$

$$K = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{4}{d_0 \cdot \Theta} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{SPP} \quad \text{mit} \quad (3)$$

⁽²⁾ Es haben sich hierfür die Begriffe "K-Zahl" und "M²" durchgesetzt.

$$SPP = \frac{\lambda}{\pi} = \text{const.} \quad (4)$$

für $K = 1$, bei beugungsbegrenzter Strahlqualität.

Der Strahlpropagationsfaktor K ist ein Maß dafür, wie nahe das Strahlparameterprodukt an der Beugungsbegrenzung eines Gauß-Strahles im transversalen Grundmode ist. Die K -Zahl ist 1 für einen theoretisch idealen Gauß-Strahl (Gl. (4)) und nimmt für einen realen Strahl Werte zwischen 1 und 0 an.

Im Bereich der Strahltaille breitet sich der Laserstrahl nach Gleichung (5) hyperbolisch aus.

$$d(z) = d_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot K \cdot w_0^2} \right)^2} . \quad (5)$$

Die Zunahme des Durchmessers $d(z)$ eines frei propagierenden Strahles mit der Entfernung ist um so geringer, je größer die K -Zahl (gleichbedeutend mit besserer Strahlqualität) und je kleiner die Wellenlänge λ ist. Aus der Konstanz des Strahlparameterproduktes (s. Gl. (1)) und nach Gleichung (5) erlauben große Strahldurchmesser eine geringe Strahlaufweitung bei einer Propagation innerhalb eines gegebenen Durchmessers. Ein Laserstrahl läßt sich somit optimal an ein Strahlführungssystem mit begrenzter Apertur anpassen.

2.1.2 Strahlführung und Strahlformung

Auch nach einer Strahlformung (Aufweitung durch Teleskop, Fokussierung) des Laserstrahles bleibt das Strahlparameterprodukt erhalten. Mit Gleichung (1), (3) und der Charakterisierung des Divergenzwinkels auf der Fokussierlinse durch die Fokussierzahl F (F-Zahl) als Quotient aus Brennweite zu Strahldurchmesser D auf der Linse, kann der Fokusedurchmesser in guter Näherung bestimmt werden zu

$$d_f = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{F}{K} \quad (6)$$

$$\text{mit} \quad F = \frac{f}{D} . \quad (7)$$

Mit einer stärkeren Fokussierung (Verkleinerung des Fokusedurchmessers durch eine kürzere Brennweite), nimmt der Divergenzwinkel zu und dadurch die Rayleigh-Länge z_R (Schärfentiefe) ab. Sie wird definiert als der Abstand von der Strahltaille, bei dem

sich die Querschnittsfläche des Strahles verdoppelt hat (Zunahme des Strahldurchmessers um Faktor $\sqrt{2}$). Die Rayleigh-Länge ist somit auch ein Bewertungskriterium für die Positionsempfindlichkeit des Lasers in Strahlrichtung gegenüber der Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks. Es gilt:

$$z_R = d_f \cdot F = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{F^2}{K} . \quad (8)$$

Bei der Propagation von Laserstrahlung hängt die Lage der Bildebene z_i nicht wie in der geometrischen Optik nur von der Gegenstandsweite z und der Brennweite f , sondern auch von der Rayleigh-Länge z_{R0} ab. Die Verschiebung Δf der Fokuslage berechnet sich nach

$$\Delta f = z_i - f = \frac{(z - f) \cdot f^2}{(z - f)^2 + z_{R0}^2} = \frac{(z - f) \cdot f^2}{(z - f)^2 + z} . \quad (9)$$

Um den Laserstrahl von der Strahlquelle an den Ort der Bearbeitung zu transportieren und dort entsprechend den Anforderungen der Materialbearbeitung zu formen, sind optische Bauelemente notwendig, die sich je nach zu überwindender Wegstrecke, Laserart und Bearbeitungsaufgabe unterscheiden, die Strahlung beeinflussen bzw. verändern und unterschiedlich komplex in ihrer Gestaltung sein können.

2.1.2.1 Reflektierende Optiken zur Strahlführung und Strahlformung

Bei Hochleistungslasern erfolgt die Strahlführung frei propagierender Strahlung häufig über Spiegeloptiken.

Für CO₂-Laser (10600 nm) werden dazu Metallspiegel eingesetzt. Der Werkstoff Kupfer hat sich aufgrund seiner hohen Reflektivität und seiner guten Wärmeabfuhr in diesen Bereichen durchgesetzt. Zur Steigerung des Reflexionsgrades und zur Vermeidung der Oxidation werden diese Spiegel noch zusätzlich mit einer hochreflektierenden Goldschicht bedampft. Die optische Fläche ist bei gewöhnlichen Umlenkspiegeln plan, beim Einsatz in Teleskopen zur Strahlaufweitung hat die Oberfläche eine konkave bzw. konvexe Form. Bei Bearbeitungsoptiken ist die Oberfläche des fokussierenden Spiegels meist paraboloid.

Bei der Führung von Nd:YAG-Strahlung (1064 nm) werden Spiegel aus Glassubstraten wie z.B. aus Quarzglas oder Bor-Silicaten (BK7) verwendet. Die Oberflächen der Glassubstrate müssen dazu mit einer oder mehreren dielektrischen Schichten bedampft werden, da sie bei der Wellenlänge der Nd:YAG-Strahlung transmittierend wirken. In Teleskopen und Fokussieroptiken werden bei Nd:YAG-Lasern transmittierende Opti-

ken verwendet. Bei größeren Entfernungen werden zum Transport der Strahlung Glasfasern eingesetzt (siehe Kapitel 2.1.2.3).

Da die reflektierenden Optiken einen minimalen Bruchteil der Laserleistung an der Oberfläche absorbieren und sich dadurch erwärmen, müssen sie bei hohen Laserleistungen gekühlt werden, um der Änderung ihrer optischen Eigenschaften durch thermische Deformation entgegenzuwirken. Die Kühlung kann passiv über Wärmeleitung oder aktiv über ein Kühlmedium an der Rückfläche der Spiegel erfolgen. Auf eine gleichmäßige Wärmeabfuhr ist zu achten, um auch hier eine Änderung der optisch wirksamen Spiegeloberfläche durch zu hohe Temperaturgradienten zu verhindern. Die Problematik der Deformation ist ebenfalls bei der konstruktiven Auslegung von Spiegelhalterungen zu beachten [16], [17].

2.1.2.2 Transmittierende Optiken zur Strahlformung

Für die im Infraroten liegende Strahlung der CO₂-Laser zeigen Glassubstrate (Isolatoren) einen hohen Absorptionsgrad und können deshalb nicht verwendet werden [8]. Spezielle Materialien wie Zinkselenid (ZnSe), Kaliumchlorid (KCl) und Galliumarsenid (GaAs) sind für diesen Wellenlängenbereich durchsichtig und werden für transmittierende Optiken verwendet.

Bei Festkörperlaser sind, wie bereits erwähnt, Linsen aus Quarzglas und BK7 für Fokussieroptiken einsetzbar. Zur Reduzierung der Reflexionsverluste an den Grenzflächen werden die Fokussierlinsen mit speziellen Antireflex-Coatings behandelt.

Ein entscheidender Nachteil bei transmittiven Optiken ist die Kühlung durch Flüssigkeiten. Da diese nur am äußeren Rand eingesetzt werden können, kann es durch die Absorption von Laserstrahlung zur Ausbildung eines Temperaturgradienten im optischen Element und damit zur Veränderung seiner optischen Eigenschaften kommen.

2.1.2.3 Hohlleiter und Glasfasern

Eine weitere Möglichkeit der Strahlführung sind Lichtwellenleiter wie z.B. innen verspiegelte Hohlleiter und Glasfasern. Die Übertragung durch Lichtwellenleiter bringt zwar eine Verschlechterung der Strahlqualität mit sich, sie benötigt aber wenig Bau- raum in radialer Richtung. Die Strahlführung in flexiblen Glasfasern ist in der Praxis vielseitig und kostengünstig einsetzbar. Die Glasfasern sind fertig konfektioniert mit Ein- und Auskoppeloptiken erhältlich und für Laser im Wellenlängenbereich von ca. 400 nm bis ca. 2000 nm einsetzbar.

Hohlleiter, die auch CO₂-Laserstrahlung verlustarm transportieren können sind bei der

Laserstrahlführung noch nicht Stand der Technik. Den bekannten Glasfasern entsprechen Hohlleiter mit Kreisquerschnitt [18], [19] die im allgemeinen als starres, innen verspiegeltes Röhrchen ausgeführt sind. Ein flexibles System für CO₂- und CO-Laser wird in [20] vorgestellt. Effektiver ist es, linear polarisiertes Laserlicht zwischen zwei Flächen zu führen, wobei der E-Feld-Vektor parallel und der M-Feld-Vektor senkrecht zu den Platten schwingt [21]. In [21] wurde nach diesem Prinzip ein flexibler Hohlleiter aus zwei parallelen, goldbeschichteten Federstahlbändern aufgebaut. Die am Markt existierenden Hohlleitersysteme [22], [23] erlauben eine Strahlführung über eine Strecke von 1-3 m, jedoch verhindern hohe Leistungsverluste, sowie die starke Verschlechterung der Strahlqualität und ein zu hoher Preis die Anwendbarkeit in der Industrie.

Da bei der Laserintegration in Werkzeugmaschinen eine flexible, platzsparende, einfache und kostengünstige Laserstrahlführung besonders wichtig ist, werden im folgenden Quarzglasfasern näher betrachtet.

Quarzglasfasern zur Leistungsübertragung bestehen aus einem Faserkern (Core), dem Mantel (Cladding) und der Schutzhülle (Coating). Zum Schutz gegen mechanische Beschädigung im industriellen Einsatz und zur Überwachung von seitlichem Strahlaustritt (z.B. bei Faserbruch) sind die Fasern mit einer weiteren Ummantelung umgeben. Für den cw-Hochleistungsbereich bis derzeit 5 kW stehen Fasern mit einem Durchmesser von 600 µm zur Verfügung. Im unteren Leistungsbereich von 50 W bis ca. 200 W werden Faserdurchmesser von 200 µm bis 400 µm verwendet. Es zeichnet sich der Trend zu noch kleineren Faserdurchmessern bei noch höherer Leistung ab [24].

Das Prinzip der Lichtführung in Glasfasern beruht auf der Totalreflektion an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Trifft ein Lichtstrahl aus einem Medium (hier Kern) an die Grenzfläche zu einem Medium mit geringerer Brechzahl (hier Mantel), so wird der Strahl bis zum sogenannten Grenzwinkel der Totalreflektion reflektiert. Bei größeren Winkeln als dem Grenzwinkel der Totalreflektion tritt der Strahl in den Mantel ein und kann die Faser zerstören. Die Brechzahl des Mantels ist dabei etwa 1 % kleiner als die des Kerns und wird durch die unterschiedliche Dotierung des Quarzglases erreicht. Je nach radialem Verlauf des Übergangs zwischen diesen Brechungsindizes unterscheidet man zwischen Stufenindexfasern und Gradientenindexfasern (Bild 2).

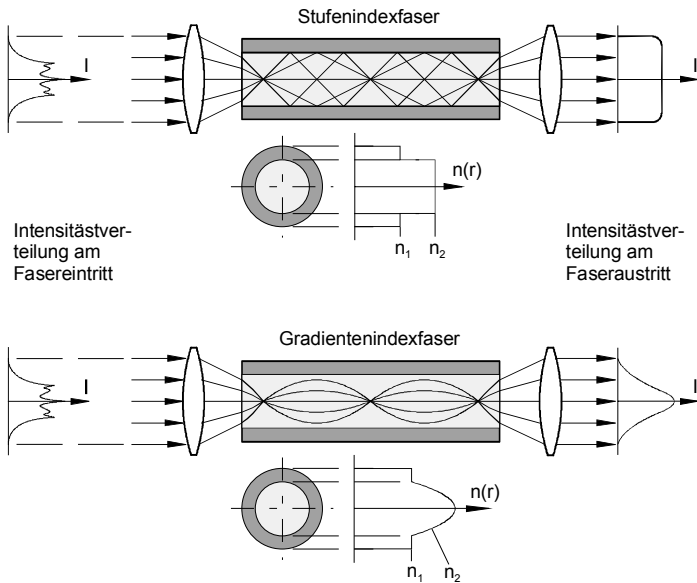


Bild 2: Laserstrahlübertragung mittels Stufenindex- und Gradientenindexfaser (prinzipielle Darstellung).

Bei einer Stufenindexfaser ist der Brechungsindex über den Kerndurchmesser konstant und fällt zum Cladding hin sprunghaft ab. In der Grenzschicht wird der Strahl durch Totalreflexion geführt. Bei der Gradientenindexfaser nimmt der Brechungsindex vom Außendurchmesser des Kerns zum maximalen Wert im Fasermittelpunkt radialsymmetrisch kontinuierlich zu. Die Strahlung wird dadurch kontinuierlich zum Fasermittelpunkt hin gebrochen und dabei mehr in der Fasermittelpunkt konzentriert [25], [26].

Bei der Einkopplung wird der Laserstrahl auf die Faserfläche fokussiert, beim Austritt wird die Faserendfläche mit der Bearbeitungsoptik auf die Werkstückoberfläche abgebildet. Die Eigenschaften des Laserstrahles (Polarisation, Divergenz, Intensitätsverteilung) werden beim Durchgang durch die Glasfaser entscheidend verändert. Ein willkürliches Intensitätsprofil wird homogenisiert und am Ende einer Stufenindexfaser zu einem flachen und breiten Profil, (Flat-Top), während bei einer Gradientenindexfaser ein Profil mit eher gaußförmigem Charakter entsteht [26]. In beiden Fällen ist eine vorherige gerichtete Polarisation des Laserstrahls in der Regel völlig aufgehoben.

Die Beschreibung der geometrischen Verhältnisse bei der Einkopplung der Laserstrahlung in eine Stufenindexfaser ist in Bild 3 dargestellt. Damit es an der Grenzschicht von Kern (Brechungsindex n_1) und Mantel (Brechungsindex n_2) zu einer Total-

reflexion kommt, muß die Einkopplung innerhalb eines gewissen Grenzwinkels α_{\max} erfolgen. Dieser Grenzwinkel, auch Akzeptanzwinkel genannt, wird nach [27] als numerisch Apertur NA bezeichnet.

$$NA = \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} . \quad (10)$$

Dieser Wert verringert sich bei einer Biegung der Glasfaser [27] in Abhängigkeit des Biegeradius R bei konstantem Kerndurchmesser d_K zu

$$NA = \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cdot \left(1 + \frac{d_K}{2 \cdot R}\right)^2} . \quad (11)$$

Bei kleinen Biegeradien und großen Kerndurchmessern vergrößert sich die Gefahr eines seitlichen Strahlaustritts. Zudem verringert sich bei kleinen Biegeradien die Strahlqualität, so daß bei den im Hochleistungsbereich verwendeten Fasern mit einem Faserdurchmesser von 600 μm Mindestbiegeradien von ca. 300 mm vorgeschrieben werden.

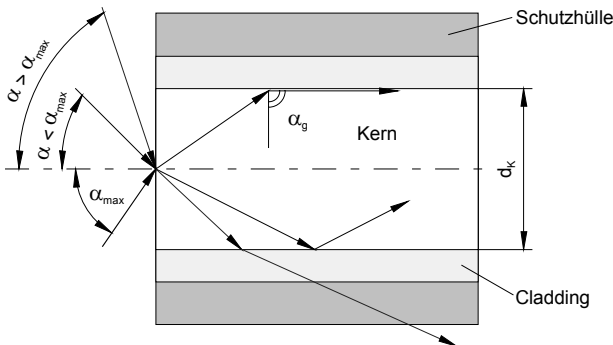


Bild 3: Geometrische Bedingungen der Totalreflexion in einer Stufenindexfaser.

Für die Einkopplung des Laserstrahles in eine Glasfaser müssen demnach 3 Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Akzeptanzqualität der Faser, beschrieben durch die numerische Apertur und den Faserdurchmesser, muß größer als das Strahlparameterprodukt des einzukoppelnden Strahles sein (Gl. (12)):

$$NA \cdot \frac{d_K}{2} \geq \Theta_e \cdot w_e . \quad (12)$$

2. Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahles muß kleiner sein als der Grenzwinkel der Totalreflektion:

$$\alpha_{\max} \geq \Theta_e . \quad (13)$$

3. Der Faserdurchmesser muß größer als der Strahldurchmesser sein (Gl. (14)):

$$d_K \geq 2 \cdot w_e . \quad (14)$$

In der Praxis wird unter Berücksichtigung von Montagetoleranzen, Fertigungstoleranzen der optischen und mechanischen Bauteile und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der Laserstrahl nicht scharf begrenzt ist (siehe Kapitel 2.1.1) ein maximaler Wert des Fokusdurchmesser von 70-80 % des Kerndurchmessers nicht überschritten [28]. Dadurch wird auch die Entstehung von Mantelmoden, die eine Zerstörung der Glasfaser bedeuten würden, verhindert.

Mit Bedingung (14) wird für die Einkoppeloptik gleichzeitig die maximale mögliche Brennweite f_{\max} festgelegt, die von der Linse nicht überschritten werden darf. Die Forderung (13) bestimmt die minimal einzuhaltende Einkoppelbrennweite f_{\min} . Dies bedeutet, daß die Auswahl in beide Richtungen begrenzt wird. Nach [28] kann die Brennweite der Einkoppeloptik bei Erfüllung der Bedingung (12) berechnet werden zu

$$f \approx 0,35 \dots 0,4 \cdot \frac{d_K}{\Theta_e} . \quad (15)$$

2.1.3 Hochleistungslaser für die Materialbearbeitung

Das Haupteinsatzgebiet von Hochleistungslasern in der Fertigungstechnik liegt bislang in der Verarbeitung von Metallen. In diesem Bereich werden vor allem CO₂-Laser, Nd:YAG-Laser und in neuester Zeit auch Hochleistungsdiodenlaser für die Materialbearbeitung eingesetzt. In Anwendungen wie der Mikrobearbeitung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen oder dem Fügen von Kunststoffen erhält der Laser ebenfalls immer stärkere Akzeptanz. Nicht zuletzt bestimmen jedoch das Bearbeitungsverfahren, das Einsatzgebiet und der zu bearbeitende Werkstoff die erforderliche Laserleistung und den zu verwendenden Lasertyp.

2.1.3.1 CO₂-Laser

Der größte Anteil der in der Lasermaterialbearbeitung im Bereich des Schweißens und Schneidens metallischer Werkstoffe eingesetzten Laser sind CO₂-Laser. Die Anwendungen reichen von der Bearbeitung von Dünnblechen mit Leistungen von ungefähr 0,5 kW bis hin zur Bearbeitung vom Grobblech mit Laseraggregaten von 20 kW Leistung. Leistungen von bis zu 50 kW sind bislang nur bei einigen Laborgeräten vorhanden.

Abhängig von Hersteller und Leistungsbereich unterscheiden sich die CO₂-Laser in der Art der elektrischen Anregung des Gasgemisches aus Helium, Stickstoff und Kohlendioxid (Gleichstrom- oder Hochfrequenzanregung - 13,6 MHz), der Kühlung des laseraktiven Mediums (Diffusions- oder Konvektionskühlung) sowie der technischen Konzeption des Resonators (längs- oder quergeströmter Resonator) [8]. Die jeweilige konstruktive Umsetzung spiegelt sich in der Strahlqualität und dem Wirkungsgrad wieder. Ebenso werden die Baugröße und nicht zuletzt auch die Betriebskosten (notwendige Wartungsintervalle) davon beeinflusst. Die Betriebsmodi von CO₂-Laser sind entweder cw-Betrieb oder gepulste Betriebsweise.

Die wichtigsten Vorteile der CO₂-Laser liegen in einer relativ einfachen konstruktiven Gestaltung und Bauweise, hoher Strahlqualität bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad und hoher Leistung. Dadurch kann der CO₂-Laser weiterhin seine Stellung behaupten, vor allem dann, wenn mehrere dieser Eigenschaften zugleich gefordert sind [29].

2.1.3.2 Festkörperlaser

Auf dem Gebiet der industriellen Lasermaterialbearbeitung hat sich bei den Festkörperlasern derzeit der Nd:YAG-Laser durchgesetzt. Das laseraktive Medium besteht aus einem dotierten Kristall mit zylindrischer (Stab) oder prismatischer (SLAB) Geometrie (letztere hat sich aus Kostengründen nicht durchgesetzt). Die Anregungsenergie wird dem Kristall durch Blitz- oder Bogenlampen in einem reflektierenden doppelelliptischen Zylinder, (Kavität genannt), zugeführt. Begrenzt durch die thermische Belastung können pro Stab maximal bis zu 750 W Strahlleistung bei einer Strahlqualität von 25 mm-mrad emittiert werden. Unter Beibehaltung der Strahlqualität wird durch Hintereinanderschaltung mehrerer Kavitäten als Oszillator- oder Verstärkeranordnung die Ausgangsleistung linear mit der Anzahl der Stäbe auf über 6 kW gesteigert [30].

Bei mit Blitzlampen angeregten Nd:YAG-Lasern werden Pulsrepetitionraten bis zu 1 kHz erreicht; die typischen Pulsdauern liegen zwischen 0,1 und 20 ms. Derzeit wird bei gepulsten Systemen eine mittlere Leistung von bis zu 1 kW erreicht. Die Pulsspitzenleistung kann je nach Auslegung des Systems bis zu 50 kW betragen. Die Abhän-

gigkeit der Pulsleistung, der mittleren Leistung und der Pulsenergien von der Pulsrepetitionsrate und der Pulsdauer sind in [31] und [32] ausführlich diskutiert. Die Einsatzgebiete für blitzlampengepumpte Systeme sind in der Hauptsache Punktschweißen, Bohren, Abtragen, Feinschweißen, Bahnschweißen von Dünnblechen und Feinschneiden mit hoher Präzision sowie und die Bereiche niedriger Wärmebelastbarkeit.

Bei mit Bogenlampen angeregten Kristallen wird cw-Leistung emittiert. Die Änderung der Laserleistung (zwischen 5 % und 100 % der Nennleistung) erfolgt direkt über die Steuerung der Lampenleistung. Durch die Verfügbarkeit von hohen Leistungen bis zu 6 kW können diese Systeme zum Bahnschweißen und Schneiden eingesetzt werden [33].

Erhebliche Fortschritte sind für Festkörperlaser dieser Leistungsklasse bereits heute schon durch den Einsatz von Laserdioden als Pumplichtquelle zu verzeichnen. Der kontinuierliche Preistrückgang von Hochleistungslaserdioden erlaubt deren wirtschaftlichen Einsatz anstelle der bisher verwendeten Bogenlampen. Durch den deutlich höheren optisch-elektrischen Wirkungsgrad der Laserdioden wird der Gesamtwirkungsgrad um den Faktor 3 gegenüber Bogenlampen (von derzeit 4 % auf 12 %) gesteigert und ist mit dem des CO₂-Lasers vergleichbar [7]. Durch die spektrale Abstimmung der Pumpwellenlänge auf die Absorption des Kristalls wird im wesentlichen nur die Differenzenergie zur Laserwellenlänge in Wärme umgesetzt und folglich die Entstehung einer thermischen Linse reduziert. Dies wirkt sich in einer besseren Strahlqualität und somit besseren Fokussierbarkeit aus. Bei einer Ausgangsleistung von 4,4 kW wird ein Strahlparameterprodukt von 12 mm·rad erzielt (Faktor 2 gegenüber lampengepumptem Nd:YAG). Gleichzeitig ist mit dem Einsatz der langlebigen Laserdioden (> 15000 Stunden) eine deutliche Verringerung des Wartungsaufwandes zu erzielen [34].

Eine neue Generation der Festkörperlaser sind *Scheibenlaser*. Der Einsatz neuer laseraktiver Materialien, hier Ytterbium-YAG-Kristalle (Yb:YAG), verbunden mit den neuen hocheffizienten Pumplichtquellen, neuer Geometrie und einem an Material und Pumplichtquelle angepassten Design ist vielversprechend [35]. Der Scheibenlaser ist durch einen im Verhältnis zu seinem Durchmesser ($\varnothing = 10$ mm) relativ dünnen Kristall (wenige zehntel Millimeter) gekennzeichnet. Dieser wird zugleich im Resonator als aktiver Spiegel eingesetzt. Die Pumplichtquellen ermöglichen eine neue Pumplichtformung und -führung im Vergleich zu bisherigen Systemen. Über die Anzahl der Kristallscheiben läßt sich die Leistung nahezu beliebig skalieren [36].

Das Konzept stellt aufgrund der flächig axial gekühlten Kristallscheibe mit optimaler Wärmeabfuhr ein skalierbares Design dar. Damit wird die Erzielung hoher Laserleistungen bei gleichzeitig hoher Strahlqualität ($M^2 \approx 10$) und hohem Laserwirkungsgrad

($\eta_L \approx 40\%$) ermöglicht [37]. Die Strahlqualität wurde gegenüber dem diodengepumpten Stabsystem um Faktor 4, und damit auf 3 mm-mrad gesteigert. Die Einkopplung einer Strahlleistung von 1 kW in eine Quarzfaser von 100 μm Kerndurchmesser ist somit möglich und bereits industriell realisiert worden [38]. Im Vergleich dazu ist bei einem Nd:YAG-Laser gleicher Leistung eine Faser mit einem Kerndurchmesser von mindestens 300 μm notwendig. Diese neuen Systeme wurden bereits auf der "LASER '99" vorgestellt und werden in Kürze auf dem Markt erhältlich sein. Theoretisch kann die Leistung von sieben 1-kW-Modulen auf einer Fläche zusammengefaßt werden, die einer 300- μm -Faser entspricht. Mit einer heute gebräuchlichen 600- μm -Faser könnte ein Lasersystem von über 19 kW realisiert werden [39].

Durch die erhöhte Prozeßeffizienz aufgrund der im Vergleich zu 10,6 μm meist besseren Absorption der 1,06- μm -Laserstrahlung in metallischen Werkstoffen [40], der Möglichkeit einer fasergeführten Strahlübertragung – und somit vieler anlagentechnisch interessanten Integrationsmöglichkeiten – steht der cw-Nd:YAG-Laser trotz höherer Betriebskosten in direkter Konkurrenz zum CO_2 -Laser.

2.1.3.3 Hochleistungs-Diodenlaser

Mit dem Beginn der Entwicklung von Laserdioden waren diese für die Kommunikationstechnik [41] und als Pumplichtquelle für Festkörperlaser (Yb:YAG und Nd:YAG) bestimmt. Entsprechend der Absorptionspeaks von Yb:YAG bei 808,8 nm und von Nd:YAG bei 940 nm wurden die Laserdioden durch die entsprechende Auswahl bzw. Paarung von Halbleitermaterialien (GaAs/GaAlAs für 808 nm und GaAs/InGaAs für 940 nm) entwickelt. Aus diesem Grund emittieren die heute zur Verfügung stehenden Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) fast ausschließlich bei diesen Wellenlängen. Wurden früher aufgrund der höheren Lebensdauer Laserdioden mit 940 nm Wellenlänge entwickelt, geht heute der Trend in Richtung 808 nm, da diese Wellenlänge besser auf den Oberflächen metallischer Werkstoffe absorbiert wird [42]. Durch die Auswahl neuer Halbleiterwerkstoffe (InGaAsP) konnte die bestehende Aluminiumproblematik bei 808 nm emittierenden Dioden gelöst und die Lebensdauer erheblich gesteigert werden [43].

Die Vorteile von Hochleistungsdiodenlasern gegenüber Festkörperlasern und Gaslasern sind neben dem bereits erwähnten erhöhten Absorptionsgrad

- ein deutlich höherer optisch-elektrischer Wirkungsgrad von über 30%,
- ein stark reduziertes Bauvolumen (bis zu 100-fach kleiner),
- die Möglichkeit der räumlichen und zeitlichen Variation des Strahlprofiles

durch Steuerung und Regelung der Leistung der Einzeldioden,

- die gute Modulierbarkeit der Laserdioden (Variation von Pulsfrequenz und -form) über den Treiberstrom,
- die geringen Wartungskosten sowie die hohe Lebensdauer.

Die Nachteile von Diodenlasern gegenüber herkömmlichen Lasern ist der mit starker Divergenz und asymmetrischer Abstrahlcharakteristik austretende Strahl. Dies liegt sowohl im Aufbau des Diodenlasers selbst als auch in den geometrischen Abmaßen des Einzelemitters begründet. Aus einer Emitterfläche von $1\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m}$ tritt der Laserstrahl mit einer Leistung von derzeit bis zu 100 mW beugungsbegrenzt ($M^2 \approx 1$) in Richtung der kleineren Abmessung (Fast-Axis) mit einem Divergenzwinkel von 90° (Vollwinkel) aus. In senkrechter Richtung dazu, der Slow-Axis, beträgt der Divergenzwinkel $10^\circ - 12^\circ$. Trotz der unmittelbar vor der Emitterfläche herrschenden hohen Intensität von mehr als $3 \cdot 10^6\text{ W/cm}^2$ ist die Strahlleistung des Einzelemitters für den direkten Einsatz in der Lasermaterialbearbeitung zu gering. Zur Leistungssteigerung werden dazu mehrere Einzelemitter zu Einzelstreifen und diese wiederum zu Diodenbarren in Richtung der Slow-Axis-Ebene nebeneinandergelegt. Auf einer 10 mm breiten Emitterlinie stehen in Verbindung mit einer hocheffizienten Mikrokanalkühlung bis zu 170 W zur Verfügung [44]. Allerdings steigt die Beugungsmaßzahl M^2 parallel zur Emitterlinie des Barrens auf Werte größer 1000 an. Die Diodenbarren sind die Grundelemente der heute auf dem Markt befindlichen Hochleistungsdiodenlaser (HLDL).

Für den direkten Einsatz in der Materialbearbeitung reicht die mit solchen Strahlquellen erzielbare Intensität auf dem Werkstück jedoch in aller Regel nicht aus [45]. Die Strahlbündel mehrere Diodenbarren werden daher optisch so überlagert, daß bei Beibehaltung der Strahlqualität eine Zunahme der Leistung erfolgt. Bei einer Verschlechterung der Strahlqualität hätte dies primär lediglich die Steigerung der mittleren Leistung, nicht aber der notwendigen Erhöhung der Intensität zur Folge. Die beiden unterschiedlichen Konzeptionen derzeitiger Hochleistungsdiodenlaser sind:

- die Stapelung einzelner Barren zu Diodenstacks,
- die räumliche Anordnung einzelner Barren und die Überlagerung von deren Einzelstrahlen zu einem Gesamtstrahl.

Das **Stack-Konzept** ist die einfachste und am häufigsten eingesetzte Art der weiteren Leistungsskalierung. Es besteht in der Stapelung einzelner Diodenbarren zu sogenannten Diodenstacks in Richtung der Fast-Axis. Der Abstand der einzelnen Emitterlinien zueinander beträgt 1,5 mm. Um eine Durchmischung der Strahlen der einzelnen

Barren zu vermeiden, wird die Strahlung eines jeden Barrens individuell in Fast-Axis-Richtung mit einer mikrooptischen Zylinderlinse kollimiert. Aufgrund der starken Fast-Axis-Divergenz sind hierzu Optiken mit sehr kleinen Brennweiten und optische Materialien hoher Brechkraft notwendig. Über eine weitere gemeinsame Zylinderlinse werden die Einzelstrahlen in Slow-Axis-Richtung kollimiert und dann mit einer gemeinsamen sphärischen Linse fokussiert. Die Größe des Fokus in der Brennebene wird, außer den üblichen Parametern der Optik, maßgeblich von der Packungsdichte der Barren und Güte der Fast-Axis-Kollimation beeinflusst. Bedingt durch ihren systemtechnischen Aufbau weisen Stacklaser eine geringe Strahlqualität auf. Um eine thermische Zerstörung der Laserdioden zu verhindern, ist bei diesem Konzept aufgrund der hohen Packungsdichte der HLDL-Barren eine hocheffiziente Kühltechnik zur Abfuhr der Verlustwärme notwendig. Mit einer derzeit maximalen Leistung von 6 kW stellt dieses technische Konzept die leistungstärkste Klasse unter den Diodenlasern dar [46], [47]. Im Hinblick auf maximale Intensitäten in der Fokussierebene werden diese Laser hauptsächlich im Freistrahl eingesetzt. Der Laserkopf wird dazu direkt in der Maschine bzw. direkt an der Handhabungseinrichtung befestigt. Seit einiger Zeit sind auch fasergekoppelte Systeme mit Leistungen bis 2 kW aus einer 1,5 mm dicken Quarzfaser ($NA = 0,37$) [48] bzw. mit 1000 W Leistung aus einer 0,6 mm dicken Faser ($NA = 0,2$) [47] am Werkstück erhältlich.

Das **IBS-Konzept** (IBS = Integrated Beam Shaping) unterscheidet sich nicht nur in der Anordnung der Barren, sondern bereits auch im Aufbau der Barrens selbst vom Konzept des Stacklasers. Im Gegensatz zum Barren des Stacklasers sind die Emittoren nicht gleichmäßig über die gesamte Barrenbreite angeordnet, sondern in einzelne Bereiche unterteilt. Die emittierenden Zonen sind etwa 0,5 mm breit und haben einen Abstand von ungefähr 1,5 mm voneinander. Durch die Segmentierung der Emittorlinie in Einzelzonen ist eine individuelle Anpassung der Strahlformung für jeden der Bereiche mit Mikrooptiken möglich. Das zentrale Bauelement beim IBS-Konzept bildet der filigrane Spiegelkamm, um den die Diodenbarren angeordnet sind. Nach der Fast-Axis-Kollimation mit einer gemeinsamen Zylinderlinse wird jedes Strahlenbündel eines Emittorbereiches separat um die Achse seiner Strahlrichtung mit einem Strahldrehprisma um 90° gedreht. Die Strahlenbündel liegen jetzt in Fast-Axis-Richtung mit größerem Abstand nebeneinander. Mit Hilfe des Spiegelkammes werden die einzelnen Streifen der drei Barren alternierend ineinander projiziert. Mit einer gemeinsamen Zylinderlinse wird die Slow-Axis des gesamten Strahlpaketes kollimiert und dann mittels des Objektivs fokussiert. Der Strahl des IBS-Lasers ist bezüglich Geometrie und Divergenz ähnlich dem des Stacklasers, hat jedoch durch die Aufteilung in Einzelemittoren eine um nahezu den Faktor 20 bessere Strahlqualität in Slow-Axis-Richtung. Durch die 3D-Anordnung der Barren kann die Verlustwärme im Gegensatz zu den Stackkonzepten wesentlich effizienter abgeführt werden, so daß der zukünftige Einsatz neuer

Barren mit höherer Leistung keine Nachteile hervorrufen wird. Diodenlaser mit IBS-Design sind derzeit mit einer Leistung von 150 W erhältlich. Bei den leistungsstärksten IBS-Lasern werden mit einer 55 mm Fokussieroptik Fokussdurchmesser von $0,21 \times 0,46 \text{ mm}^2$ und Intensitäten von mehreren 10^5 W erreicht [49]. IBS-Systeme werden aufgrund ihrer hohen Strahlqualität überwiegend in Freistrahntechnik eingesetzt, eine Einkopplung in Glasfasern ist jedoch möglich.

HLDL-Systeme sind zwar wesentlich kompakter als Festkörper- und Gaslaser, sind jedoch für den direkten Einsatz in Werkzeugmaschinen aufgrund der bei der Zerspaltung von Werkstoffen entstehenden Spritzer, Dämpfe, Stäube, etc. ungeeignet. Zugleich wird der Arbeitsraum durch den Laserkopf und die notwendigen elektrischen und hydraulischen Versorgungsleitungen deutlich eingeschränkt. Die einfache Strahlführung in Glasfasern bietet wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, gegenüber der Freistrahpropagation auch bei Diodenlasern entscheidende Vorteile, vor allem dann, wenn diese in Werkzeugmaschinen integriert werden müssen und zudem ein symmetrischer Strahlquerschnitt bzw. symmetrischer Fokus für eine richtungsunabhängige Materialbearbeitung notwendig ist.

Der Aufbau **fasergekoppelter HLDL** läßt sich mit den oben beschriebenen Systemen realisieren. Die Problematik liegt jedoch in der Ausdehnung des Emitters in Slow-Axis-Richtung. Die verschiedenen Ansätze sind vielschichtig [50], [51], wobei das Ziel der unterschiedlichen Konzepte immer in der verlustarmen Einkopplung sowie in der möglichst geringen Beeinträchtigung der Strahlqualität bestehen wird. Derzeit werden die Konzepte *Treppenspiegel*, *Faserbündel* und *Integrator-Chip* erfolgreich eingesetzt.

Beim **Faserbündel** wird die Segmentierung nach der Fast-Axis-Kollimation durch eine Anzahl von mikrooptischen Keilprismen vorgenommen. Jeder Lichtleitkeil koppelt die Strahlung in eine separate Faser ein. Die einzelnen Faser werden zu einem Faserbündel zusammengefaßt und die Strahlung über eine gemeinsame Bearbeitungsoptik fokussiert [52].

Beim System **Treppenspiegel** wird die Emitterlinie durch zwei Spiegelsysteme segmentiert und die Lage der Segmente in ihrer Lage umorientiert so daß danach die einzelnen Strahlsegmente in Fast-Axis-Richtung nebeneinander liegen. Die Einkopplung in die Glasfaser erfolgt über eine gemeinsame Fokussieroptik [53], [54].

Das Prinzip des **Integrator-Chips** entspricht weitgehend dem IBS-Konzept, mit dem Unterschied einer wesentlich feineren Segmentierung der Emitterlinie und einer dementsprechenden besseren Strahlqualität. Realisiert ist die Übertragung einer Strahlleistung von 25 W in einer Faser mit 0,2 mm Durchmesser und einer numerischen Apertur von 0,22 [55], [56].

Im Vergleich zu CO₂- und Festkörperlaser-Systemen ist die Strahlqualität (Strahlparameterprodukt) der Diodenlaser um 1-2 Größenordnungen schlechter. Dies liegt im mechanischen Aufbau des Lasers und in den physikalischen Gegebenheiten begründet. Der Strahl eines Diodenlasers besteht aus der Überlagerung vieler inkohärenter Einzelstrahlen, während der Strahl herkömmlicher Systeme aus nur einem Strahl besteht. Bei der Addition der Einzelstrahlen wird nicht nur die Strahlleistung, sondern auch das Strahlparameterprodukt addiert [57]. Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität sind zwingend notwendig, um mit den bisherigen Lasersystemen im Bereich höherer Intensitäten konkurrieren zu können [58].

2.1.3.4 Lasersysteme im Vergleich

Die Akzeptanz von Festkörperlasern neben CO₂-Lasern in der industriellen Fertigung wurde vor allem durch den Vorteil des einfachen Strahl-Handlings über Glasfasern verstärkt. Die Entwicklung in den letzten 3-4 Jahren ergänzte die Baureihe der lampegepumpten Festkörperlaser um diodengepumpte Stab-Systeme mit dem Ergebnis einer Vervierfachung des optisch-elektrischen Wirkungsgrades (12 %) und einer Verdopplung der Strahlqualität (12 mm-mrad) bei nahezu gleicher Strahlleistung (4 kW). Die neueste Entwicklung bei Festkörperlasern stellen die Scheibenlaser dar, die seit kurzem auf dem Markt erhältlich sind.

Ein neues Konzept für die Lasermaterialbearbeitung stellen die Diodenlaser dar. Hier werden eindeutige Verbesserungen im optisch-elektrischen Wirkungsgrad sowie in der Wartungsfreiheit des Systems erreicht. Hinsichtlich der derzeit maximal erzielbaren Leistung sind sie vergleichbar mit Nd:YAG-Lasern, beim Vergleich der Strahlqualität liegen sie jedoch um 1 bis 2 Größenordnungen über der von CO₂- und Festkörperlasern. Der Einsatz bleibt daher bislang auf die Applikationen beschränkt, die an niedrige Intensitäten, wie z.B. das Wärmeleitungsschweißen und die Verfahren der Oberflächenbehandlung gekoppelt sind, vor allem dann, wenn Glasfasern zur Strahlführung für den erfolgreichen Einsatz der Lasertechnik in Werkzeugmaschinen notwendig werden.

Eine Auflistung der Eigenschaften von heutigen Systemen ist in Tabelle 1 dargestellt, und einen qualitativen Vergleich der verschiedenen Lasersysteme zeigt das Strahlqualitäts-Leistungsdiagramm in Bild 4. Weiterhin sind dort die Parameterfenster der an hohe Intensitäten gekoppelten Applikationen wie das Tiefschweißen und Schneiden eingetragen. Das Ziel der zukünftigen Laserentwicklungen wird dabei in Richtung des die Zunahme der Intensität beschreibenden Pfeiles gehen, um hohe Leistungen bei maximaler Strahlqualität zu erreichen.

		Wellenlänge [nm]	Wirkungsgrad [%]	max Leistung [kW]	max Intensität [W/cm ²]	Strahlparameterprodukt [mm-mrad]	Strahlführung	Strahlformung	Wartungsintervall [h]	Größe Laserkopf [cm ² /W]	Preis/ Watt [DM]
	CO ₂	10600	12	20	3·10 ⁷	12	Spiegel, Hohlleiter bis 500W	Spiegel, spezial Gläser	10000	1000	70
FKL	Stab: l, p	1064	2-5	50	10 ⁸		Spiegel Glasfaser	Linsen aus Quarz- glas, BK7	200	500	100
	Stab: l, cw			6	8·10 ⁶	25			200		
	Stab: d, cw		12	4,4	2·10 ⁷	12			k. A.	100	k. A.
	Scheibe		25	1-19	2·10 ⁹	3-20			k. A.	20	100
HLDL	Stack	808/ 940	20-35	6	8·10 ⁴	85x400			10000	100	400
	IBS			0,2	2·10 ⁵	30x60					

Tabelle 1: Eigenschaften verschiedener heutiger Lasersysteme

(l=lampengepumpt; d=diodengepumpt; p=gepulst; cw=continous wave;
k. A.=zum heutigen Zeitpunkt noch keine Aussagen verfügbar).

Der erfolgreiche Einsatz eines Lasersystems ist dann gegeben, wenn Strahlqualität und Laserleistung der jeweiligen Applikation angepaßt sind und gleichzeitig eine hohe Wirtschaftlichkeit gegeben ist. In der Kostenbetrachtung dürfen dabei nicht nur der Invest und die laufenden Kosten eingerechnet, sondern es muß auch die Zuverlässigkeit des Lasersystems betrachtet werden. Ebenfalls sollte der Aufwand des Strahl-Handlings (Strahlführung vom Laseraggregat zur Maschine) in die Überlegungen mit einbezogen werden. Nur eine differenzierte Betrachtung unter Berücksichtigung dieser Faktoren, bezogen auf die jeweilige Applikation, kann eine Aussage über die Verwendung eines bestimmten Lasersystems treffen.

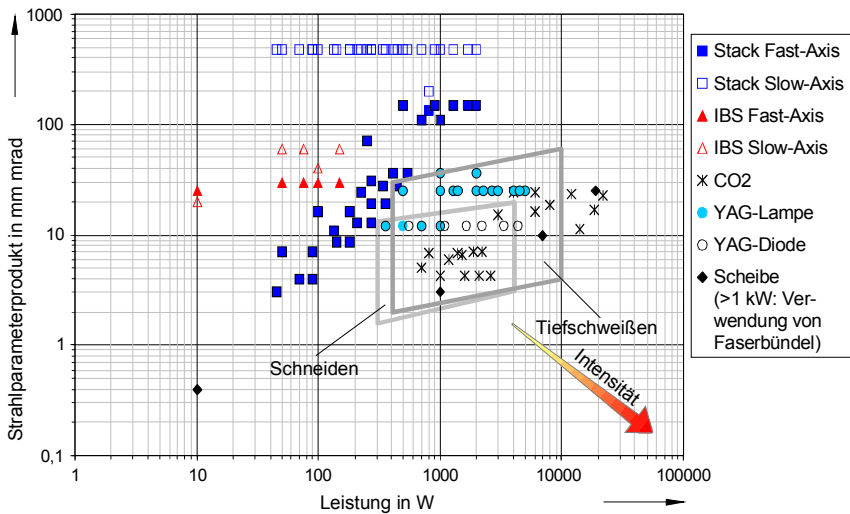


Bild 4: Strahlqualitäts-Leistungsdiagramm heutiger verfügbarer Systeme.

2.2 Laserverfahren in Werkzeugmaschinen

Mit dem Entwicklungsstand der heutigen Laser sind aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften alle die in der Fertigungstechnik nach DIN 8580 klassifizierten Fertigungsverfahren durchführbar. Aufgrund der guten Ansteuerbarkeit der Laserstrahlquellen sind diese leicht in Fertigungsverfahren mit hohem Automatisierungsgrad zu integrieren und konkurrieren mit den konventionellen Verfahren. Die einzelnen Hauptgruppen der Fertigungstechnik untergliedern sich, mit der beispielhaften Nennung einiger Lasermaterialbearbeitungsverfahren, in die Fertigungsverfahren

- *Urformen*: Lasersintern, verschiedene Verfahren des Rapid-Prototyping
- *Umformen*: Laserbiegen
- *Trennen*: Laserschneiden, -bohren, -abtragen
- *Fügen*: Laserschweißen, -löten
- *Beschichten*: Laserbeschichten mit metallischen Pulvern oder Draht
- *Stoffeigenschaft ändern*: Laserhärten, -umschmelzen.

Die Laseranwendungen in der Fertigungstechnik lassen sich in „Laser-Only“-Prozesse, d.h. Einsatz der Lasertechnologie in reinen Laserbearbeitungsmaschinen, und in Ver-

fahren, in denen konventionelle Fertigungsverfahren mit denen der Lasertechnik kombiniert werden, unterteilen (s. Bild 5). Die Kombination der Lasertechnologie mit den herkömmlichen Verfahren erweitert zugleich auch das Spektrum an Fertigungsverfahren (Spanbrechen, Warmzerspannung). Der Lasers wird dabei als unterstützendes Werkzeug verwendet. Gleichzeitig stehen durch den Laser als ein ergänzendes Werkzeug und durch zusätzliche Verfahren erweiterte Fertigungsmöglichkeiten hinsichtlich Technologie, Werkstoffen und Geometrie zur Verfügung.

Lasieranwendungen in der Fertigung												
Laser-Only Prozeß	Kombination mit herkömmlichen Verfahren											
<p>Trennen</p> <ul style="list-style-type: none">• Bohren• Schneiden• Gravieren• Trimmen• Abtragen <p>Fügen</p> <ul style="list-style-type: none">• Schweißen• Löten <p>Stoffeigenschaften ändern</p> <ul style="list-style-type: none">• Härten• Umschmelzen• Legieren• Beschichten	<p>unterstützendes Werkzeug</p> <p>Span-Brechen</p> <p>Laserunterstützte Zerspanung</p> <ul style="list-style-type: none">• Warmdrehen• Warmfräsen <p>Laserunterstütztes Umformen</p> <ul style="list-style-type: none">• Warmumformen	<p>ergänzendes Werkzeug</p>	<p>zusätzliche Verfahren</p> <p>erweiterte Fertigungsmöglichkeiten</p> <table><tr><th>Technologie</th><th>Werkstoff</th><th>Geometrie</th></tr><tr><th colspan="3">Beispiele</th></tr><tr><td>spanende Bearbeitung & Fügen, Härten</td><td>spanende Bearbeitung & Laserabtragen</td><td>Stanzen & Schneiden</td></tr></table>	Technologie	Werkstoff	Geometrie	Beispiele			spanende Bearbeitung & Fügen, Härten	spanende Bearbeitung & Laserabtragen	Stanzen & Schneiden
	Technologie	Werkstoff	Geometrie									
	Beispiele											
	spanende Bearbeitung & Fügen, Härten	spanende Bearbeitung & Laserabtragen	Stanzen & Schneiden									

Bild 5: Erweiterte Fertigungsmöglichkeiten durch laserintegrierte Komplettbearbeitung [59].

Hinsichtlich der Integration des Lasers in Werkzeugmaschinen beschränkt sich der Einsatz der Lasertechnik dabei in der Hauptsache auf die Fertigungsverfahren

- Trennen
- Fügen und
- Stoffeigenschaft ändern.

Je nach Maschinentyp können unterschiedliche Laserverfahren zum Einsatz kommen. Die wichtigsten dieser Verfahren werden im folgenden näher erläutert.

Die Laserverfahren *Beschriften*, *Abtragen (Strukturieren, Caving)* und *Bohren* lassen sich in nahezu jeden Maschinentyp integrieren. Dafür sind in der Regel gepulste Laserstrahlquellen notwendig. Mittels dieser ausgereiften Technologien können vor allem sehr feine Bohrungen oder Strukturierungen in nahezu allen Materialien sowohl in dünnwandigen, als auch in massiven Bauteilen eingebracht werden. Dadurch kann der

Einsatz von bruchanfalligen Bohrern bzw. Fräsern mit kleinen Durchmessern reduziert werden oder entfallen. Feinste Strukturen [60] wie Hinterschnidungen, die mit mechanischen Werkzeugen nicht herstellbar sind, lassen sich durch den Abtragprozeß in Oberflächen in nahezu beliebiger Form einbringen. Das Laserabtragen als Fertigungsverfahren zum Entgraten und Kantenbrechen von Werkstücken findet bislang kaum industrielle Anwendung. Ausführliche Untersuchungen zu diesen Verfahren sind in [61] und [62] dargestellt. In der Literatur findet lediglich das Entgraten von Turbinenschaukeln Erwähnung [63]. Die speziellen Vorteile gegenüber dem Entgraten mit Bürsten sind vor allem die berührungslose und kraftfreie Bearbeitung von filigranen Bauteilen sowie die lokale, eng begrenzte Bearbeitung ohne Beschädigung angrenzender, fertig bearbeiteter Bauteilflächen. Durch das Beschriften in der Maschine kann vor allem den Kennzeichnungspflichten innerhalb der Produktion Rechnung getragen werden.

Das *Lasertrennen* bietet sich als flexibles und präzises Verfahren für z.B. rohrförmige Bauteile oder Bleche an. Dünnwandige Bauteile können kraftfrei und mit minimaler Gratbildung bearbeitet werden [64].

Deutlich erweitert wird das Spektrum der Bearbeitungsverfahren innerhalb einer Werkzeugmaschine durch *Laserstrahl-Fügen*, *-Härten*, *-Umschmelzen*, *-Legieren* und *-Beschichten*.

Die Vorteile beim *Fügen* ergeben sich unter anderem dadurch, vorgefertigte Standardkomponenten mit noch anzufertigenden Komponenten in einer Maschine zu verbinden. Damit besteht auch die Möglichkeit ein Bauteil aus unterschiedlichen Materialien herzustellen, so daß die Materialeigenschaften genau den gewünschten lokalen Anforderungen entsprechen („tailored material properties“). An die Nahtvorbereitung und Spanntechnik werden allerdings hohe Ansprüche gestellt, da die Laserschweißprozesse nur kleine Spalte zulassen. Das Laserschweißen innerhalb einer Werkzeugmaschine erscheint von daher nur dann sinnvoll, wenn mindestens einer der zu fügenden Partner in der Maschine bearbeitet wird und durch das Arbeiten in einer Aufspannung erhebliche Vorteile hinsichtlich der Positioniergenauigkeit beim Spannen der zu fügenden Teile entstehen. Dies macht eine lasergerechte Konstruktion notwendig [65].

Das *Laserhärten* bietet die größten Erfolgsaussichten zum Einsatz innerhalb einer Maschine zur Fertigbearbeitung. Durch die enge Begrenzung der zu härtenden Zone, die hohe Flexibilität und die geringe thermische Belastung des Werkstückes wird eine lokale Bauteilhärtung mit geringem Nachbearbeitungsaufwand möglich, die auch an komplexen Bauteilen und schwer zugänglichen Stellen erfolgen kann.

Die Verfahren *Umschmelzen*, *Legieren* und *Beschichten* brauchen eine schmelzflüssige Phase, wodurch die Oberfläche annähernd normal zu Schwerkraft ausgerichtet sein

muß, um ein Wegfließen der Schmelze zu verhindern. Beim Legieren und Beschichten sind Zusatzstoffe erforderlich, die oft in Pulverform oder als Draht zugeführt werden müssen und ein stark abrasives Verhalten aufweisen. Dies schränkt die Einsatzmöglichkeiten dieser Laserverfahren innerhalb der Werkzeugmaschine stark ein. Andererseits schafft jedoch vor allem das Beschichten als generativer Prozeß die neue Möglichkeit des Rapid-Prototyping [66], [67] bzw. auch der Reparatur und einer mechanischer Nachbearbeitung innerhalb der Maschine.

In der Gruppe der unterstützenden Laserverfahren sind die Technologien Spanbruch von langspanenden Werkstoffen durch Laserstrahlung sowie das Warmfräsen und das Warmdrehen mit Laserunterstützung (LAM = **l**aser **a**ssisted **m**achining) einzuordnen [68]. Der Einsatz des Lasers zum Spanbruch erscheint vor allem in Drehmaschinen sinnvoll [69]. Durch gezielte Laserpulse werden kleine Sollbruchstellen (Bohrungen) direkt vor dem Eingriff der Werkzeugschneide angebracht, wodurch es zu einer Bildung kurzer Späne kommt und somit ein verbesserter Spanabfluß gewährleistet werden kann. Dies ist besonders bei der abschließenden Schlichtbearbeitung notwendig, um eine Zerstörung der technischen Oberfläche zu verhindern. Bei der laserunterstützten Warmzerspanung wird mit dem Laser der Werkstoff unmittelbar vor der Werkzeugschneide in den plastischen Bereich erwärmt. Dadurch wird eine Reduktion der Zerspankräfte erzielt. Weiterhin wird durch den unterstützenden Einsatz der Laserstrahlung die Bearbeitung mancher Werkstoffe wie Siliziumnitrid-Keramik (HPSN, HIP) erst ermöglicht [70], [71]. Zielsetzung ist es, bei schwer zerspanbaren Werkstoffen entweder die Bearbeitungsgenauigkeit zu erhöhen, die Bearbeitungsgeschwindigkeit (Zerspanleistung) zu steigern, den Werkzeugverschleiß zu reduzieren oder die Substitution des Schleifens sprödharter Werkstoffe [72], [73]. Das Laserwerkzeug muß gleichzeitig mit dem zerspanenden Werkzeug zur Verfügung stehen und auch in Abhängigkeit zu der Orientierung der Werkzeugschneide ausgerichtet werden. Dies erfordert die Montage des Laserwerkzeuges auf einem zusätzlichen programmierbaren Werkzeughalter. Durch eine Simulation des Prozesses vor der eigentlichen Bearbeitung verläuft das Drehen beispielsweise von Keramikventilen für Verbrennungsmotoren, oder das Fräsen von keramischen Umformwerkzeugen für den Karosseriebau äußerst prozeßsicher [74]. Zur Vermeidung von thermisch beeinflussten Oberflächenrandzonen während der Bearbeitung ist eine Prozeßkontrolle und Prozeßregelung notwendig [75].

Durch die Verwendung des Lasers als vorlaufende Wärmequelle in Umformeinrichtungen können die für die Umformung notwendigen Prozeßkräfte deutlich um 20% - 40% gesenkt werden. Dies ist allerdings nur bei punktförmigen Umformvorgängen wie z.B. dem Rollumformen möglich [76]. Andere Einsatzgebiete ergeben sich durch die direkte Nutzung des Laserstrahles zum Umformen von Blechteilen. Die Technik

basiert auf der Induzierung von Eigenspannungen im Material [77]. Derzeit wird diese Anwendung in der Hauptsache in Forschungsinstitutionen untersucht. Erste industrielle Anwendungen sind in der Feinjustage elektronischer und feinmechanischer Bauteile zu finden.

Einige der Laserverfahren wie Bohren, Härten, Abtragen und Beschriften, können hauptzeitparallel (simultan) zu einer mechanischen Bearbeitung durchgeführt werden. Dadurch wird die Bearbeitungszeit des Werkstückes durch das Laserverfahren nicht bzw. nur in sehr geringem Maße verzögert.

Je nach Maschinentyp können die verschiedenen Laserverfahren zum Einsatz kommen. Bei Betrachtung des Lasers als zusätzliches Werkzeug in einer Werkzeugmaschine lassen sich die vorgestellten Laserverfahren hinsichtlich ihres Wirkens in drei Hauptgruppen unterteilen:

- Ersatz von konventionellen Verfahren durch konkurrierende Laserverfahren (z.B. Laserschneiden in Stanzmaschinen, Laserbohren in Drehmaschinen und Fräs-/Bohrzentren,
- Erweiterung des Fertigungsspektrums durch neue, zusätzliche Laserbearbeitungstechnologien in gleichberechtigtem Einsatz (z.B. Laserhärten, Laserschweißen),
- Unterstützung von konventionellen Technologien durch Lasertechnologie (z.B. Warmdrehen, -fräsen, Spanbrechen, Warmumformen).

In Bild 6 sind die unterschiedlichen Laserverfahren in Abhängigkeit verschiedener Maschinentypen in die diese integriert werden, als konkurrierendes, zusätzliches oder unterstützendes Verfahren dargestellt.

Laser- verfahren \ Maschinen- typ	Dreh- maschine	Fräs- maschine	Schleif- maschine	Stanze	Umform- presse
Bohren	○	○	●	●	●
Abtragen Beschriften Strukturieren	○	○	●	○/●	○
Trennen	○	○	●	○	●
Fügen	●	●	●	●	
Härten Umschmelzen	●	●	●		
Legieren	●	●	●		
Beschichten	●	●	●		
Warmzerspanung	X	X			
Warmumformung					X
Spanbruch	X				

Verfahrenseinsatz: ○ konkurrierend ● zusätzlich X unterstützend

Bild 6: Übersicht über die in Werkzeugmaschinen einsetzbaren Laserverfahren [78].

2.3 Maschinentechnische Realisierungen der Laserintegration

Die ersten Versuche zur Lasermaterialbearbeitung in spanabhebenden Werkzeugmaschinen wurden Ende der 70er Jahre durchgeführt. Die Idee bestand damals in der Unterstützung der Zerspanung durch Erwärmen des Werkstoffes unmittelbar vor dem Eingriff der Werkzeugschneide. Copley und Bass beschrieben 1979 die Integration von CO₂-Laserstrahlung in eine Drehmaschine über ein Spiegelsystem [79]. Damit waren neben dem „laser assisted machining“ bereits Applikationen wie das Herstellen von Gewinden in Keramik über den abtragenden Laserprozeß möglich. Rajagopal, Plankenhorn und Hill stellten 1982 ein ähnliches Vorgehen zum laserunterstützten Drehen mit einem 15 kW CO₂-Laser vor [80].

Der Einsatz des Laser in Werkzeugmaschinen zum Trennen wird in [81] erläutert. Der Grundgedanke besteht darin, mit jeweils zwei Laserstrahlen größere Stücke aus dem

Vollen herauszuarbeiten, und zwar in Form von Ringen bei Drehmaschinen bzw. von Quadern und ähnlichen Geometrien bei Fräsmaschinen. Der experimentelle Aufbau zur genaueren Untersuchung dieser Verfahrenstechnologie wird in [82] beschrieben. Die dargestellten Varianten zur Laserintegration als unterstützendes oder zusätzliches Werkzeug in Drehmaschinen stellen ausschließlich Laboraufbauten dar, wobei der Leistungsstrahl frei durch den Arbeitsraum und über Spiegel an die entsprechenden Positionen geführt wird. Eine spanende Bearbeitung ist mit diesen Maschinen nur stark eingeschränkt bzw. nicht mehr möglich.

Von daher werden in den folgenden Kapiteln nur für den industriellen Einsatz geeignete Werkzeugmaschinen näher ausgeführt, bei denen die ursprüngliche Funktionalität durch die Laserintegration nicht bzw. nur wenig beeinträchtigt wird. Weiterhin werden nur diejenigen Maschinen betrachtet, bei denen der Laser als ein zusätzliches Werkzeug zur Verfügung steht, also die Anzahl der in der Werkzeugmaschine zur Verfügung stehenden Bearbeitungstechniken um weitere Fertigungsschritte ergänzt wird.

2.3.1 Drehmaschinen

Der erste Ansatz einer praxisgerechten Umsetzung der Laserintegration in die Drehmaschine *TRAUB TNS 65 D* wird in [83] aufgeführt. Der CO₂-Laserstrahl wird zunächst parallel zur Drehachse der Spindel oberhalb des oberen Schlittensystems in die Maschine geführt. Die Aufbauten des oberen Werkzeugrevolvers werden durch Umlenkspiegel und Fokussieroptik ersetzt. Dadurch steht dieser nicht mehr für die Aufnahme konventioneller Werkzeuge zur Verfügung. Trotz dieser Einschränkungen stellt dieses Konzept einen wichtigen Schritt hin zur industrietauglichen Produktionsmaschine dar.

2.3.1.1 Grundlagen und konstruktive Umsetzung

Ohne wesentliche Einschränkungen zeigen die umfangreichen Untersuchungen in [84] und [85] die Integration des CO₂-Lasers mittels einer Portalanlage in das Fertigungsverfahren Drehen. Das Portal wird gleichzeitig zum Werkstückhandling eingesetzt. Durch diesen Ansatz wird das Drehzentrum in seinen Funktionen nicht beeinträchtigt; die hohen Investitionskosten sprechen jedoch gegen diesen Vorschlag.

Die Firma Traub stellte auf der EMO 1993 einen fasergeführten gepulsten Nd:YAG-Laser, integriert in ein dreiachsiges CNC-Dreh-Fräszentrum, *TRAUB TNC 30 DGY*, vor [86]. Die Strahlzufuhr erfolgt hier koaxial zur Drehachse Z_1 des oberen Werkzeugrevolvers. Das Lichtleitkabel ist drehbar in der Strahlzuführung befestigt. Der Laserstrahl wird über einen am Werkzeugrevolver befestigten Spiegel aus der Z_1 -Achse in

Richtung der X_1 -Achse in das Werkzeug (Optik zur Strahlformung) umgelenkt. Aufgrund dieser konstruktiven Ausführung besteht keine Möglichkeit, weitere Bearbeitungsoptiken auf dem oberen Werkzeugrevolver zu montieren. Für eine stirnseitige Bearbeitung muß von daher die „radiale“ Bearbeitungsoptik gegen eine Optik mit einer zweiten internen Strahlumlenkung (90° -Umlenkung aus der X_1 -Achse in Richtung Z_1 -Achse) getauscht werden. Erste Applikationen wurden mit einem gepulsten Laser (50 W mittlere Leistung, Faserdurchmesser 400 μm) zum Feinschneiden medizinischer Bauteile und zum Schweißen durchgeführt [87]. Durch den Anschluß eines 2 kW Nd:YAG-Lasers (cw Betriebsmodus) mit Strahlführung durch eine 600 μm -Faser können verschiedene Applikationen zum Tiefschweißen und Härten durchgeführt werden [88].

Einen verbesserten Lösungsansatz zeigt der in Bild 7 dargestellte Umbau des Drehzentrums *Index GS30* [89], [90]. Das Drehzentrum verfügt über zwei Werkzeugrevolver, deren Drehachsen um 90° zueinander versetzt sind und über fünf gesteuerte Achsen (vier Linearachsen und eine C-Achse). Das Laserwerkzeug wird am Revolver wie ein spanendes Werkzeug befestigt. Durch einen rotatorischen Freiheitsgrad zwischen Bearbeitungsoptik und Werkzeughalter (Lagerung um die Strahlaustrittsachse) ist ein Werkzeugwechsel möglich. Das Lichtleitkabel sowie diverse Versorgungsleitungen für Sperrluft und Prozeßgas werden von oben in den Arbeitsraum der Maschine geführt. In dieser Konfiguration ist eine dreiachsige Bearbeitung mit reduzierter Zugänglichkeit des Bearbeitungskopfes möglich. Ein Teil der anderen Werkzeugplätze kann mit spanenden Werkzeugen belegt werden. In der dargestellten Anordnung sind umfangseitige Bearbeitungen mit dem Laser möglich. Für eine stirnseitige Bearbeitung der Werkstücke kann die Bearbeitungsoptik um 90° gedreht auf den zweiten Werkzeugrevolver montiert werden. Die konstruktive Umsetzung erlaubt es, jedes dieser Drehzentren zu einem späteren Zeitpunkt mit der Lasertechnologie nachzurüsten.

Für die Lasermaterialbearbeitung stehen ein gepulster Nd:YAG-Laser (600 W mittlere Leistung) und ein 2 kW-cw Nd:YAG-Laser zur Verfügung. Eine Vielzahl von Verfahrensentwicklungen zum Schweißen, Härten, Abtragen und Bohren werden beispielhaft in [32] ausführlich behandelt.

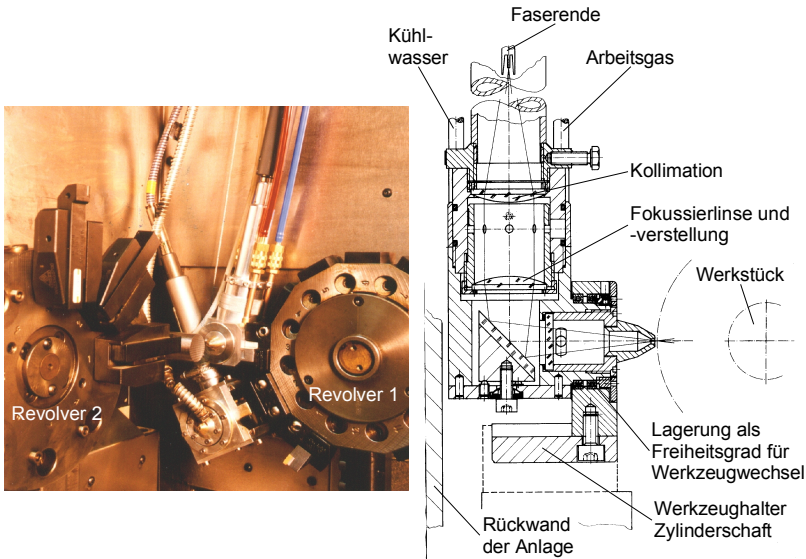


Bild 7: Einbausituation an Werkzeugrevolver 1 mit zwei Laserwerkzeugen im Drehzentrum Index GS30 und Detailansicht der Konstruktion der integrierten Laseroptik [32]; (Quelle: IFSW).

Eine weitgehend für die Serienfertigung optimierte Lösung stellt die Integration eines Nd:YAG-Lasers in das modular aufgebaute Drehzentrum *Index GS200* dar [91]. Das Maschinenkonzept berücksichtigt die notwendigen Schnittstellen für die Integration eines Lasers. Ausgehend von einer Basisversion mit Hauptspindel und einem Werkzeugrevolver kann das Drehzentrum um eine Gegenspindel, eine C-Achse und einem Werkzeugrevolver mit Y/B-Achse und Zusatzfrässpindel sehr leicht erweitert werden. An Stelle der im Y/B-Achsen-Modul montierten Zusatzfrässpindel läßt sich der Laserkopf mit zwei unterschiedlichen Bearbeitungsoptiken zum Schweißen und Härten einbauen. Die Strahlführung vom Laseraggregat bis zum Drehzentrum ist fasergeführt, in der Maschine selbst propagiert der Strahl frei (mit Zwischenfokussierung) durch die Hohlwelle der Y/B-Achse. Mit der frei drehbaren Y/B-Achse sind die Möglichkeiten einer umfangseitigen, stirnseitigen und rückseitigen Laserbearbeitung an Haupt- und Gegenspindel gegeben (s. Bild 8).

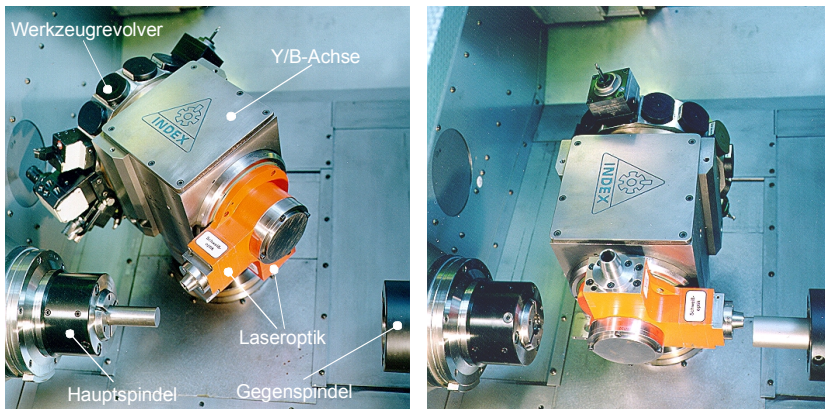


Bild 8: Umfang- und stirnseitige Laserbearbeitung im Drehzentrum INDEX GS200 an Hauptspindel (links) und Gegenspindel (rechts).

2.3.1.2 Anwendungen der laserintegrierten Komplettbearbeitung

Zur Herstellung von Magnetschlußhülsen (Baugruppe von Magnetventilen) wurde in die Vertikaldrehmaschine INDEX V200 mit einem 2 kW Nd:YAG-Laser (cw) für den Fertigungsprozeß Fügen kombiniert [92]. Die Magnetschlußhülse hat die Aufgabe, ein Fluid zu kapseln, einen Magneten zu befestigen und einen Magnetanker innerhalb eines definierten, magnetischen Feldes zu führen. Aufgrund dieser Anforderungen ist sie dreiteilig aus Verschlußstück, Flansch und Hülse aufgebaut. Der daraus resultierende mehrstufige Fertigungsprozeß gliedert sich in die Verfahren Drehbearbeitung, Montage und Fügen. Je nach Einsatz beim Kunden waren bislang unterschiedliche Fügeprozesse notwendig. Für den Pneumatikbereich wurde das Lötén eingesetzt, für die Lebensmittelindustrie wurde elektrisch (MIG, WIG) geschweißt, und für Hochdruckanwendungen war eine Elektronenstrahlschweißung erforderlich. Die hohe Variantenzahl sowie abteilungsübergreifende Fertigungsschritte führten zu einer immer komplexer werdenden Logistik. Mit der Integration eines 2 kW Nd:YAG-Lasers in die Vertikaldrehmaschine können alle Fertigungsschritte (Drehen, Montieren und Fügen) in einer Maschine realisiert werden (s. Bild 9). Der Materialfluß innerhalb der Maschine von einer Bearbeitungsposition zur anderen wird durch die hängende Spindel vollzogen. Als wichtigste Vorteile dieser Innovation sind die Reduktion der Arbeitsfolgen von fünf auf nur eine Arbeitsfolge, die Verkürzung der Durchlaufzeit von 20 Tagen auf eine Just-in-Time-Fertigung und die Beherrschung von nur noch einem Standardfügeprozeß, dem Laserschweißen, zu nennen. Die Konzentration der Fertigung auf eine Einrichtung mit der Möglichkeit einer laserintegrierten Komplettbearbeitung, führt

gegenüber der herkömmlichen Lösung zu einer deutlichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

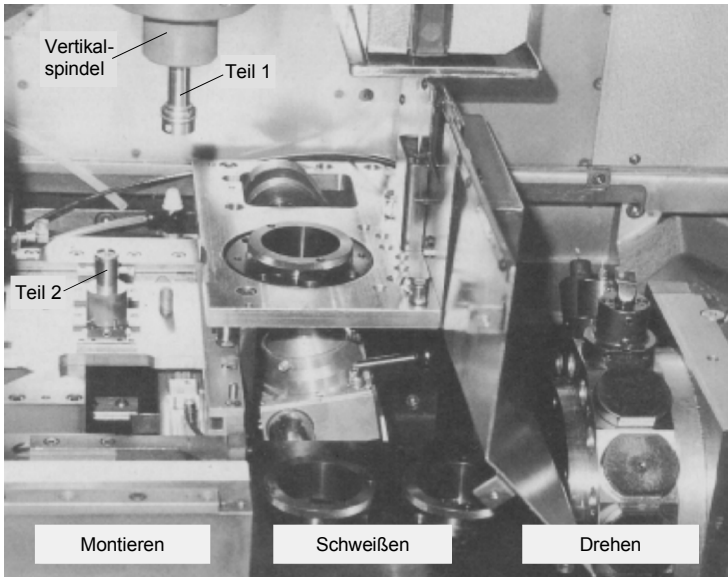


Bild 9: Drehmaschine INDEX V200: Fertigung von Magnetschlußhülsen – montieren, schweißen, drehen [92]; (Quelle: Fa. Herion).

Eine weitere Anwendung der laserintegrierten Komplettbearbeitung stellt die laserunterstützte Warmzerspanung dar. Die erste für eine Serienfertigung geeignete CNC-Drehmaschine kann bei der Firma Benzinger seit der EMO 1999 käuflich erworben werden. Der Schwerpunkt liegt hier darauf, Keramiken und andere schwer zerspanbare Stähle (z.B. hoch warmfeste) zu drehen. Dazu wurde die Drehmaschine mit einem 1,2 kW Diodenlaser kombiniert. Dieser wird in der Maschine mit drei zusätzlichen NC-Achsen relativ zum Werkstück positioniert. Die Achsen befinden sich auf einem speziellen Flachrevolver, der auf einem Kreuztisch (X- und Z-Achse) befestigt ist. Unmittelbar hinter dem Fokuspunkt des Lasers wird mit PKD-Werkzeugen der schwer zerspanbare Werkstoff bearbeitet. Bei Keramiken sind mit dieser Technologie Schneidgeschwindigkeiten von 30 bis 50 m/min bei einer Spandicke von 2 mm möglich [93]. Anwendung findet dieses Verfahren bei der Herstellung der Lagerringe von Wälzlagern. Die Fertigungszeit der Wälzlager-Laufbahn konnte gegenüber dem bisherigen Schleifen um 50 %, d.h. auf 3 bis 5 Minuten, reduziert werden. Weiterhin sind mit der neuen Technologie beliebige konkave oder konvexe Formen ohne Mehraufwand herstellbar, wohingegen bei der Schleiftechnologie eine Profilierung der Schleif-

scheiben notwendig war.

2.3.2 Stanz-Nibbelmaschinen

Das bekannteste Beispiel der Integration des Lasers in Werkzeugmaschinen zur Erweiterung des Spektrums an Fertigungstechnologien stellen Stanz-Nibbelmaschinen dar [94], [95]. Maschinen dieser Art werden für anspruchsvolle fertigungstechnische Aufgaben eingesetzt. Schnelle Stanzfolgen von 600 bzw. 1200 Hüben pro Minute beim Signieren, und lineare Werkzeugspeicher für bis zu 19 Werkzeuge sind kennzeichnend für diese Maschinen [96]. Es werden derzeit hauptsächlich CO₂- und Nd:YAG-Laser unterschiedlicher Leistung zum Konturschneiden von Blechen mit der konventionellen Technologie kombiniert. Standardkonturen, Umformungen und Gewinde fertigt die Stanzeinheit, während filigrane Innen- und Außenkonturen mit dem Laser geschnitten werden. Weitere Vorteile ergeben sich bei dieser Verfahrenskombination dadurch, daß bei gleichen Teilen bzw. Losen großer Stückzahl durch die frei programmierbare Lasertechnik dennoch eine Variation der Teile möglich ist.

2.3.3 Schnellstanzen

Neben den bekannten Stanz-Nibbelmaschinen bietet die Firma Bruderer (Schweiz) integrierte Komplettlösungen zum Laserfügen in Stanzautomaten mit hohen Hubzahlen und Folgeverbundwerkzeugen an [97]. Diese Anwendungen mit Hubzahlen von bis zu 800/min werden mit gepulsten Nd:YAG-Laser mit mittleren Leistungen von 500 W realisiert. Der Laserstrahl wird auf bis zu vier Teilstrahlen aufgeteilt. Die Strahlführung erfolgt mittels Glasfasern (s. Bild 10). Nach jedem Hub bzw. Stanzvorgang werden so bis zu vier Schweißpunkte gesetzt. Bislang sind mehr als 20 dieser Anlagen für unterschiedliche Teilespektren im industriellen Einsatz. Ein Anwendungsbeispiel ist das Laserstanzpaketieren von Statorblechen für Elektromotoren. Es erlaubt das Stanzen und gleichzeitige Fügen von Einzelblechen zu Paketen innerhalb der Stanzfolge eines Werkzeuges. Der Laserfügeprozeß kann entweder an der Außenseite oder an der Innenkontur angebracht werden. Weitere Beispielteile aus der Fertigung sind Schweißungen an Steckerkonturen zur Versteifung von Steckerkörpern, zur Verbindung freigestanzter und umgeklappter Lappen oder zur Verbindung von vormontierten Federelementen mit einem Steckerkörper. Diese Fügeoperationen werden durch das in einem Folgeverbundwerkzeug integrierte Schweißmodul hergestellt.

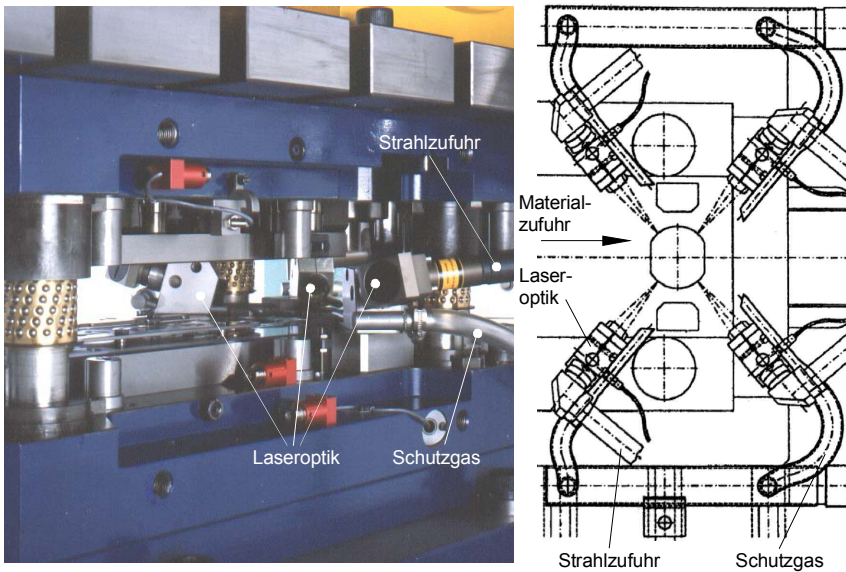


Bild 10: Anordnung der Laseroptiken in der Stanz-Paketier-Anlage [92].

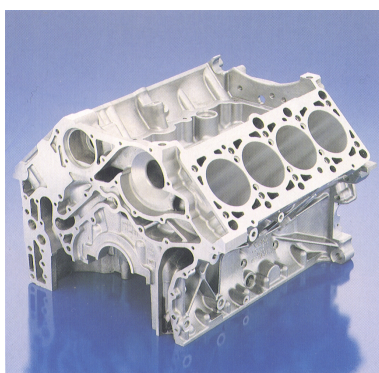
2.3.4 Schleifmaschinen

Die Integration von Lasern in Schleifmaschinen wurde bisher nur in Forschungsinstituten untersucht [98]. Das Ziel dieser Untersuchungen bestand in der Integration des Laserhärtens in eine Außenrundsleifmaschine. Für diesen unmittelbar vor der Schleifoperation stattfindenden Prozeß wurde ein Nd:YAG-SLAB-Laser mit einer mittleren Leistung von 500 W eingesetzt.

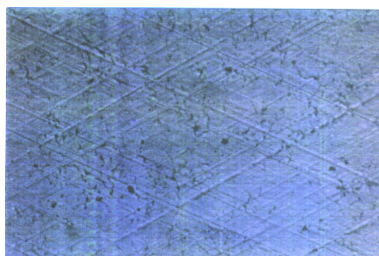
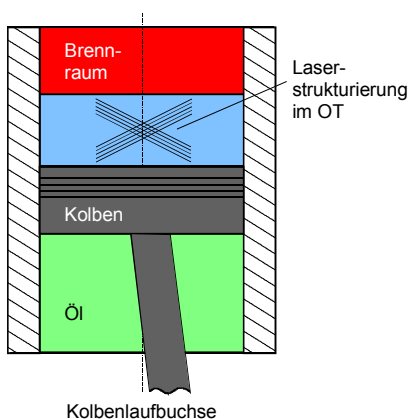
2.3.5 Honmaschinen

Die Firma Gehring, ein Hersteller von Honmaschinen zur Herstellung von Zylinderbohrungen für Verbrennungsmotoren, kombiniert den spanenden Feinstbearbeitungsprozeß mit der Lasertechnologie [99]. Entscheidend für den Ölverbrauch und die Menge der Abgaspartikel sind die technischen Oberflächen der Zylinderbohrungen. Die derzeit angewandte Fertigungsmethode ist das Honen mit gebundenem abrasivem Material, vorzugsweise SiC oder Diamant. Die Strukturen und Herstellmethoden der Schleifstoffe erlauben ein Honen der Zylinderbohrungen nur in gewissen Toleranzen, die aus heutiger Sicht den zukünftigen Qualitätsanforderungen nicht mehr gerecht werden. Dies gilt sowohl für normal- als auch für plateaugehonte Oberflächen. Das

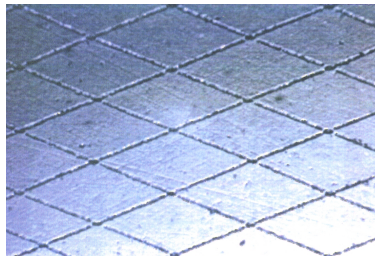
neue Fertigungsverfahren geht dahin, die Oberfläche sehr fein zu honen (gemittelte Rauhtiefe $R_z \leq 1 \mu\text{m}$) und nur in einer genau spezifizierten Zone (Umkehrpunkt oberer Kolbenring) definierte Öllager einzubringen und damit in diesem Bereich eine ideale Plateau-Oberfläche herzustellen (s. Bild 11). Die erforderlichen Strukturen werden mittels Laserabtragen mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser eingebracht. Bei einem Versuchsmotor ergab dieses Fertigungskonzept eine Verringerung der Gesamtpartikel-emission von 20 % - 25 % und eine Reduktion der Ölpartikel von 25 % - 50 %. Diese neue Technologie wird bei Diesel- und Benzinmotoren eingesetzt und ist in die vorhandenen Fertigungsstraßen integriert. Bemerkenswert ist, daß die Taktzeit der kombinierten Fertigungstechnologie innerhalb der sonst üblichen Taktzeiten liegt.



Motorblock



Gehonte Oberfläche



Laserstrukturierte und feingehonte Oberfläche

Bild 11: Kombination von Honen und Laserstrukturieren von Oberflächen [99].

3 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

Mit der Einführung der Lasertechnologie in die Fertigung stehen dem Anwender eine große Anzahl neuer Bearbeitungsverfahren zur Verfügung. Der Einsatz des Lasers im Sinne der Komplettbearbeitung erfordert die Durchführung von besonders sorgfältigen Kostenbetrachtungen, da sich ein technisch noch so vorteilhaftes Fertigungsverfahren nur bei gleichzeitig gegebener Wirtschaftlichkeit in der industriellen Produktion zu etablieren vermag.

3.1 Kriterien für die laserintegrierte Komplettbearbeitung

Um zu einer Wirtschaftlichkeitsaussage in der Fertigung zu gelangen, müssen drei Fertigungsstrategien miteinander verglichen werden. Dies ist zum einen die Beibehaltung der konventionellen Fertigung, die konventionelle spanende Fertigung unter Einbeziehung von Laserstationen (Stand-Alone-Maschinen) und die laserintegrierte Komplettbearbeitung in einer Maschine.

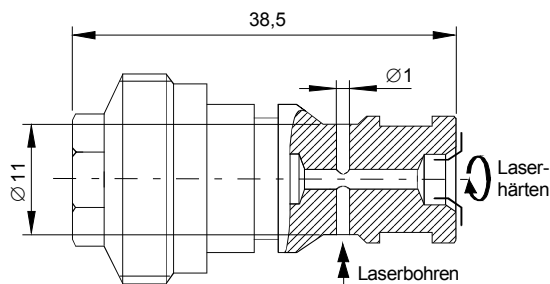
Wird der Laser in spanende Werkzeugmaschinen integriert, dann sind mit diesen Fertigungseinrichtungen sowohl spanende als auch Laserbearbeitungsverfahren sowie Verfahrenskombinationen realisierbar. Dadurch wird der technologische Geschlossenheitsgrad erhöht und Fertigungsverfahren wie Drehen, Laserhärten, Laserbohren, Hartdrehen sind durchgängig in einer Maschine realisierbar. Dies hat positive Auswirkungen auf die Bearbeitungsqualität (Fertigung in einer Aufspannung) und Vorteile in der Logistik (Wegfall von Zwischenlagerung und Pufferung teilbearbeiteter Teile). Gleichzeitig wird eine Voraussetzung zur Verkürzung der Durchlaufzeit geschaffen [100], was kürzere Lieferzeiten und eine schnellere Reaktion am Markt ermöglicht. Im Fall der termingebundenen Fertigstellung ist ein späterer Beginn des Fertigungsauftrages möglich, wodurch die Kapitalbindungskosten reduziert werden.

Die laserintegrierte Komplettbearbeitung ermöglicht ferner kürzere Rüstzeiten, da unterschiedliche Bearbeitungsaufgaben in einer Maschine bzw. in einer Aufspannung erfolgen können. Dies hat weiterhin positive Auswirkungen auf anfallende Kosten für Vorrichtungen und Qualität.

Durch den Einsatz der unterschiedlichen Laserverfahren ist eine höhere Prozeßsicherheit und ein höherer Automatisierungsgrad gegenüber herkömmlichen Bearbeitungsverfahren erreichbar. Dies wirkt sich unmittelbar auf eine Verringerung der Lohnstückkosten aus.

Da der Laserstrahl ein nicht verschleißendes und berührungsfrei arbeitendes Werkzeug

ist, kann es nicht zum typischen Werkzeugbruch, z.B. beim Bohren von Löchern mit kleinen Durchmessern, kommen. Die notwendige Bereitstellung von Schwesterwerkzeugen kann entfallen, wodurch die Reduzierung der anfallenden Werkzeugkosten unmittelbar gegeben ist. Zudem entstehen keine unproduktiven Nebenzeiten durch Werkzeugwechsel.



Zeitanteile der Bearbeitung

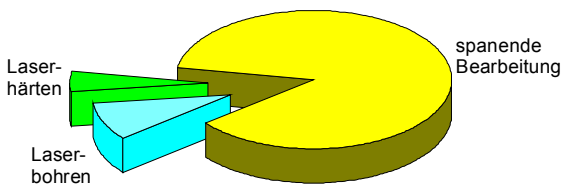









Bild 12: Zeitanteile der Laserbearbeitung im Vergleich zur spanenden Bearbeitung am Beispiel eines Hydraulikteiles.

Die bei der Realisierung einer laserintegrierten Komplettbearbeitung zusätzlich durch die Laseranlage bedingten Investitionskosten sind nach Möglichkeit auf mehrere Fertigungseinrichtungen zu verteilen. So rechtfertigt der im Vergleich zur spanenden Bearbeitung geringe Zeitanteil der Laserbearbeitung den Zugriff mehrerer Fertigungseinrichtungen auf einen Laser im sogenannten Time-Sharing-Betrieb. Dies ist in Bild 12 am Beispiel eines in der Hydraulik eingesetzten Großserienteiles dargestellt. Neben der spanenden Bearbeitung wird die Querbohrung mit einem Durchmesser von 1 mm lasergebohrt und die Fase der stirnseitigen Bohrung (Kugelsitz) lasergehärtet. Der Zeitanteil der spanenden Bearbeitung beträgt 87 %, die Summe der Zeitanteile der Laserbearbeitung liegen bei 13 % (Bohren 9 %, Härten 4 %) bei einer Gesamtbearbeitungszeit von ungefähr 3,5 Minuten. Im Time-Sharing-Betrieb sind die einzelnen Werkzeugmaschinen ständig mit dem Laser gekoppelt und fordern die Strahlung bei Bedarf an. Dadurch wird eine höhere Auslastung der Laseranlage gesichert. Außerdem

wird zusätzlich eine höhere Fertigungsflexibilität hinsichtlich der Laserbearbeitungsmöglichkeiten in mehreren Maschinen erzielt. Durch das Time-Sharing ist der Maschinenstundensatz einschließlich Laserkosten gegenüber der konventionellen Fertigungseinrichtung lediglich um ca. 5 % höher, da die entsprechenden Laserkosten dann nur noch anteilig gerechnet werden. Der höhere Maschinenstundensatz wird jedoch durch eine deutlich kürzere Gesamtfertigungszeit der Bauteile kompensiert.

Kriterium \ Fertigung	Einfluß der Losgröße ET  MT	Beibehaltung konventioneller Fertigung		laserintegrierte Komplettbearbeitungsmaschine
		ohne Lasertechnik	mit Laserstation	
neue Bearbeitungsverfahren			●	●
Verfahrenskombination				●
Qualitätsverbesserung		○	●	●
Verringerung Logistikaufwand				●
Durchlaufzeitverkürzung				●
Rüstzeitreduzierung				●
Vorrichtungskostenreduktion				●
Werkzeugverschleißkostensenkung			●	●
Lohnstückkostensenkung		○	○	●
niedrige Investitionskosten		●		○*
Nutzung vorhandenen Wissens		●	○	○
höhere Prozeßsicherheit		○	●	●
geringere Umweltbelastung			●	●

Bewertung: ● möglich
○ bedingt möglich
leer nicht möglich

Bemerkung: * durch Time-sharing
ET Einzelteil
MT Massenteil

Tabelle 2: Kriterien für den Einsatz der Lasertechnologie.

In Tabelle 2 werden die Kriterien für den Einsatz der Lasertechnologie in Hinblick auf die verschiedenen Fertigungsstrukturen miteinander verglichen. Die Bedeutung der einzelnen Kriterien ist vor dem Hintergrund einer rationellen Fertigung von der Losgröße der zu fertigenden Teile abhängig. Bei der Einzelteillfertigung wird in der Regel wesentlich größerer Wert auf Flexibilität gelegt als bei einer Massenteillfertigung. Es läßt sich erkennen, daß durch den Lasereinsatz generell der Zugewinn an neuen Bearbeitungsmöglichkeiten im Vordergrund steht. Dieser wird durch die Flexibilität des

„Werkzeuges Laser“ noch verstärkt. Vor allem bei kleinen bis mittleren Losgrößen kommt die Einsparung von Werkzeugen und Vorrichtungen besonders zum Tragen. Eine Verringerung der Anzahl notwendiger Arbeitsgänge bewirkt eine deutliche Reduzierung der Durchlaufzeit und des Logistikaufwandes.

3.2 Gesichtspunkte zur Bewertung einer laserintegrierten Komplettbearbeitung

In Bezug auf die Laseranwendung sind bei der Einführung einer neuen Technologie grundsätzlich zwei Situationen zu unterscheiden: Entweder handelt es sich um ein Teil, das bereits nach einer gesicherten Technologie auf vorhandener Maschinenteknik gefertigt wird, oder um ein Teil, das neu in die Produktion überführt wird (s. Bild 13).

Für bereits vorhandene Teile ist eine Laseranwendung hauptsächlich in der Verfahrenssubstitution zu sehen. Diese kann mit einer Verfahrensreduktion verbunden sein, z.B. durch Wegfall sonst erforderlicher Nacharbeit. Auch dann, wenn die Verfahrenssubstitution nicht unmittelbar zu einer Reduzierung der Bearbeitungszeit führt, können sich durch verfahrensbedingte Vorteile der Lasermaterialbearbeitung Kostenvorteile in der Fertigung ergeben, was die Bedeutung einer Nutzwertanalyse unterstreicht.

Durch die Einführung der Lasermaterialbearbeitung ergeben sich in der Teilefertigung Alternativen zu herkömmlichen Bearbeitungsverfahren bzw. auch neue Bearbeitungsmöglichkeiten, durch die unter Umständen eine Herstellung erst realisierbar wird. Die Konstruktion und Fertigungsplanung eines neuen Teils kann von vornherein unter dem Blickwinkel der neuen Bearbeitungsmöglichkeiten erfolgen, wodurch bei der Teileentwicklung Verfahrensbedingungen besser berücksichtigt werden können. Dadurch ist unmittelbar eine wirtschaftlichere Fertigung möglich bzw. kann eine Fertigung erst ermöglicht werden. Die von vornherein lasergerechte Konstruktion weist gegenüber der Verfahrenssubstitution bei bestehenden Teilen ein ungleich größeres Rationalisierungspotential auf. Sie erfordert jedoch fundiertes Wissen über die Möglichkeiten der Lasermaterialbearbeitung bei der Konstruktion oder die Hinzuziehung externer Verfahrensspezialisten.

Zu berücksichtigen ist außerdem, ob die Einführung der Lasertechnologie eine Neuinvestition bedingt oder ob sie im Rahmen einer Ersatzinvestition realisiert werden kann. Bei einer Neuinvestition steht dem Vorteil der sofortigen Verfügbarkeit der Lasertechnik die Frage nach der Auslastung des bereits vorhandenen Maschinenparks gegenüber, da das für die Laserbearbeitung relevante Teilespektrum dann nicht mehr auf den bereits verfügbaren Maschinen gefertigt werden kann.

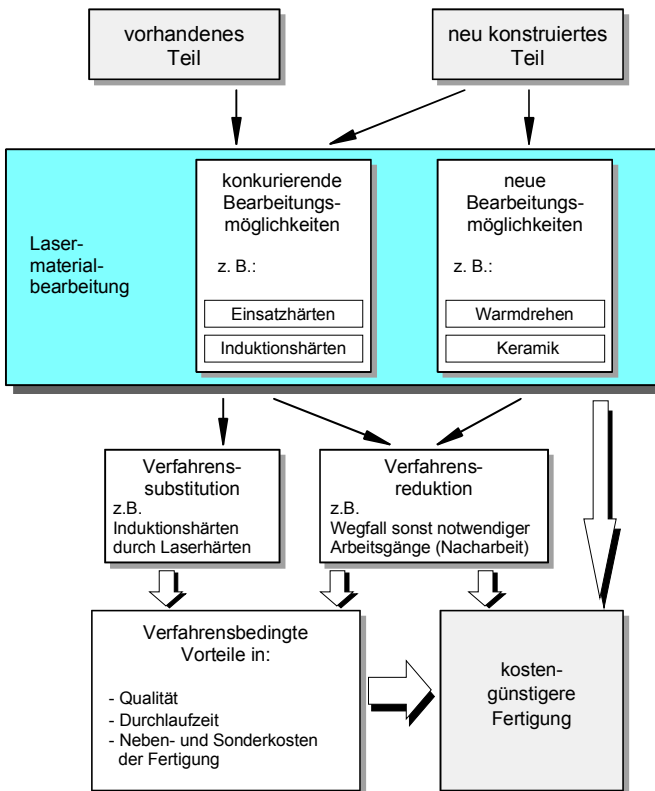


Bild 13: Vorgehensweise zur Bewertung des Einsatzes einer Laseranwendung für bereits vorhandene und neu zu entwickelnde Teile.

Generell besteht das Hauptproblem bei einer Kostenbewertung der Komplettbearbeitung mit Lasern darin, daß einige ihrer Vorteile nur sehr schwer monetär zu bewerten sind. Meistens sind diese Vorteile nicht explizit zu erfassen und wirken sich demzufolge auch nicht unmittelbar positiv in der Kostenrechnung aus. Beispiele hierfür sind die höhere Flexibilität einer solchen Anlage sowie Qualitätsverbesserungen. Das führt dazu, daß die laserintegrierte Komplettbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Fertigung zunächst teurer erscheint. Deshalb kommt der Nutzwertanalyse in diesem Zusammenhang ein weit größerer Stellenwert als der reinen Kostenrechnung zu. In ihr kann der Anwendernutzen deutlicher herausgearbeitet werden. Die durch die kostenintensivere Maschinenteknik bedingten Mehrkosten der Komplettbearbeitung mit Laser werden dadurch kompensiert. Wie schnell die Lasertechnik in der Praxis weitere

Verbreitung findet, ist in besonderem Maße auch von der Entwicklung der Laserhard-warekosten abhängig.

Ein anderer noch aufwendigerer Weg ist eine durchgehende Erfassung aller direkten und vor allem auch indirekten Prozesse bei der Herstellung. Bei einer Analyse des Restgemeinkostenblockes werden in den entsprechenden Kostenstellen die Prozesse bzw. die Kosten herauskristallisiert, die in Korrelation zur Anzahl der Arbeitsfolgen stehen. Daraus entsteht eine prozeßorientierte Kalkulation, welche die Kosten nicht nur auf die im Arbeitsplan mit Rüst- und Fertigungszeiten definierten Wertschöpfungsprozesse verteilt, sondern auch berücksichtigt, auf wie vielen Maschinenwechseln diese Wertschöpfung beruht. Damit ist eine objektivere Kostenbewertung möglich [92].

3.2.1 Nutzwertanalyse

Bei einer vollständigen Wirtschaftlichkeitsuntersuchung werden Fertigungsverfahren miteinander verglichen und beurteilt. Dies kann beispielsweise anhand der laserintegrierten Komplettbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Einzelbearbeitung geschehen. Hierzu müssen sowohl die Kosten als auch der Nutzen betrachtet und bewertet werden. Wichtig ist dabei, daß unter dem Begriff des Nutzens und der Kosten alle Eigenschaften verstanden werden, die eine positive oder negative Veränderung in der Produktion bewirken. Von daher wird bereits deutlich, daß es schwierig oder gar unmöglich ist, den gesamten Nutzen monetär zu bewerten. Da dies jedoch die Voraussetzung für eine Kostenvergleichsrechnung bildet, besteht der Zwang zur Anwendung entsprechender Verfahren.

Eine solches Verfahren ist die Nutzwertanalyse, die es erlaubt, nicht monetär bewertbare Auswirkungen eines Prozesses zu erfassen [101]. Ausgangspunkt hierbei bildet das Zielsystem. In diesem werden die angestrebten Ziele definiert und anschließend in einer subjektiven Beurteilung gewichtet. Anschließend muß für jede Projektalternative untersucht werden, in welchem Maße sie die einzelnen Teilziele erfüllt, und es muß dieser Erfüllungsgrad durch eine addierbare Verhältniszahl, den Zielwert, ausgedrückt werden (Prozentwerte oder Noten von 0-4). Nach der Addition der einzelnen Nutzwerte der Teilziele gelangt man zum gesamten Nutzwert der Variante. Diejenige Alternative, die den höchsten Gesamtnutzwert aufweist, hat nach der zuvor erfolgten subjektiven Bewertung den höchsten Gesamtnutzen bzw. erreicht den höchsten Gesamterfüllungsgrad.

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden bei der Festlegung des Zielsystems Haupt- und Unterziele definiert. In den *Hauptzielen* sind in diesem Falle die Kriterien

aufgeführt, die direkt durch die Einführung einer Komplettbearbeitung erreicht werden sollen. Die Komplettbearbeitung soll hierbei durch die Integration eines Lasers in ein Bearbeitungszentrum erreicht werden. Den Hauptzielen wird daher ein Anteil von 70 % am Gesamtnutzen eingeräumt. Die restlichen 30 % des Gesamtnutzen werden zur Gewichtung der *Unterziele* verwendet. In diesen werden Forderungen festgelegt, die sich indirekt durch die Einführung der Komplettbearbeitung ergeben.

Für die Nutzwertanalyse einer laserintegrierten Komplettbearbeitung im Vergleich zu einer konventionellen Einzelbearbeitung wurden im folgenden sechs Haupt- und acht Unterziele definiert, deren Erfüllungsgrad für beide Verfahren untersucht wurde.

Hauptziele:

Kurze Durchlaufzeiten lassen sich durch Umstellung der konventionellen Produktion auf eine laserintegrierte Komplettbearbeitung erzielen. Das Werkstück wird in einer Aufspannung in einer einzigen Maschine gefertigt. Dabei entfallen die einzelnen Transporte des Teils zwischen den zuvor benötigten Maschinen sowie sonstige Liegezeiten zwischen den einzelnen Arbeitsgängen. Außerdem lassen sich Zeiten, die durch das Richten der Maschinen sowie durch das Einlagern und Ausfassen der Teile aus Zwischen- und Hauptlagern bedingt sind, verkürzen.

Eine *höhere Termintreue und höhere Lieferbereitschaft* läßt sich unmittelbar durch die schnellere Teilefertigung (kurze Durchlaufzeiten) erzielen. Die hohe Flexibilität der laserintegrierten Fertigung ermöglicht schnellere Reaktionen auf Veränderungen in der Auftragssituation, wodurch kurzfristigen Lieferaufträgen besser entsprochen werden kann. So kann beispielsweise die Vorverlegung von Endterminen eines Kundenauftrages durch eine Komplettbearbeitung weitaus weniger Probleme bereiten. Durch diese gesteigerte Termintreue lassen sich daher auch Konventionalstrafen, verursacht durch die Nichteinhaltung von Lieferterminen, verringern.

Eine *geringere Umlaufkapitalbindung* und ein *geringerer Zinsdienst* bringen finanzielle Einsparungen hervor, da sich die Zeit vom Rohteil bis zum montagefertigen Werkstück durch eine Komplettbearbeitung erheblich verringern läßt und somit das in Halbfabrikaten gebundene Kapital reduziert wird.

Die *Vermeidung von Fremdfertigung* bringt weitere Zeitgewinne im Vergleich zum herkömmlichen Fertigungsverfahren. Arbeitsgänge die zuvor in einem anderen Betrieb durchgeführt werden mußten – sei es durch fehlende Technologie oder zu hohen Kosten für weitere Maschinen – lassen sich durch die Komplettbearbeitung in einem Betrieb durchführen.

Deutliche Steigerungen in der *Flexibilität hinsichtlich Teilegeometrieänderungen* er-

geben sich durch den Einsatz des Lasers in Werkzeugmaschinen. Die *Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitungsverfahren* ist gegeben, da der Laser innerhalb der Maschine zum Härten, Schneiden, Bohren oder Beschriften genutzt werden kann. Zudem lassen sich dadurch Werkstücke bearbeiten, die mit der konventionellen Bearbeitungstechnologie nicht gefertigt werden konnten. Dadurch ist es möglich z.B. spezielle Härtebahnen oder extrem schräge Bohrungen herzustellen. Dies führt zu einer Erweiterung des herstellbaren Teilespektrums.

Unterziele:

Kürzere Rüst-, Lager- und Transportzeiten werden durch die Komplettbearbeitung erreicht. Die Teile müssen zwischen den einzelnen Arbeitsgängen nicht mehr in Zwischenlager gebracht werden, wodurch sich neue freie Lagerkapazitäten ergeben. Möglich wäre daher auch eine Verkleinerung des bisherigen Lagerraums. Auch der Wegfall des Transports der Werkstücke von und zu den Lagern sowie zwischen den einzelnen Arbeitsplätzen bringt große Vorteile mit sich. Ebenso lassen sich durch eine Komplettbearbeitung die erforderlichen Rüst- und Aufspannvorgänge an den vorher benötigten Arbeitsplätzen reduzieren.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit der *schnelleren Einführung neuer Produkte*. Durch die Durchlaufzeitverkürzung wird das Teil früher fertiggestellt und kann somit schneller auf den Markt gebracht werden. Gerade bei einer neuen Produktpalette kann dies ausschlaggebende Vorteile gegenüber der am Markt konkurrierenden Wettbewerber bringen.

Durch die vollständige Bearbeitung des Bauteiles in einer Maschine entfällt der Transport der Bauteile von einer Bearbeitungsstation zur nächsten. Dadurch *verringert* sich der gesamte *Transportbedarf* und somit auch die Transportkosten.

Dies führt direkt zu einem *übersichtlicheren Materialfluß*. Ein Großteil der Dispositionsarbeiten und -überwachungen ist nicht mehr notwendig und die gesamte Steuerung der *Logistik wird vereinfacht*.

Die laserintegrierte Fertigung zeichnet sich weiterhin durch eine *hohe Bearbeitungsqualität* aus. Durch die Reduzierung der Aufspannvorgänge – im Idealfall auf nur noch einen einzigen – werden Aufspannfehler und Justageungenauigkeiten vermieden und dadurch die Produktqualität gesteigert. Notwendige Nacharbeiten entfallen nahezu vollständig. Dies führt zu einer Senkung der Qualitätskosten, die sich aus Fehlerverhütungs-, Prüf- und den eigentlichen Fehlerkosten (Ausschußteile bzw. Teile für Nacharbeit) zusammensetzt.

Für eine zukünftige Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit ist es unumgänglich den Ma-

schienenpark stets zu erneuern sowie neue Fertigungstechnologien und -verfahren einzusetzen. Mit dem Einsatz des Lasers in einer laserintegrierten Komplettbearbeitung ist eine *zukunftsorientierte Technologie* gegeben.

Eine *Senkung der Lohnnebenkosten* kann durch eine Komplettbearbeitung erreicht werden, da der komplette Fertigungsprozeß auf nur noch einer Maschine stattfindet. Einen weiteren Beitrag zur Senkung der Lohnnebenkosten ergibt sich durch die vereinfachte Fertigungsvorbereitung sowie durch den Wegfall von Transporten und Tätigkeiten im Lagerbereich.

Als letzter Punkt sei auf die *Motivation der Mitarbeiter* hingewiesen. Durch den Einsatz des Lasers in einer Werkzeugmaschine nimmt die Verantwortung und damit die Motivation der einzelnen Mitarbeiter zu. Dies führt unmittelbar zu einer Steigerung der Qualität und Verringerung an Ausschuß.

Zur Bewertung der laserintegrierten Komplettbearbeitung mittels der Nutzwertanalyse sind die einzelnen Teilziele der Haupt- und Unterziele in nachfolgender Tabelle nochmals zusammenfassend aufgelistet.

Hauptziele	Unterziele
kurze Durchlaufzeiten	kurze Rüst-, Lager- und Transportzeiten
hohe Termintreue und Lieferbereitschaft	schnelle Einführung neuer Produkte
geringe Umlaufkapitalbindung und geringer Zinsdienst	übersichtlicher Materialfluß, Logistik
Vermeidung von Fremdfertigung	geringer Transportbedarf
Flexibilität bzgl. der Bearbeitungsgeometrien	hohe Bearbeitungsqualität
Flexibilität bzgl. der Bearbeitungsverfahren	zukunftsorientierte Technologie
	Senkung von Lohnnebenkosten
	Motivation der Mitarbeiter

Tabelle 3: Haupt- und Unterziele der Nutzwertanalyse für die laserintegrierte Komplettbearbeitung.

Unter Berücksichtigung der genannten Haupt- und Unterziele werden nun bei der eigentlichen Nutzwertanalyse die Punkte für jedes Zielkriterium der beiden Fertigungsstrategien vergeben. Als Endergebnis erhält man dann den gesuchten Gesamtnutzwert. Für die Bewertung der Anforderungen liegt das Punktesystem nach VDI-Norm 2225 zugrunde. Je nach Erfüllungsgrad der Anforderungen werden bei diesem System Punkte von 0 bis 4 vergeben:

- 0 - unbefriedigende Forderungserfüllung
- 1 - ausreichende Forderungserfüllung

- 2 - befriedigende Forderungserfüllung
- 3 - gute Forderungserfüllung
- 4 - sehr gute Forderungserfüllung.

Die vollständige Nutzwertanalyse ist anhand eines Kleinserienteils in Tabelle 4 (Kapitel 3.2.3) dargestellt.

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, daß eine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsanalyse, die sowohl die monetären Kosten als auch den nicht monetär erfaßbaren Nutzen berücksichtigt, auf drei Arten erfolgen kann.

Eine Möglichkeit ist es, die Wirtschaftlichkeit der Projektalternativen als ein Teilziel innerhalb der Nutzwertanalyse vorzusehen. Dadurch ist im Gesamtnutzwert auch eine Aussage über die monetären Kosten enthalten.

Die zweite Möglichkeit ist die duale Bewertung der Projektalternativen. Dabei werden die monetären Kosten und der Nutzwert nicht miteinander verknüpft, sondern getrennt voneinander bewertet. Dem Analytiker bleibt es dann selbst überlassen, ob er hierbei den Schwerpunkt auf die Nutzwertanalyse (Zielerfüllung) oder die Kostenrechnung legt.

Eine dritte Möglichkeit bietet die Kosten-Wirksamkeits-Analyse. Sie wird in den Fällen angewendet, bei denen die Kosten relativ gut in Geldwerten ermittelt werden können, aber der geldmäßige Wertmaßstab beim Nutzen fehlt. Dabei wird der Quotient aus dem Grad der Zielerfüllung (Ergebnis aus der Nutzwertanalyse) und den Kosten gebildet. Das Ergebnis daraus ist eine Art Aussage im Sinnes eines Wirkungsgrades.

3.2.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel eines Serienteils

Bei dem in Bild 14 dargestellten Teil findet eine Verfahrenssubstitution statt: der Fertigungsschritt Einsatzhärten wird durch den Arbeitsgang Laserhärten ersetzt. Bislang wird der Arbeitsgang „Härten“ bei einer externen Firma durchgeführt. Dazu müssen die Teile aus der Fertigungskette ausgeschleust, transportiert und nach der Rückkehr nochmals kontrolliert werden. Dadurch verlängert sich die Durchlaufzeit dieser Teile um mehrere Tage. Beim Einsatzhärten wird die gesamte Werkstückoberfläche gehärtet, obwohl für die Funktion nur ein Härten des Innenzylinders und des Sitzes erforderlich ist.

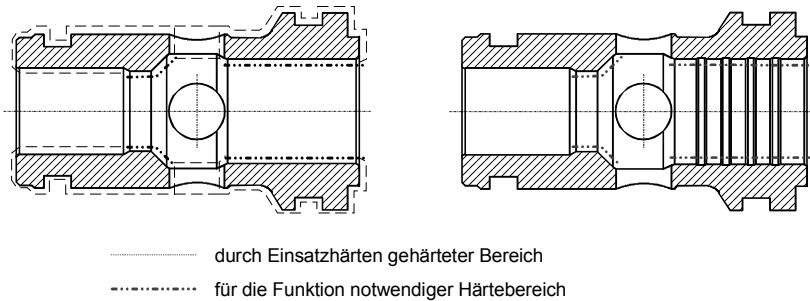


Bild 14: Hydraulik Serienteil (links: konventionell für Einsatzhärten; rechts: neu für Laserhärten).

Für einen erfolgreichen Einsatz des Laserhärtens ist es notwendig, die Arbeitsreihenfolge umzustellen, da der Laserhärteprozeß verfahrensbedingt nur unter Ausnutzung der Selbstabschreckung realisiert werden kann. Dies bedeutet, daß genügend kaltes Materialvolumen zur Verfügung steht, damit die hoch erhitze oberflächennahe Zone ausreichend schnell abgekühlt wird. Außerdem war es notwendig, das Ausgangsmaterial, einen Einsatzstahl (16 Mn Cr 5), durch einen Werkstoff zu ersetzen, der von sich aus härtbar ist; hier 42 Cr Mo 4. Eine weitere Forderung besteht darin, die Buchsenlauffläche in Achsrichtung ohne Härteeinbrüche zu härten. Eine konstruktive Änderung durch das Einbringen von mehreren Ringnuten an der Innenseite war dazu notwendig.

Durch die laserintegrierte Fertigung kann die Anzahl der Arbeitsgänge um 25 % reduziert werden (s. Bild 15). Es zeigt sich, daß eine Fertigung mit weniger Aufmaß für die Nachbearbeitung durch die neue Fertigungstechnologie möglich ist, da durch das Laserhärten weniger Verzug als beim Einsatzhärten entsteht. Dadurch verkürzen sich ebenfalls die nachfolgenden Arbeitsgänge deutlich. Bei einem Kostenvergleich der konventionellen Fertigung mit der laserintegrierten Fertigung ergibt sich eine Kosteneinsparung von mindestens 20 %. Die Durchführung einer Nutzwertanalyse ist für dieses Bauteil somit nicht erforderlich.

Technologie alt:	Technologie neu:
AG 1 Drehen	AG 1 Drehen, Härten mit Laser
AG 2 Waschen	AG 2 Thermisches Entgraten
AG 3 Thermisches Entgraten	AG 3 Kontrolle
AG 4 Einsatzhärten	AG 4 Schleifen innen (0,1 mm Aufmaß)
AG 5 Eingangskontrolle	
AG 6 Schleifen innen/außen (0,2 mm Aufmaß)	

Bild 15: Gegenüberstellung der Arbeitsgänge bei einem Hydraulik-Serienteil (links: konventionell für Einsatzhärten; rechts: neu für Komplettbearbeitung).

3.2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Beispiel eines Einzelteils

Bei dem in Bild 16 dargestellten Messerkopf, einem Einzel- bzw. Kleinserienteil, wurde das Induktionshärten durch das Verfahren Laserhärten substituiert. Dabei steht besonders die Einsparung von Werkzeugen (insbesondere des Induktors zum Induktionshärten) und die Verringerung des Logistikaufwandes im Vordergrund. Weiterhin verringert sich die Anzahl der notwendigen Arbeitsstationen, da mehrere Arbeitsgänge in einer Maschine zusammen durchgeführt werden können. Als Folge davon kann die Durchlaufzeit um ein Drittel der ursprünglichen reduziert werden (s. Bild 17).

Die Stückkosten sind jedoch im Vergleich zur konventionellen Fertigung um etwa 25 % höher. Hier tritt das Hauptproblem der Kostenbewertung einer laserintegrierten Komplettbearbeitung deutlich hervor und liegt in der üblichen Maschinenstundensatzrechnung nach VDI-Richtlinie 3528 begründet, bei der mit Gemeinkostenzuschlägen kalkuliert wird.

Daraufhin wurde die in Kapitel 3.2.1 vorgestellte Nutzwertanalyse auf den Fertigungsprozeß dieses Bauteiles angewandt. Die Bewertung der einzelnen Teilziele ist für beide Fertigungsverfahren in Tabelle 4 aufgezeigt. Der Nutzwert der herkömmlichen Bearbeitung liegt bei diesem Kleinserienteil bei ungefähr 36 % wohingegen mit der laserintegrierten Komplettbearbeitung ein Nutzwert von nahezu 90 % erreicht werden kann.

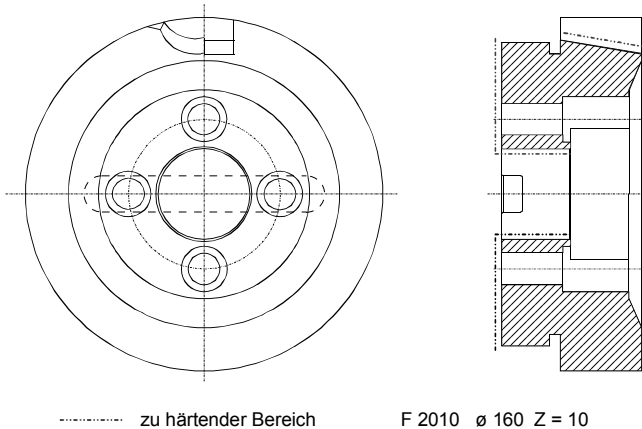


Bild 16: Beispielteil – Messerkopf.

Technologie alt:		Technologie neu:	
AG 1	Absägen	AG 1	Absägen
AG 2	NC-Drehen	AG 2	NC-Drehen
AG 3	Induktionshärten der Nabe		Härten der Nabe Härten der Bohrung
AG 4	Montieren des Drehkörpers	AG 3	Montieren des Drehkörpers
AG 5	NC-Vor- und Fertigfräsen	AG 4	NC-Vor- und Fertigfräsen, Entgraten der Nut, Härten Spanraum
AG 6	Demontieren Fräser	AG 5	Demontieren Fräser
AG 7	Entgraten der Nut	AG 6	Laserbeschriften
AG 8	Induktionshärten Spanraum	AG 7	NC-Fertigschleifen Bohrung
AG 9	Induktionshärten der Bohrung		
AG 10	Laserbeschriften		
AG 11	NC-Fertigschleifen der Bohrung		

Bild 17: Gegenüberstellung der Arbeitsgänge bei einem Messerkopf (links: konventionell für Induktionshärten; rechts: neu für Komplettbearbeitung).

Nutzwertanalyse	Gewichtung		alte Bearbeitung		Komplett-bearbeitung	
	Anteil	Faktor	Punkte	Teilnutzen	Punkte	Teilnutzen
Hauptziele	70%					
kurze Durchlaufzeiten	16,67%	0,1167	2	0,0583	4	0,1167
hohe Termintreue und Lieferbereitschaft	16,67%	0,1167	3	0,0875	4	0,1167
geringe Umlaufkapitalbindung und Zinsdienst	16,67%	0,1167	1	0,0292	4	0,1167
Flexibilität bzgl. Teilegeometrieänderung	16,67%	0,1167	1	0,0292	3	0,0875
Flexibilität bzgl. der Bearbeitungsverfahren	16,67%	0,1167	1	0,0292	4	0,1167
Vermeidung von Fremdfertigung	16,67%	0,1167	1	0,0292	3	0,0875
Unterziele	30%					
kurze Rüst-, Lager- und Transportzeiten	12,50%	0,0375	1	0,0094	4	0,0375
schnelle Einführung neuer Produkte	12,50%	0,0375	2	0,0188	3	0,0281
übersichtlicher Materialfluß, verbesserte Logistik	12,50%	0,0375	1	0,0094	3	0,0281
geringer Transportbedarf	12,50%	0,0375	1	0,0094	3	0,0281
hohe Bearbeitungsqualität	12,50%	0,0375	2	0,0188	4	0,0375
zukunftsorientierte Technologie	12,50%	0,0375	1	0,0094	3	0,0281
Senkung der Lohnnebenkosten	12,50%	0,0375	1	0,0094	3	0,0281
Motivation der Mitarbeiter	12,50%	0,0375	1	0,0094	3	0,0281
Summe	100%	1,0	19	0,3563	48	0,8854
Nutzwertfaktor			1	35,63%	2,5	88,54%

Tabelle 4: Nutzwertanalyse einer laserintegrierten Komplettbearbeitung am Beispiel eines Kleinserienteiles.

4 Fasergeführte Integration in konventionelle Fräszentren

Mit Hilfe der laserintegrierten Fertigungstechniken sind Just-in-time-Produktion, kleine Losgrößen, kürzere Innovationszyklen und eine weitgehende Komplettbearbeitung wirtschaftlich möglich. Die aus den Ergebnissen der laserintegrierten Komplettbearbeitung in Drehzentren abgeleiteten Vorteile in einer Fertigung berechtigen den Einsatz von Lasern zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Fräs-/ Bohrzentren.

Die Vorstellungen und Konzepte zur Integration des Lasers in Fräszentren werden dabei konstruktiv derart umgesetzt, daß der Laser nicht nur als ein den Zerspanungsprozeß unterstützendes Werkzeug fungiert, sondern auch ein Werkzeug für zusätzliche Fertigungsverfahren (s. Bild 5) bildet [102], [103]. Es erfolgt aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit eine Konzentration auf fasergeführte Integrationsmöglichkeiten für Nd:YAG-Laser.

Der Bedarf an solchen Maschinen bzw. die Anzahl der unterschiedlichen Applikationen für solche Maschinen ist gegeben und wird in Kapitel 4.5 beispielhaft diskutiert.

4.1 Allgemeine Randbedingungen

Beim Fräsen und Bohren wird im Unterschied zum Fertigungsverfahren Drehen die notwendige Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück durch eine kreisförmige Schnittbewegung des Werkzeuges und eine senkrecht oder schräg zur Drehachse des Werkzeuges verlaufende Vorschubbewegung erzielt. Die Werkzeugschneide ist dabei nicht ständig im Eingriff und unterliegt daher thermischen und mechanischen Wechselbelastungen.

Das Werkzeug ist hier fest in das komplexe System Hauptspindel eingebettet. Damit für die unterschiedlichen Fertigungsaufgaben die jeweils passenden Werkzeuge eingesetzt werden können, sind diese mit der Spindel über eine genormte mechanische Schnittstelle verbunden. Bei Bearbeitungszentren mit automatischem Werkzeugwechsel handelt es sich um Steilkegelschäfte (SK) nach DIN 69871 oder um Hohlchaftkegel (HSK) nach DIN 69893. Letztere werden seit einiger Zeit bevorzugt verwendet, da sie einen genaueren Sitz und höhere statische und dynamische Steifigkeiten garantieren [104]. Die Werkzeughalter werden über eine in die Hauptspindel integrierte Spannvorrichtung in den Spindelkopf eingezogen. Die meisten Bearbeitungszentren sind mit einer zusätzlichen internen Kühlmittelzufuhr (IKZ) ausgerüstet, damit der Kühlschmierstoff während des Zerspanprozesses besonders gezielt an der Werkzeug-

schneide zur Verfügung steht. Die Kühlmittelübertragung vom Maschinengestell auf das rotierende und zur Werkzeugspannung axial bewegte Spannsystem erfolgt dabei mittels einer Drehdurchführung. Diese dynamische Dichtstelle wird als Gleitringdichtung [105] realisiert. Die genannten Maschinenelemente sind in Bild 18 dargestellt.

Die Hauptaufgabe bei der Integration des Lasers in Bearbeitungszentren besteht darin, die Laserstrahlung und die entsprechenden Prozeßgase in das Werkzeug zu transportieren und am Werkstück selbst verfügbar zu halten. Bei der Integration in Drehzentren läßt sich dies relativ einfach bewerkstelligen, da die einzelnen Werkzeuge feste Positionen auf dem Werkzeugrevolver einnehmen. Die Laserstrahlzufuhr kann dabei über eine Glasfaser in den Arbeitsraum erfolgen (s. Bild 7). Eine technisch weitaus bessere Lösung ist ein Werkzeugrevolver mit Innenstrahlführung, ähnlich der in Bild 8 gezeigten Realisierung. Dies würde auch den Einsatz von CO₂-Lasern wesentlich vereinfachen. Bei der Integration in Bearbeitungszentren indessen liegt die Schwierigkeit darin, daß der Werkzeugwechselforgang durch die notwendigen Elemente für Laserstrahlführung und Prozeßgaszufuhr nicht beeinträchtigt werden darf.

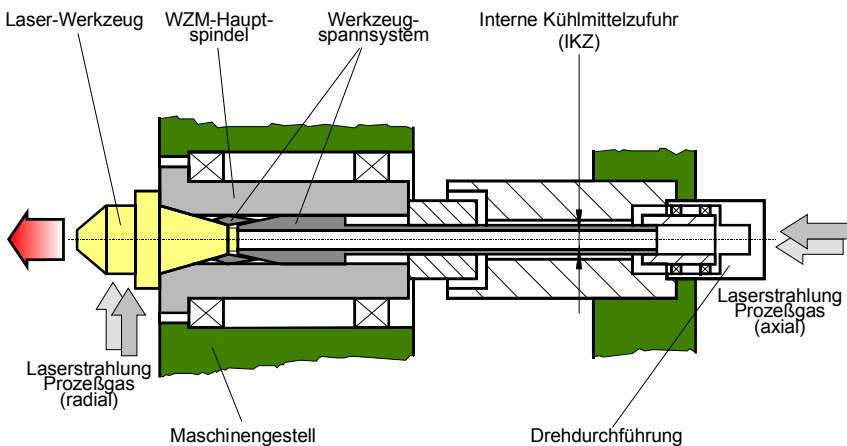


Bild 18: Schematische Darstellung der radialen und axialen Strahlzufuhr in Fräs-/Bohrzentren mit Schnittstelle zwischen Strahlführung und Bearbeitungsoptik.

In Bild 18 sind die bei üblichen Hauptspindelsystemen technisch sinnvollen Orte für eine Zuführung von Laserstrahlung und Prozeßgas (durch Pfeile) dargestellt:

- Die *radiale Zufuhr* der verschiedenen Medien in das Werkzeug erfolgt im Arbeitsraum des Bearbeitungszentrums.

- Bei der *axialen Zufuhr* durch die Spindel wird das durchbohrte Werkzeugspannsystem genutzt. Die Einkopplung der Laserstrahlung und die Prozeßgas-einleitung erfolgt im Bereich der Drehdurchführung.

Unabhängig von dem Ort der Zuführung werden im folgenden zunächst die Anforderungen aufgeführt, die generell an die Integration von Lasern in Fräs-/ Bohrzentren gestellt werden:

- Die verschiedenen Laserwerkzeuge (an die Bearbeitungsaufgabe angepaßte Optiken zur Strahlformung) müssen wie Fräs- und Bohrwerkzeuge automatisch aus dem Werkzeugspeicher in die Hauptspindel eingewechselt werden können.
- Die Veränderungen an der Maschine sollen so gering wie möglich sein, d.h. die konventionelle Bearbeitung darf durch die Bauelemente zur Laserintegration und Prozeßgaszufuhr nicht wesentlich eingeschränkt werden.
- Die innere Kühlschmierstoffzufuhr (IKZ) muß in ihrer Funktion erhalten bleiben.
- Die Übertragung mindestens eines Prozeß- bzw. Schutzgases muß möglich sein, wobei auf absolute Fettfreiheit von Lagerstellen bei der Verwendung von Sauerstoff zu achten ist.
- Die gesteuerte Drehung der C-Achse (Hauptspindel) muß zum Antrieb von Drehoptiken genutzt werden können.
- Die Integration soll so ausgeführt werden, daß Glasfasern zur Strahlführung verwendet werden können. Eine Leistungsübertragung von mindestens 2 kW muß gewährleistet sein.

Zu berücksichtigen ist, daß die für die IKZ genutzte Bohrung im Werkzeugspannsystem eng begrenzt ist und der typische Durchmesser lediglich zwischen 5 mm und 6 mm beträgt.

4.2 Konstruktive Konzepte der radialen Zufuhr

Die im folgenden aufgeführten Varianten einer radialen Zufuhr von Laserstrahlung und Prozeßgas an die mechanische Schnittstelle zwischen Werkzeug und Maschine sind besonders dann geeignet, wenn zu einem späteren Zeitpunkt Bearbeitungszentren mit der Möglichkeit der Laserbearbeitung ausgestattet, d.h. nachgerüstet, werden sollen.

4.2.1 Feste Glasfaser- und Gasankopplung am Laserwerkzeug

Ein besonders einfaches Lösungskonzept, bei dem die Laser-Werkzeuge stets fest mit der jeweiligen Glasfaser und einer weiteren Leitung für Prozeß- und/ oder Schutzgas verbunden sind, zeigt Bild 19. Über Strahlweichen wird die Laserstrahlung dem im Einsatz befindlichen Laserwerkzeug zugeschaltet. Die Laser- und Prozeßgaszufuhr erfolgt im Arbeitsraum radial am Werkzeug. Der Werkzeugwechsel muß in diesem Fall über eine möglichst einfache, lineare Greiferbewegung nach oben erfolgen, z. B. mittels einer Portalbelastung, so wie dies bereits für den Bereich der Drehmaschinen in [84] diskutiert wurde. Um zu verhindern, daß sich die einzelnen Glasfasern und Schläuche ineinander verwirren, werden die Zuleitungen durch einen Federzug nach oben abgespannt; außerdem ist das Werkzeugmagazin starr, und die Zuordnung der Werkzeuge auf die Magazinplätze erfolgt durch den Werkzeugwechsler.

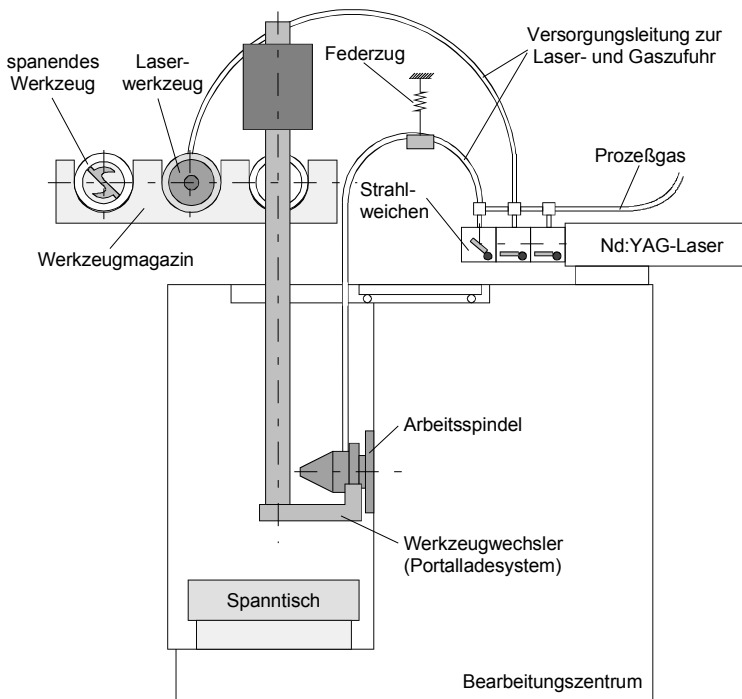


Bild 19: Schematische Darstellung der Laserintegration in ein Bearbeitungszentrum mit fester Laser- und Gasankopplung an das Laserwerkzeug.

Der wesentliche Vorteil der hier dargestellten Lösung liegt darin, daß die ansonsten erforderlichen optischen und mechanischen, automatisch lösbaren Schnittstellen zwischen Laser- und Gaszufuhr einerseits und Laserwerkzeugen andererseits entfallen. Weiterhin müssen diese Schnittstellen nicht durch aufwendige konstruktive Maßnahmen gegen Verschmutzung geschützt werden. Die konstruktive Auslegung des Laserwerkzeuges gestaltet sich relativ einfach (Bild 20), ist modular aufbaubar und leicht rekonfigurierbar.

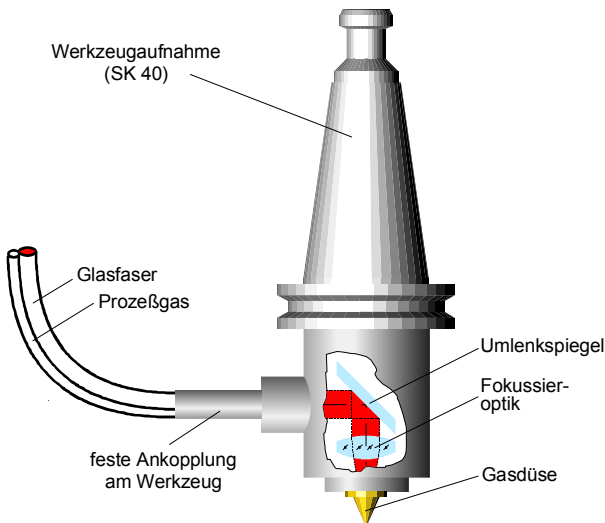


Bild 20: Laserwerkzeug mit fester Ankopplung von Glasfaser und Prozeßgasleitung.

Die Nachteile dieser Konzeptvariante liegen in den hohen Investitionskosten sowie in der Übertragbarkeit auf bereits bestehende Bearbeitungszentren. Diese sind heute zu meist mit einem kompakten und gegenüber dem Arbeitsraum abgeschlossenen Ketten- oder Trommel-Werkzeugmagazin [106] ausgestattet, das zusammen mit einer oft komplizierten Werkzeugwechslerbewegung den Einsatz von Werkzeugen mit daran befestigten Zuleitungen ausschließt. Weiterhin sind bei diesem Lösungsansatz die Werkzeugwechselzeiten und dadurch der Einfluß auf die unproduktiven Nebenzeiten sehr hoch.

Um eine Laserintegration an bestehenden Bearbeitungszentren durchführen zu können, müssen deshalb optische und mechanische Schnittstellen zwischen Laserstrahl- und Prozeßgasführung und den einwechselbaren Laserwerkzeugen vorgesehen werden. Diese dürfen den automatischen Werkzeugwechselvorgang in keiner Weise beein-

trächtigen. Unterschiedliche Konzeptvarianten werden entsprechend der in Bild 18 gezeigten Prinzipien in den folgenden Abschnitten detailliert vorgestellt.

4.2.2 Integration mit automatisch lösbaren Schnittstellen

Eine weitere Möglichkeit der Laserintegration in bestehende Bearbeitungszentren besteht in der Laserstrahlführung über einen geeigneten automatischen lösbaren Koppelmechanismus direkt an das Laserwerkzeug. Hierbei sind sowohl die optischen als auch die mechanischen Schnittstellen zu beachten. Diese müssen so gestaltet werden, daß sie den Werkzeugwechsel nicht beeinträchtigen. Bei dieser Möglichkeit ergeben sich bei allgemeiner Betrachtung folgende Vor- und Nachteile:

- Vorteile:
- Relativ einfache und schnelle Möglichkeit der Realisierung.
 - Die Verwendung handelsüblicher Glasfasersysteme ist möglich.
 - Keine konstruktiven Eingriffe am Spindelsystem sind notwendig.
 - Die innere Kühlmittelzufuhr bleibt vollständig erhalten.
- Nachteile:
- Eine geringfügige Beeinträchtigung des Arbeitsraumes ist vorhanden.
 - Ein Schutz der Strahlführung und des Koppelmechanismus vor Verschmutzung durch Späne und Kühlschmierstoff ist erforderlich.
 - Die Laserwerkzeuge werden relativ voluminös und kompliziert (Umlenkspiegel etc.).
 - Die Realisierung von rotierenden Strahlformungsoptiken wird erschwert.
 - Je nach Komplexität der Maschinenkinematik ist ein optionaler Einsatz von CO₂-Lasern nahezu unmöglich.

Drei Lösungsvarianten zur seitlichen (radialen) Strahleinkopplung werden in den nachfolgenden Prinzipskizzen dargestellt sowie ihre Vor- und Nachteile diskutiert. Allen Lösungen gemeinsam ist die Strahlführung mittels Glasfaser in den Arbeitsraum und die Befestigung in einem am Maschinengestell befestigten Koppelbaustein.

Variante 1:

Bei der radialen Strahlzufuhr (Bild 21) wird der kollimierte Laserstrahl bereits im Koppelbaustein um 90° in Richtung der Spindelachse umgelenkt. Die optische Achse

des Laserstrahles und die Spindelachse haben einen axialen Versatz zueinander. Die Fokussierung des Laserstrahles erfolgt im Laserwerkzeug.

- Vorteile:
- Die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der C-Achse (gesteuerte Spindel-Drehachse) sind relativ gering.
 - Der Koppelbaustein beansprucht wenig Platz im Arbeitsraum des Bearbeitungszentrums.
- Nachteile:
- Der Raum in axialer Richtung für den Koppelbaustein zur Unterbringung von Umlenkspiegel, Justageeinrichtungen und Schutzvorrichtungen ist stark beschränkt.
 - Die Laserwerkzeuge bauen in radialer Richtung sehr groß, so daß die zulässigen Werkzeugdurchmesser, vorgegeben durch das Werkzeugwechselsystem und das Werkzeugmagazin, schnell erreicht werden.
 - Bei üblichen Maschinensteuerungen kann ein axialer TCP-Versatz gegenüber der Hauptspindelachse nur sehr schwer berücksichtigt werden. (Oftmals muß dann der Laserstrahl mittels zwei weiterer Spiegel koaxial in die Spindelachse umgelenkt werden.)

Variante 2:

Bei dem in Bild 22 dargestellten Lösungsansatz wird der kollimierte Laserstrahl dem Laserwerkzeug ebenso radial zugeführt, jedoch erst im Werkzeug selbst in Höhe der Spindelachse um 90° umgelenkt. Strahlachse und Hauptspindelachse liegen somit koaxial zueinander.

- Vorteile:
- Der maximal zulässige Werkzeugdurchmesser kann in jedem Fall eingehalten werden.
 - Für die Umlenkung des Laserstrahles koaxial zur Spindelachse ist nur ein Spiegel erforderlich.
 - Mit dem Werkzeugwechselvorgang kann beim Einziehen des Werkzeuges in die Spindel ein Schutzschieber geöffnet werden und dadurch die automatische Ankopplung von Laserstrahlung und Prozeßgas erfolgen.
- Nachteile:
- Die C-Achse muß eine hohe Wiederholgenauigkeit besitzen, da-

mit die optische Achse des Koppelbausteines und die des Laserwerkzeuges ineinander fluchten.

- Der Koppelbaustein nimmt mehr Raum in Anspruch als bei dem in Bild 21 dargestellten Konzept.
- Da das Laserwerkzeug und der Koppelbaustein ineinandergreifen, ragt dieser in den Bereich des maximal möglichen Werkzeugdurchmessers hinein; spanende Werkzeuge mit großem Durchmesser müssen deshalb gegebenenfalls verlängert werden.

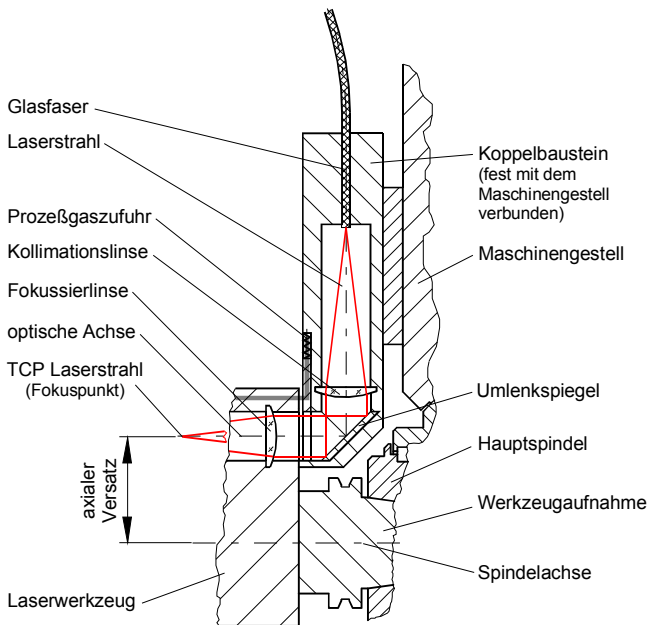


Bild 21: Seitliche Ankopplung der Laserstrahlung und Strahlzufuhr in das Laserwerkzeug mit axialem Versatz zur Hauptspindelachse.

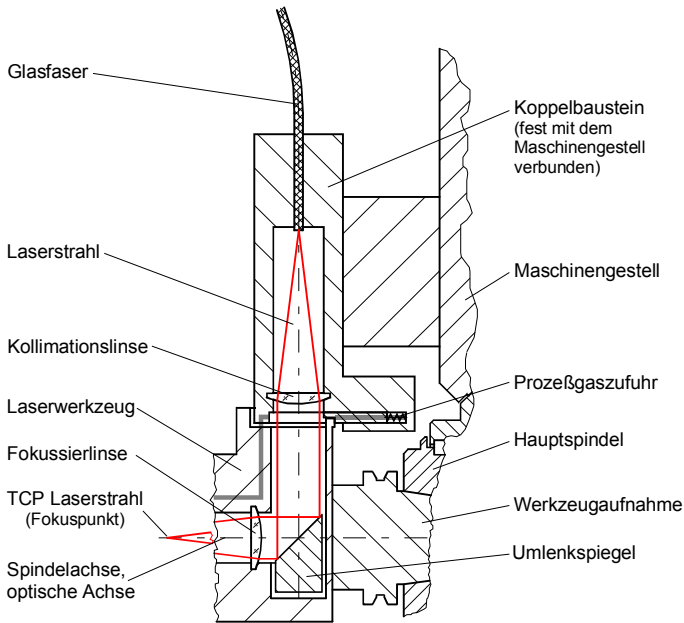


Bild 22: Seitliche Ankopplung der Laserstrahlung und radiale Strahlführung in das Laserwerkzeug.

Variante 3:

Die dritte Variante (Bild 23) entspricht weitgehend dem in Bild 22 dargestellten Prinzip. Im Unterschied dazu wird hier der Koppelbaustein auf einer Linearachse befestigt, die es erlaubt, diesen während der spanenden Bearbeitung aus dem unmittelbaren Arbeitsraum des spanenden Werkzeuges herauszufahren und damit die Verschmutzung zu vermindern.

- Vorteile:
- Vorteile des vorherigen Prinzips (Bild 22).
 - Der Koppelbaustein läßt sich über eine Linearachse aus dem Bearbeitungsraum in unmittelbarer Nähe des Werkzeuges herausfahren.
 - Der zulässige Werkzeugdurchmesser kann bei spanender Bearbeitung auch ohne Werkzeugverlängerung voll ausgenutzt werden.

- Nachteile:
- Die C-Achse muß eine hohe Wiederholgenauigkeit besitzen, da-

mit die optischen Achse des Koppelbausteines und die des Laserwerkzeuges zueinander fluchten.

- Die zusätzliche Linearachse erfordert viel Bauraum und Entwicklungsarbeit für Antrieb, Steuerung, Führung etc.

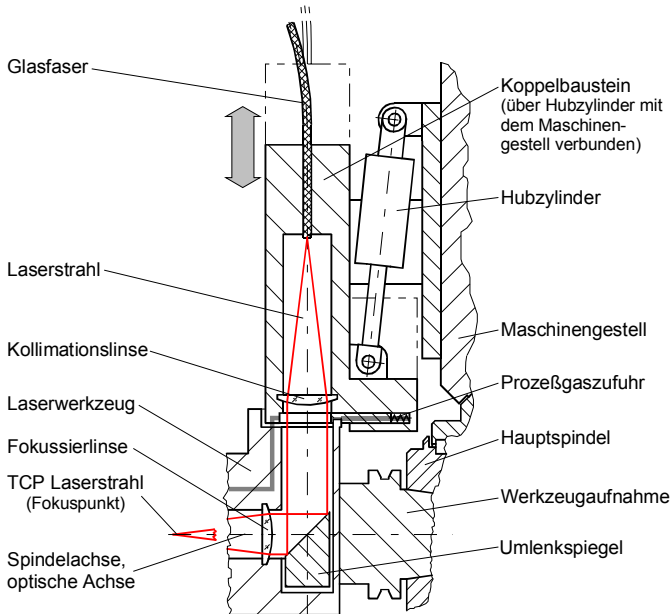


Bild 23: Seitliche bewegliche Ankopplung der Laserstrahlung mit Linearachse und radiale Strahlzufuhr in das Laserwerkzeug.

Die Ankopplung der Gaszufuhr (Prozeßgas, Schutzgas) in das Werkzeug kann bei allen drei Varianten prinzipiell zentral durch die Hauptspindel (Benutzung der IKZ) oder ebenfalls seitlich, parallel mit der Laserstrahlung, erfolgen. Die Gaszufuhr durch den Kanal der internen Kühlmittelzufuhr erweist sich hier jedoch als ungünstig, da dieser nach dem Zerspanungsprozeß äußerst sauber ausgeblasen werden muß, um eine Verunreinigung der Laseroptik durch Restpartikel von Kühlschmierstoff zu verhindern. Bei der seitlichen Zufuhr des Gases parallel zur Laserstrahlung erfordert die Ankopplung der Gaskanäle kaum zusätzlichen Aufwand und erweist sich dichtungstechnisch als unproblematisch. Das komplexe Werkzeugmaschinen-Spindelsystem samt innerer

Kühlmittelzufuhr bleibt somit unverändert.

4.2.3 Beispielhafte Integration in das Fräs-/ Bohrzentrum MAHO MH 600C

Bei dem Fräs-/ Bohrzentrum MAHO MH 600C handelt es sich um ein 4-achsiges Bearbeitungszentrum mit drei NC-gesteuerten Linearachsen (X, Y, Z) und einem NC-gesteuerten Rundtisch (B-Achse). Der schematische Aufbau des Bearbeitungszentrums mit den einzelnen Baugruppen (ohne B-Achse) ist in Bild 24 dargestellt. Als Besonderheit verfügt dieses Bearbeitungszentrum über eine vertikale und eine horizontale Arbeitsspindel, die in Kombination mit dem Schwenkfräskopf, direkt von der CNC gesteuert, wechselweise zum Einsatz kommen. Beide Spindeln sind mit der Möglichkeit zur inneren Kühlmittelzufuhr ausgestattet. Das Werkzeugmagazin ist als Kettenmagazin aufgebaut und bietet dreißig Werkzeugen mit einem Durchmesser von 80 mm Platz (maximale Durchmesser von 130 mm sind möglich, wenn benachbarte Plätze nicht belegt werden).

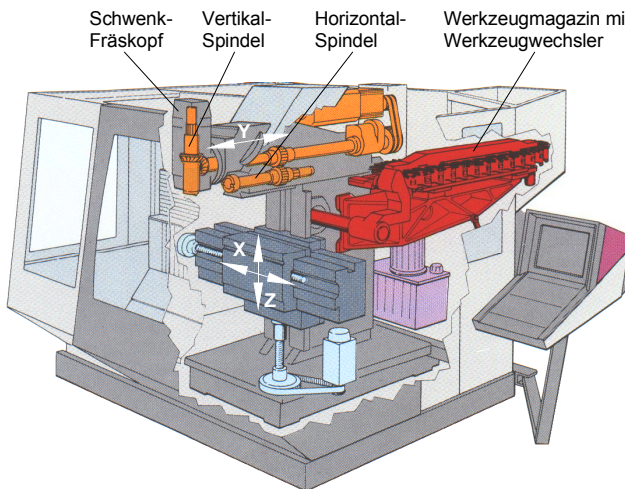


Bild 24: Schematische Darstellung des Bearbeitungszentrums MAHO MH 600C.

Die konstruktive Ausführung der fasergeführten Integration eines 2 kW Nd:YAG-Lasers wurde nach dem in Bild 22 diskutierten Konzept durchgeführt. Neben den in 4.1 beschriebenen allgemeinen Randbedingungen mußten noch die weiteren spezielle Anforderungen berücksichtigt werden:

- Ausrüstung der horizontalen und vertikalen Arbeitsspindel mit der Zusatzeinrichtung für eine Laserintegration.
- Für beide Arbeitsspindeln müssen die gleichen Laserwerkzeuge verwendbar sein.
- Berücksichtigung der Maschinenkinematik und insbesondere der Bewegung des Schwenkfräskopfes.
- Aufbau der verschiedenen Laserwerkzeuge auf Steilkegel SK 40 nach DIN 69871 mit Werkzeuganzugsbolzen nach ISO 7388/1/2 Typ B.
- Berücksichtigung der Werkzeugwechselbewegung bei der Gestaltung der Laserwerkzeuge (max. Durchmesser 180 mm).

Die konstruktive Ausführung und Bezeichnung der einzelnen Baugruppen, mit der vertikalen Arbeitsspindel im Einsatz, ist schematisch in Bild 25 dargestellt. Die Elemente der horizontalen und vertikalen Strahl- und Gaszufuhr bleiben beim Wechsel der Arbeitsspindel stets mit der Maschine verbunden. Bild 26 zeigt den Schwenkfräskopf in Aktion beim Wechsel der Arbeitsspindel mit den Bauelementen der Integration.

Die Konstruktion wurde modular ausgeführt, wobei die einzelnen Baugruppen sowohl für die vertikale als auch für die horizontale Achse völlig identisch sind. Die wesentlichen Baugruppen sind:

- Laserwerkzeug mit Umlenkspiegel und Fokussierlinse (optional),
- Koppelbaustein mit Justiervorrichtung und Schutzschieber,
- Umlenkblock,
- Faserankopplung mit Justierung zur Aufnahme des HAAS-Fasersteckers.

Zur Anpassung an die Umgebung der jeweiligen Arbeitsspindel sind weitere Elemente wie Distanzrohre und Befestigungsplatten notwendig.

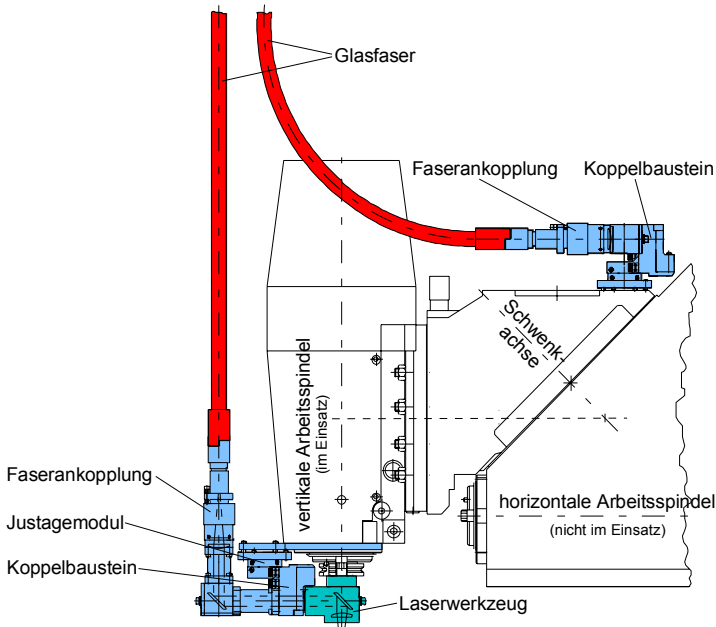


Bild 25: Baugruppen der Laserintegration am Bearbeitungszentrum MAHO MH 600C.

Die konstruktive Anordnung der optischen Bauelemente orientiert sich an einem in einer Drehmaschine zum Einsatz kommenden Laserwerkzeug [90]. Die erste Linse ($f=80\text{ mm}$) kollimiert den divergenten Laserstrahl auf einen Durchmesser von 14 mm. Wichtig für den unproblematischen Einsatz der Laserwerkzeuge in beiden Spindeln ist, daß die Strahlwege identisch und somit gleiche Voraussetzungen bei der Strahlformung gegeben sind.

Die Zuführung von Prozeß- und/ oder Schutzgas erfolgt sowohl im Koppelbaustein als auch im Laserwerkzeug getrennt vom Strahlengang über zwei separate Kanäle ($\varnothing=5\text{ mm}$). Ein hoher Durchsatz von gleichzeitig zwei verschiedenen Gasarten bei hohen Drücken wird ermöglicht.

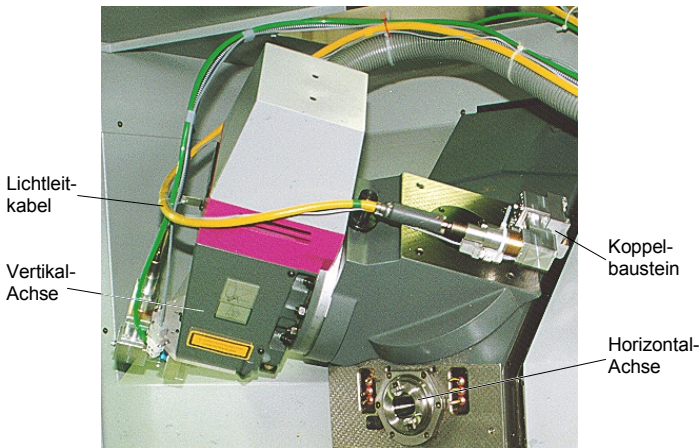


Bild 26: Wechsel der Arbeitsspindel.

Die mechanisch optische Schnittstelle zwischen Koppelbaustein (s. Bild 27) und Laserwerkzeug ist im Bereich des kollimierten Strahlenganges. Dadurch ergibt sich eine Öffnung mit vollem Aperturdurchmesser von 20 mm im Koppelbaustein und Laserwerkzeug. Diese sind mit entsprechenden Schutzgläsern verschlossen. Während der spanenden Bearbeitung wird diese Stelle am Koppelbaustein zusätzlich mit einem Schutzschieber gegenüber Spänen und direkter Verschmutzung mit Kühlmittel abgedeckt. Zusätzlich verhindert die in den Zwischenraum eingeblasene Sperrluft die Ablagerung von Kühlschmierstoffnebel auf dem Schutzglas und von Spänen auf der Führungsbahn des Schutzschiebers. Dieser wird automatisch über Druckfedern geschlossen. Beim Einwechseln des Laserwerkzeuges wird dieser über die zwei Zylinderstifte am Werkzeug selbst geöffnet. Mit Hilfe der verschiedenen Justiermöglichkeiten läßt sich die Position des Koppelbaustein zum Laserwerkzeug genau einstellen.

Zur Kopplung der Gaskanäle greifen zwei gefederte Kegel am Koppelbaustein in die entsprechenden Kegelbohrungen am Laserwerkzeug ein.

Zur Gewährung der Lasersicherheit werden die Endpositionen des Schutzschiebers und die Verwendung eines Laserwerkzeuges mit Näherungs- und Sicherheitsschaltern überwacht und die Signale an die Steuerung weitergeleitet. Nur bei geöffnetem Schutzschieber und beim Einsatz eines Laserwerkzeuges in die Spindel wird der Laserstrahl freigegeben.

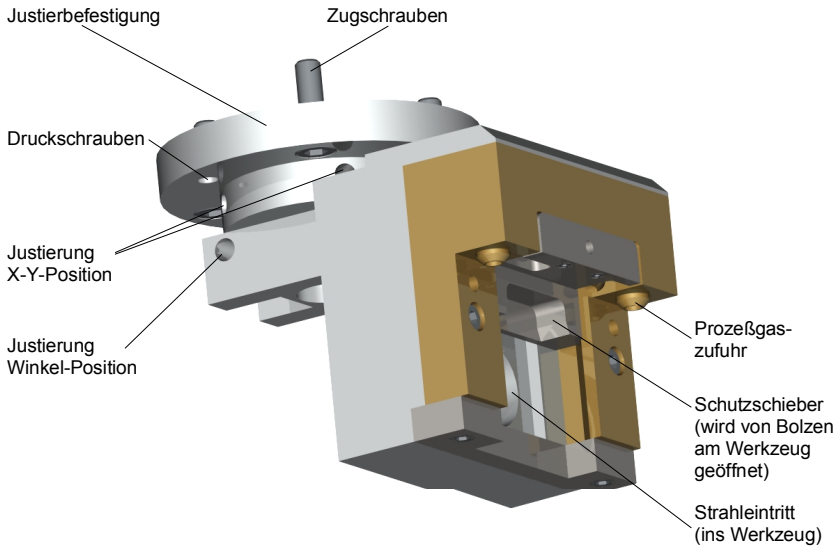


Bild 27: CAD-Darstellung des Koppelbausteins.

Das Laserwerkzeug selbst besteht aus den Komponenten Steilkegel mit Anzugsbolzen, Werkzeugkegeladapter und dem Werkzeuggrundkörper (Bild 28). In diesem ist ein 90°-Umlenkspiegel eingebaut sowie die Möglichkeit für den Einbau einer Fokussierlinse vorgesehen. Die Schnittstelle an der Unterseite des Grundkörpers (s. Bild 28) erlaubt dort andere Werkzeuge zur Strahlführung und/ oder -formung, wie zum Beispiel ein Endoskop zur Bearbeitung der Innenwandungen von Bohrungen anzubauen (Bild 29 rechts).

Ein Beispiel für einen typischen Fertigungsablauf mit den Fertigungsverfahren Fräsen, Laserhärten einer Außenfläche und Laserhärten der Oberfläche einer Bohrung sind in Bild 29 dargestellt. Mit der Integration des Lasers ist somit eine 5-seitige laserintegrierte Komplettbearbeitung in diesem Bearbeitungszentrum möglich.

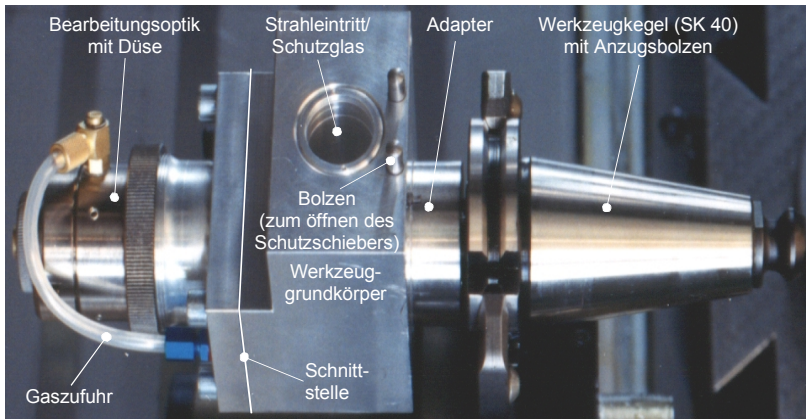


Bild 28: Aufbau eines Laserwerkzeuges.

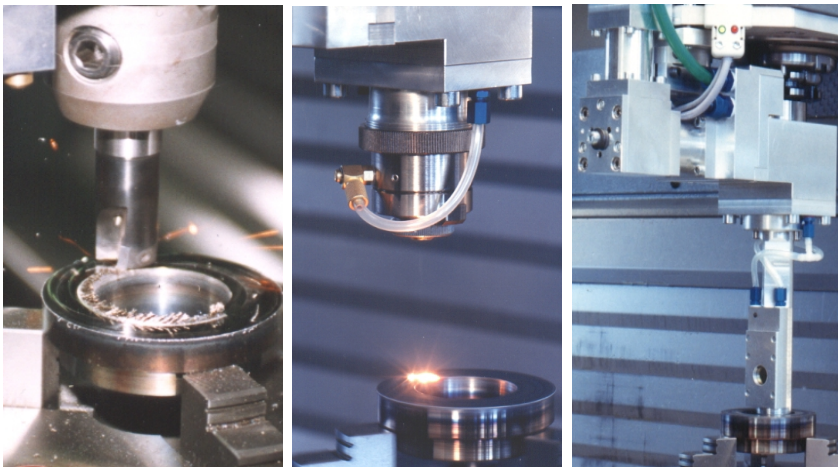


Bild 29: Fertigungsschritte einer laserintegrierten Komplettbearbeitung: Fräsen (links) und Laserhärten der Stirnfläche (mittleres Bild) sowie Laserhärten der Innenwandung der Bohrung (rechts) mit einem Endoskop in einem vierachsigen Bearbeitungszentrum.

4.3 Konstruktive Konzepte der axialen Zufuhr

Eine grundlegend andere Möglichkeit der Laserintegration in bestehende Bearbeitungszentren besteht darin, den Laserstrahl axial in der für die innere Kühlmittelzufuhr durchbohrten Hauptspindel zu führen. Das Hauptproblem bei der Innenstrahlführung stellt die Relativbewegung zwischen dem Maschinengestell und der rotierenden Spindel dar, die es nicht erlaubt, eine fest mit ihr verbundenen Glasfaser vom Laser bis zum Spindelkopf, und damit direkt zum Werkzeugende, zu verlegen. Ebenfalls ist die axiale Relativbewegung von einigen Millimetern beim Spannvorgang zu berücksichtigen.

Erschwerend wirkt sich der geringe zur Verfügung stehende Bauraum aus. Bei heutigen auf dem Markt befindlichen Werkzeugmaschinen mit IKZ beträgt der Bohrungsdurchmesser ungefähr 5 mm. Die Spindellänge variiert dabei in Abhängigkeit des Maschinenherstellers, wobei es bei der Maschine der Firma MAHO 600 mm und bei der Maschine der Firma Steinel 1150 mm sind. Ohne größere Veränderungen am Gesamtkonzept der Spindel kann diese Bohrung nicht wesentlich erweitert werden. Lediglich im vorderen Bereich der Spindel (Bereich der Spannzange) ist beim System der Firma Steinel eine Änderung möglich. Unter Berücksichtigung der Festigkeit läßt sich in diesem Verbindungsbereich ein Durchmesser von ungefähr 12 mm realisieren. Weiterhin läßt sich bei dieser Maschine der Bohrungsdurchmesser des IKZ von 5 mm auf 7 mm erweitern.

Der größte Vorteil einer internen Strahlführung liegt darin, daß der Arbeitsraum der Werkzeugmaschine frei von Komponenten der Strahlführung bleibt und dadurch keine Störkonturen entstehen und zu berücksichtigen sind. Zudem ist die Schnittstelle zum Laserwerkzeug besser vor Verschmutzung geschützt.

Es gibt verschiedene Realisierungsvarianten für eine solche Strahlführung, die sich bezüglich der Ausprägung des Überganges vom Maschinensystem zum bewegten System (Werkzeug) unterscheiden.

Variante 1:

Die Strahlführung in der Spindel und im Werkzeugspannsystem erfolgt durch freie Propagation des Laserstrahles (Bild 30). Das Lichtleitkabel wird vom Laser bis an die Drehdurchführung der Werkzeugmaschinenspindel herangeführt, der austretende Laserstrahl über ein Linsensystem kollimiert und durch die Spindelmitte zum Laserwerkzeug geleitet.

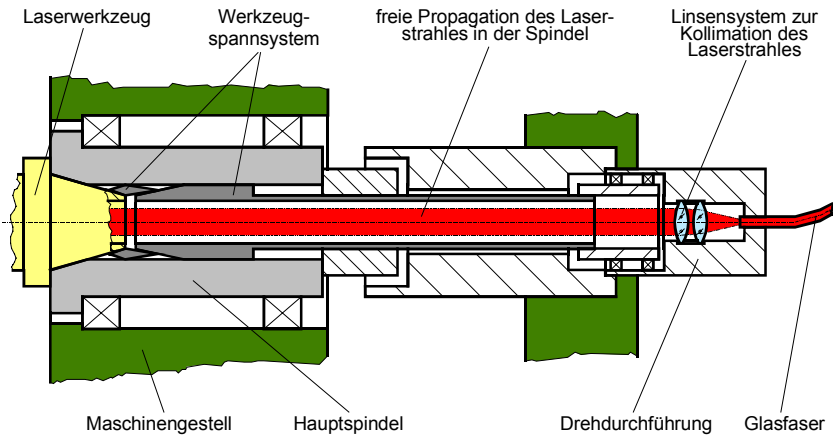


Bild 30: Strahlführung durch freie Propagation des Laserstrahls.

- Vorteile:
- Einfache konstruktive Lösung.
 - Verzicht auf eine zweite Faser in der Spindel, dadurch bessere Strahlqualität.
- Nachteile:
- Die Apertur des IKZ-Durchmessers (5 mm bzw. 7 mm) ist selbst bei guter Strahlanpassung durch ein Teleskop nicht ausreichend.

Als Berechnungsgrundlage für den Minstdurchmesser des IKZ ($2 \cdot w_{IKZ}$) gelten die Gleichung (1), die Daten der aktuellen Spindelbohrung ($L=600$ mm und $\varnothing=5$ mm bzw. $L=1150$ mm und $\varnothing=7$ mm) und das Strahlparameterprodukt des in Betracht kommenden Nd:YAG-Lasers (hier: $SPP=25$ mm·mrad). Unter der Annahme, daß die Strahltaile im Idealfall in der Mitte der Spindel (bei $\frac{1}{2} \cdot L$) liegt und der Laserstrahl in seiner radialen Ausbreitung relativ scharf begrenzt ist (s. Bild 2 im Falle der Stufenindefaser), ergibt sich dann

$$w_{IKZ} = \frac{\Theta_{Laser} \cdot w_{Laser}}{\Theta_{IKZ}} = \frac{SPP}{\arctan(2 \cdot r_{IKZ} / L_{IKZ})} \quad (16)$$

$$w_{IKZ} = 3 \text{ mm (MAHO MH 600C)}$$

$$w_{IKZ} = 4,1 \text{ mm (Steinel BZ20)}$$

Selbst in diesem idealen Grenzfall ist bereits die Strahltaile deutlich größer als die Apertur. Da der Quotient aus Strahldurchmesser und freier Apertur von üblicherweise 0,8 nicht überschritten werden sollte und der Laserstrahl nicht scharf begrenzt ist, wäre

ein Durchmesser an dieser Stelle von mindestens 7,5 mm im Falle der MAHO-Spindel, und von mindestens 10,25 mm im Falle der Steinel-Spindel für eine verlustfreie freie Propagation notwendig.

Variante 2:

Die nächste Darstellung zeigt ein Lösungskonzept bei dem eine Glasfaser vom Laser direkt durch die Spindel bis kurz vor das Laserwerkzeug geführt (Bild 31) wird. Das Lichtleitkabel wird in einem Rohr mechanisch gefaßt und in speziellen Wälzlager aufgenommen. Die Glasfaser rotiert dadurch bei der spanenden Bearbeitung nicht, so daß eine Torsion verhindert werden kann.

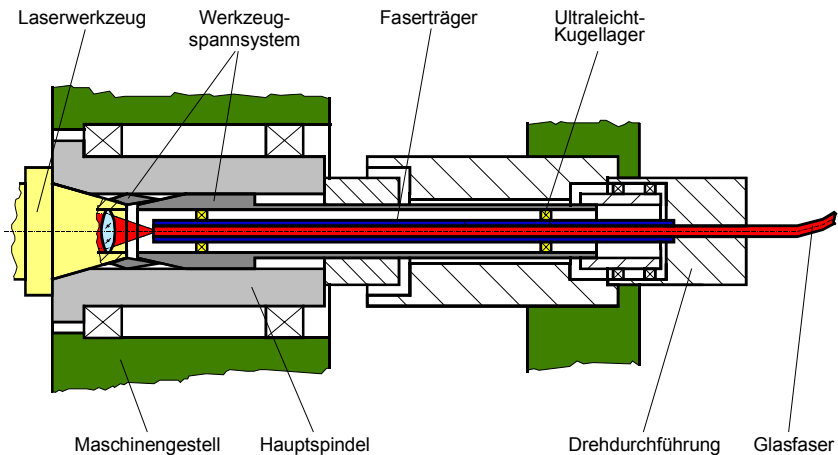


Bild 31: Strahlführung mit feststehender gelagerter Glasfaser.

- Vorteile:
- Keine Verschlechterung der Strahlqualität und kein Leistungsverlust, da das Lichtleitkabel bis zum Werkzeug gelegt wird.
 - Keine zusätzlichen Justiereinrichtungen und optischen Elemente notwendig.
- Nachteile:
- Der mechanischer Aufbau ist fertigungstechnisch sehr anspruchsvoll und, bedingt durch den geringen Bauraum, schwierig zu realisieren.
 - Die zusätzliche innere Gaszufuhr ist durch die heute üblichen Werkzeugspannsysteme nahezu unmöglich, da die Lager gegenüber dem Gas nicht abgedichtet werden können.

- Die interne Kühlmittelzufuhr ist nur bedingt möglich, da der Querschnitt stark durch die Wälzlager beeinträchtigt wird.
- Der Schutz des Faserendes ist problematisch.

Das Hauptproblem dieser Variante liegt insbesondere in der konstruktiven und fertigungstechnischen Realisierung der Lagerstellen. Zwar stehen geeignete Miniatur-Wälzlager mit Außendurchmessern von 5 mm zur Verfügung [107], aufgrund des Aufbaus des Werkzeugspannsystems und des stark eingeschränkten Bauraumes können aber nur zwei Lagerstellen an den Enden vorgesehen und eine Durchbiegung des Faserträgers nicht verhindert werden.

Variante 3:

Die dritte Möglichkeit (Bild 32) ist durch die Verwendung von zwei Glasfasern charakterisiert. Das erste Lichtleitkabel kommt vom Laser und reicht bis an die Spindel heran. Im Bereich der Drehdurchführung wird der Laserstrahl kollimiert und in die zweite Glasfaser fokussiert (optische Faser-Faser-Kopplung). Im Unterschied zu der vorherigen Variante rotiert die eingebaute Glasfaser bei der spanenden Bearbeitung mit der Spindel.

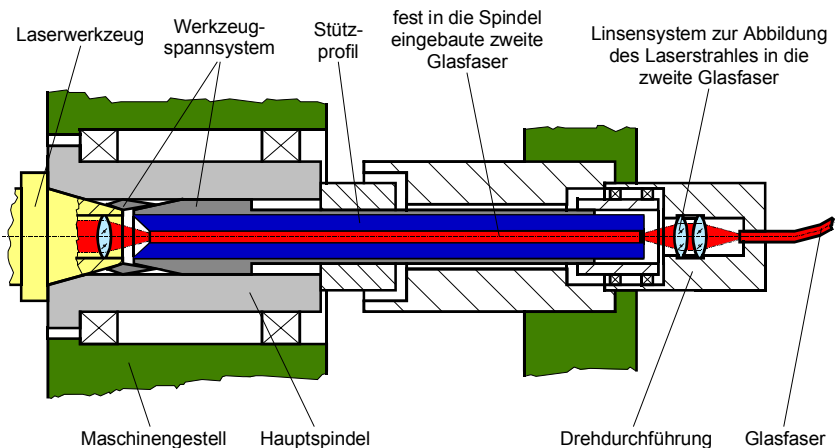


Bild 32: Strahlführung mit Faser-Faser-Kopplung.

- Vorteile:
- Ein relativ geringer Bauraum ist erforderlich.
 - Der mechanische Aufbau ist leicht zu realisieren.
 - Eine Kombination mit zusätzlicher innerer Gaszufuhr durch das

Werkzeugspannsystem ist gut durchführbar.

- Nachteile:
- Ein zusätzliches optisches System zur Fokussierung des Laserstrahls in die zweite Faser ist notwendig.
 - Möglicherweise tritt eine Verminderung der Strahlqualität durch die Faser-Faser-Kopplung auf.
 - Die Faserenden müssen an den Übergangsstellen justierbar sein.
 - Ein ausreichender Schutz des Glasfaserendes im Werkzeugspannsystem ist erforderlich.

4.3.1 Beispielhafte Integration in das Bearbeitungszentrum Steinel BZ 20

Bei dem Bearbeitungszentrum Steinel BZ 20 handelt es sich um ein 4-achsiges Bearbeitungszentrum mit drei NC-gesteuerten Linearachsen (X, Y, Z) und einem NC-gesteuerten Rundtisch, dessen Drehachse parallel zur Z-Achse angeordnet ist. Die Bearbeitung der Werkstücke erfolgt über die horizontale Hauptspindel. Die Fräs- und Bohrwerkzeuge sind in einem Rundmagazin angeordnet und werden über den automatischen Werkzeugwechsler eingesetzt. Beim Werkzeugwechselvorgang wird das Spannsystem pneumatisch gegen eine Federkraft um einen Weg von ungefähr acht Millimetern nach vorne geschoben. Dadurch öffnet sich gleich zu Beginn der Hubbewegung die Spannzange, und das Werkzeug wird über den restlichen Hub des Spannsystems mit der Stange aus dem Schaft ausgestoßen. Das Szenario und die relevanten Bauteile des vorderen Spindelbereiches sind in zwei Halbschnitten (Bild 33) dargestellt.

Über eine Dreheinführung am hinteren Spindelende erfolgt die Kühlmittelzufuhr zunächst zentral in der Hauptspindel. Als Besonderheit wird jedoch beim Bearbeitungszentrum BZ 20 das Kühlmittel nicht zentral in das Werkzeug weitergeleitet, sondern die Bohrung der IKZ wird kurz vor dem Stangenende radial nach außen verzweigt und dann parallel zur Achse bis zur Spindelnase weitergeführt (Bild 34). Im Bereich der Spindelnase erfolgt am Werkzeugbund die Übergabe des Kühlschmierstoffes in das Werkzeug.

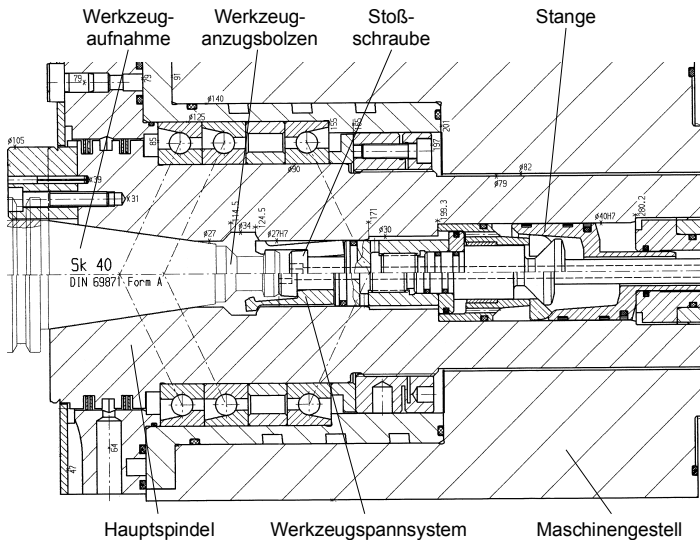


Bild 33: Vorderer Spindelbereich in zwei Halbschnitten: oben Position der Stange bei eingezogenem Werkzeug; unten beim Ausstoßen (Quelle: Fa. Steinel).

Die konstruktive Ausführung der fasergeführten Integration eines 2 kW Nd:YAG-Lasers wurde auf Grund dieser konstruktiven Eigenschaft des Bearbeitungszentrums nach dem in Bild 32 diskutierten Konzept durchgeführt. Neben den in 4.1 beschriebenen allgemeinen Randbedingungen mußten noch die weiteren speziellen Anforderungen berücksichtigt werden:

- Die Interne Kühlmittelzufuhr muß mit einem Druck von bis zu 50 bar möglich sein.
- Der Kühlmitteldurchfluß darf durch den Einbau der Glasfaser nicht wesentlich vermindert werden.
- Die Erweiterung der Spindelinnenbohrung (IKZ) für den Einbau der zweiten Glasfaser ist geringfügig möglich.
- Die uneingeschränkte Funktion des Werkzeugspannsystems muß gegeben sein.
- Die optischen Elemente wie Glasfaserenden und Linsen müssen vor Verschmutzung geschützt werden.
- Die maximale Spindeldrehzahl von 7500 U/min muß bei der Auslegung der optischen Bauteile (Glasfaser, Linsen) berücksichtigt werden.

Der Aufbau der verschiedenen Laserwerkzeuge erfolgt auf Steilkegel SK 40 nach DIN 69871.

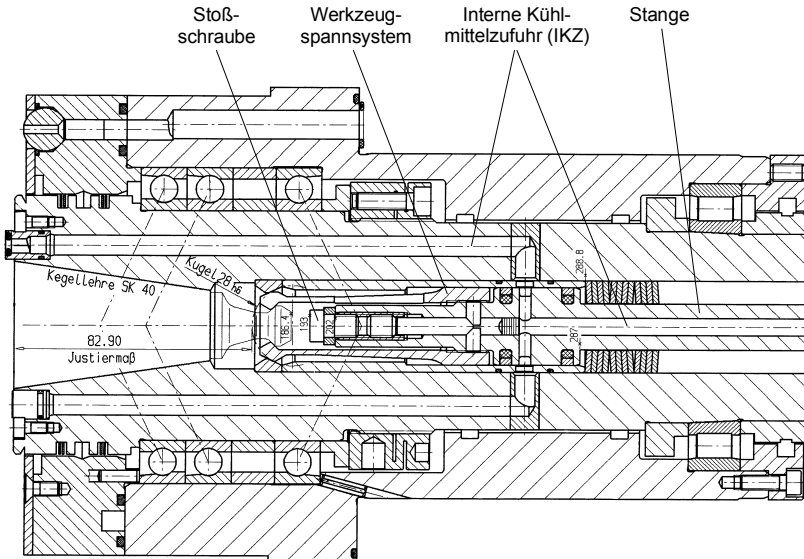


Bild 34: Schnittdarstellung des vorderen Spindelbereiches mit Darstellung der radial nach außen verzweigenden IKZ.

Entsprechend dem erläuterten Anforderungsprofil konzentrieren sich die konstruktiven Änderungen am Bearbeitungszentrum auf die beiden Bereiche *vordere Spindel* (Spannzange) und *Dreheinführung am hinteren Spindelende*. Im vorderen Spindelbereich muß eine Schnittstelle vom Übergang der Laserstrahlung aus der Glasfaser in das Laserwerkzeug geschaffen werden. Am hinteren Spindelende ist es erforderlich, daß die Drehdurchführung um die Schnittstelle Laserstrahleinkopplung bzw. Faser-Faser-Kopplung und um die mechanische Aufnahme der Glasfaser erweitert wird.

Im vorderen Bereich der Stange (Bild 35) werden die Glasfaser sowie eine Linse zur Zwischenfokussierung des Laserstrahls durch die durchbohrte Endschraube (Ausstoßbolzen) hindurch eingebaut. Die Glasfaser selbst wird dazu in einer Hülse mit einer weichen Metallmasse vergossen, die es ermöglicht, die Glasfaser zentrisch zum Außendurchmesser der Hülse auszurichten. Der genaue Abstand zwischen Faserende und Linse wird über eine Justierscheibe erreicht, deren exakte Länge in Abhängigkeit des Toleranzfehlers der Brennweite der Linse und der genauen Lage der Faserendfläche abgestimmt wird. Nach der Zwischenfokussierung wird der Laserstrahl in freier Pro-

pagation durch den Anzugsbolzen bis zum Werkzeugkegel geführt an dessen Anfang sich das nächste optische Element zur Führung oder Formung des Laserstrahles befindet.

Aufgrund der zum Hauptspindelsystem angeordneten axialen Strahlführung ist der Aufbau verschiedener Laserwerkzeuge identisch mit denen herkömmlicher Fokussieroptiken. Der Aufbau unterscheidet sich lediglich in der Verwendung des Werkzeugkegels SK 40. Ein Umlenkspiegel wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben wird nicht benötigt. Bei der Erzeugung von nicht rotationssymmetrischen Fokusgeometrien, z.B. bei der Verwendung von Zylinderlinsen, kann der Strahl sehr leicht über die gesteuerte C-Achse des Bearbeitungszentrums gedreht und somit zu einer nicht geradlinigen Bahn während der Verfahrenbewegung ausgerichtet werden.

Die Glasfaser selbst wird über die gesamte Länge in einem Stützprofil gefaßt. Seine Funktion ist der Schutz der Faser vor starker Belastung beim Anlaufen und Abbremsen der Spindel mit hoher Beschleunigung (Torsionsbelastung) und während des Betriebes mit hoher Drehzahl. Da sich das Stützprofil in der Bohrung der IKZ befindet, jedoch der Kühlschmierstoffdurchfluß erhalten bleiben muß und eine ausreichende Abstützung der Glasfaser dringend notwendig ist, wurde im mittleren Bereich ein dreiecksförmiger Querschnitt verwendet. An den beiden Enden wurde der zylindrische Querschnitt beibehalten. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Durchflusses an Kühlschmierstoff wurde der Innendurchmesser der Stange von ursprünglich 5 mm auf 7 mm erweitert.

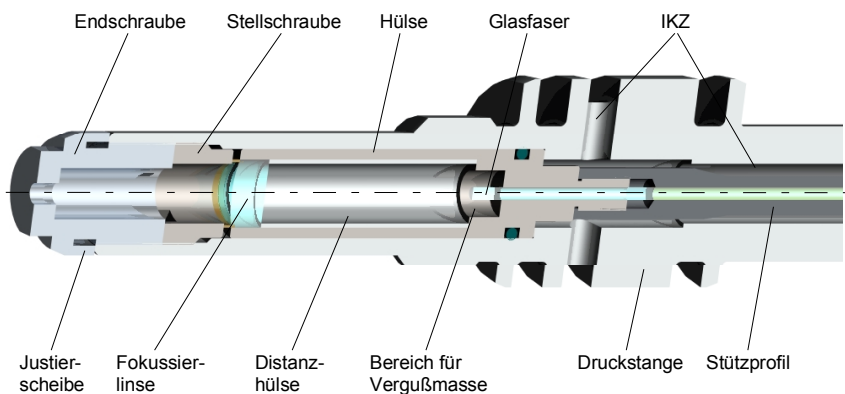


Bild 35: Gestaltung des vorderen Bereiches in der Stange – Auskopplung des Laserstrahles aus der Faser.

Vor der Montage wird das Stützprofil mit der Hülse verschraubt und gemeinsam mit der justierten Optik von vorne in die Stange eingeschoben und in seiner axialen Richtung mit der Stellschraube fixiert. Die durchbohrte Endschraube, mit einem vorderen Lochdurchmesser von 2,5 mm, dient als Schutz der Linse vor Verschmutzung beim Einsetzen und Ausstoßen des Werkzeuges.

Im hinteren Bereich der Stange ist vor allem die Drehdurchführung von einer Neukonstruktion betroffen sowie die Auslegung der optischen Faser-Faser-Kopplung zu entwickeln.

Wichtig bei der optischen Kopplung ist, daß die Schnittstelle zwischen drehender und stillstehender Faser in einem kollimierten Strahlengang liegt. Da die Faser beim Werkzeugwechsel auch der Hubbewegung der Stange folgt, ist es notwendig, die fokussierende Linse fest mit der Stange zu verbinden, um einen konstanten Abstand von Faserendfläche und fokussierender Linse zu gewährleisten (Bild 36). Dadurch ist auch die axiale Positioniergenauigkeit der beiden Linsen des optischen Systems völlig unkritisch und nicht von der Wiederholgenauigkeit der Endlage der Stange nach dem Werkzeugwechsel abhängig. Das hintere Ende des Stützprofils sowie die Einkoppellinse müssen dazu im Rotor der Drehdurchführung befestigt werden. Der stehende Teil der optischen Kopplung (Linse zur Kollimation) wird mit der vom Laser kommenden Faser in einer gemeinsamen Aufnahme montiert, und am Gehäuse der Dreheinführung befestigt.

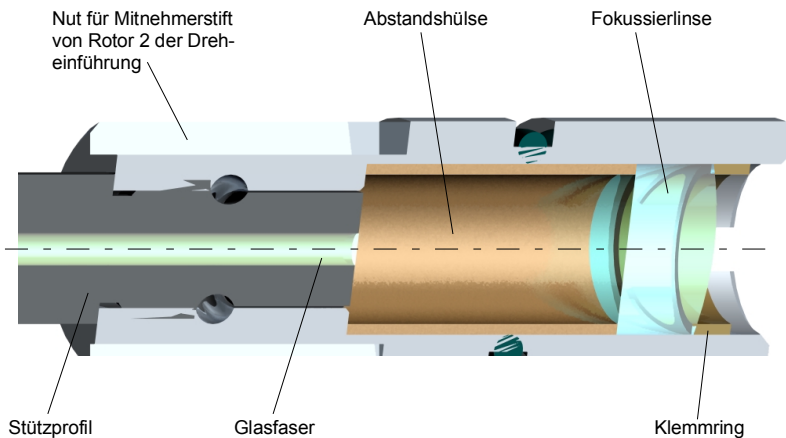


Bild 36: Gestaltung des hinteren Bereiches der Stange – Einkopplung des Laserstrahles in die zweite Faser (Detail A aus Bild 37).

Für die konstruktive Neuentwicklung der Dreheinführung am hinteren Ende der Spindel wurden die folgenden Anforderungen festgelegt:

- Die Einführung des Kühlmittels mit einem Druck zwischen 50 und 70 bar muß möglich sein.
- Spindeldrehzahlen bis 10000 U/min müssen zulässig sein.
- Das Stützprofil mit optischem Koppelement muß im Rotor der Dreheinführung befestigt werden.
- Eine absolute Dichtheit gegenüber Kühlschmierstoff im Bereich der optischen Kopplung ist unbedingt erforderlich.
- Das vom Laser kommenden Lichtleitkabel muß am Gehäuse der Dreheinführung befestigt werden.

Ein recht einfacher Lösungsansatz ergibt sich dann, wenn zwei Dreheinführungen spiegelbildlich zusammengebaut werden, d.h. die bestehende Anordnung um eine zusätzliche Dreheinheit mit Gleitringdichtung erweitert wird (Bild 37).

In Zusammenarbeit mit der Firma Deublin (Lieferant von Dreheinführungen der Firma Steinel) wurde nach diesem Prinzip die neue Dreheinführung für die gleichzeitige koaxiale Zuführung von Kühlschmiermittel und Laserlicht in die Spindel gebaut und getestet. Eine Schnittdarstellung mit Bezeichnung der wichtigsten Bauelemente ist in Bild 37 wiedergegeben.

Mit dieser Lösungsvariante ist es gelungen, ein 4-achsiges Bearbeitungszentrum mit der Möglichkeit einer Lasermaterialbearbeitung unter Beibehaltung der vollen Funktionalität nachzurüsten. Der Arbeitsraum wird nicht durch Bauteile der Strahlführung und -formung beeinträchtigt, da diese Baugruppen komplett im Inneren der Maschine, d.h. in der Hauptspindel, verlaufen und dadurch automatisch vor Verschmutzung während der spanenden Bearbeitung und vor Zerstörung durch rückreflektierende Laserstrahlung oder vor Spritzern bei der Lasermaterialbearbeitung geschützt werden.

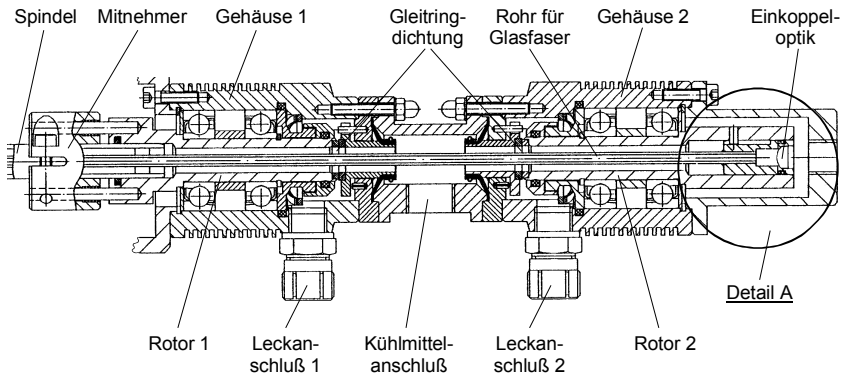


Bild 37: Schnittansicht der neuen Dreheinführung (Detail A kennzeichnet den in Bild 36 dargestellten Bereich).

4.4 Vorschläge zu konstruktiven Maßnahmen für die Laserintegration in Bearbeitungszentren

In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, daß der Einsatz der verschiedenen Laserverfahren immer stärker Einzug in die industrielle Fertigung findet. Vor allem aber wurden die Möglichkeiten und die damit verbundenen Vorteile des Lasereinsatzes in konventionellen, spanenden Maschinen von manchen Herstellern erkannt.

Da auch die Konstruktion von Bearbeitungsmaschinen einem ständigen Wandel von Neuerungen unterworfen ist, sollen hier einige Anregungen zur konstruktiven Verbesserung von neuen Werkzeugmaschinen gegeben werden, die bereits im Vorfeld der Entwicklung die Integration des Werkzeuges Laser berücksichtigen.

An eine praxisgerechte, industrietaugliche Neukonstruktion von Bearbeitungszentren mit der Möglichkeit zur Laserintegration (auch als Nachrüstung zu einem späteren Zeitpunkt) werden folgende Anforderungen gestellt:

- Während der spanenden Bearbeitung sollen sich keine optisch-mechanischen Elemente im Arbeitsraum befinden. Diese können durch Späneflug, z.B. bei der HSC-Bearbeitung, und durch den Einsatz von Kühlschmierstoff (Drücke bis 40 bar) erheblich verschmutzt oder sogar beschädigt werden.
- Der Arbeitsraum, der Werkzeugeinsatz und die Maschinenkinematik dürfen durch die Maßnahmen zur Laserintegration nicht eingeschränkt werden.

- Die Anzahl der optischen Elemente zur Strahlführung soll auf ein Minimum beschränkt sein.
- Die Prozeßgasleitung muß neben der Zufuhr von Schutzgas (Schweißen, Härten) auch für die Übertragung von reinem Sauerstoff (Laser-Brennschneiden) sowie für hohe Drücke von bis zu 20 bar (Hochdruckschneiden mit Stickstoff) ausgelegt werden. Zum Schutz der Bearbeitungsoptik vor Spritzern während der Materialbearbeitung (z.B. beim Schweißen, Abtragen, Schneiden) ist eine weitere Gasleitung für den Einsatz eines Querjets sinnvoll.
- Laserstrahlführung, Prozeßgas- und Kühlschmierstoffzufuhr sollten in getrennten Kanälen verlaufen.
- Die optischen Elemente sind auf geeignete Weise vor Verschmutzung zu schützen (z.B. durch mechanische Verschlüsse, Sperrluft, etc.).
- Anzustreben ist eine Lösung, bei der sowohl fasergeführte Festkörperlaser als auch in Hohlleitern geführte CO₂-Laser (für diese Laser spricht die bessere Strahlqualität bei gleichzeitig höherer Leistung) zum Einsatz kommen können.

Die in 4.2.3 und 4.3.1 exemplarisch vorgestellten Beispiele der nachträglichen Integration in bestehende Bearbeitungszentren zeigen, daß diese Forderungen bei heute üblichen Bearbeitungszentren nicht gleichzeitig realisierbar sind. Es wird daraus aber deutlich, daß für eine wirklich praxisgerechte Lösung nur eine spindelinterne Führung von Laserstrahlung, Prozeßgasen und Kühlschmierstoff in Frage kommt. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen für eine Neukonstruktion sind im einzelnen:

- Sämtliche Elemente der Laserintegration werden in die Spindel bzw. an das Spindelende gelegt. Dadurch bleibt der Arbeitsraum frei von jeglichen Systemen zur Strahlführung und zur Laser- und Gasankopplung.
- Die zentrale Laserstrahlführung vermeidet unnötige Strahlumlenkungen und erleichtert die Strahlankopplung an rotierende Sonderoptiken.
- Der Innendurchmesser des Werkzeugspannsystems wird so erweitert, so daß die Einbettung der Glasfaser in das Werkzeugspannsystem gut realisiert werden kann.
- Bei der Verwendung eines Hohlleiterrohres anstelle der Glasfaser können auch CO₂-Laser zum Einsatz kommen. Der Strahl wird dazu in freier Propagation zum Ende der Spindel geführt und dort in den Hohlleiter fokussiert.
- Das Glasfaserende kann durch Druckluft, die durch die Spindel geführt wird, geschützt werden. Bei der Verwendung eines Hohlleiters dient dies gleichzeitig der Kühlung.

- Kühlschmiermittel, Prozeß- und Schutzgase werden in radial versetzten axialen Bohrungen zum Spindelkopf geführt. Die Einleitung dieser Medien in die Spindel erfolgt durch mehrstufige Drehdurchführungen (s. Bild 38), die in radialer oder axialer Richtung nebeneinander angeordnet werden.

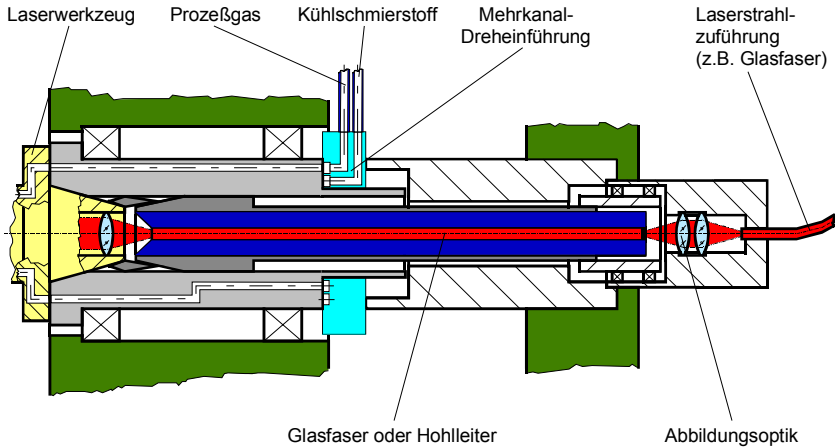


Bild 38: Schematische Darstellung einer neuen laserintegrierten Fräs-/ Bohrspindel mit innerer Prozeßgas- und Kühlmittelzufuhr.

Die größten Schwierigkeiten bei der Realisierung eines derartigen Konzeptes zur Laserintegration werden neben allgemeinen Bauraumproblemen in der Spindel vor allem die dynamischen Dichtstellen an den Drehdurchführungen bereiten. Da sich der Bauraum des Werkzeugspannsystems aufgrund der Laserintegration vergrößert, nehmen die kleinstmöglichen Durchmesser für die Dichtflächen und damit die Umfangsgeschwindigkeiten an den Dichtkanten zu. Bei der Abdichtung der Prozeßgase wird dieses Problem dadurch umgangen, daß bei der spanenden Bearbeitung mit hohen Drehzahlen die Dichtungen entkoppelt werden.

Insgesamt erscheinen diese Anforderungen realisierbar, so daß, zumindest längerfristig gesehen, Bearbeitungszentren nach den genannten Prinzipien verwirklicht werden können. Hierfür ist in Bild 38 eine mögliche Lösung schematisch aufgezeigt. Damit stünde ein industrietaugliches Fräs-/ Bohrzentrum für eine echte Komplettbearbeitung einschließlich der verschiedenen Lasermaterialbearbeitungsverfahren zur Verfügung.

4.5 Anwendungspotential und Herausforderungen laserintegrierter Fertigung

Die verschiedenen Laserverfahren haben sich in den letzten Jahren aufgrund ihrer hohen Prozeßsicherheit und Flexibilität in vielen Bereichen der industriellen Fertigungstechnik fest etabliert. Die Anwendungen beschränken sich dabei nicht nur auf die herkömmlichen Verfahren wie Trennen und Fügen von Werkstücken, sondern es finden auch immer mehr „Nachbehandlungsverfahren“ wie beispielsweise das Auftragschweißen von Verschleißschuttschichten oder das Einbringen feinsten Strukturen in „klassisch“ fertig bearbeiteten Oberflächen. Dabei gilt festzuhalten, daß bei nahezu dem ganzen Werkstückspektrum zuerst spanende Fertigungsverfahren für den Formgebungsprozeß durchgeführt werden und erst zu einem späteren Zeitpunkt in einem weiteren Fertigungsschritt – und in einer weiteren Aufspannung – diese Werkstücke in einer weiteren Bearbeitungsstation mit dem Laser weiter- bzw. fertigtbearbeitet werden. Damit sei angedeutet, welch großes Potential für Herstellungskonzepte und Fertigungsanlagen zur laserintegrierten Fertigung besteht. Mit den nachfolgend angeführten Beispielen und Diskussionen soll ein Blick darauf geworfen werden.

Als Beispiel für das nachträgliche Lasercaving ist der in hoher Stückzahl individuell auf die Geometrie des Oberschenkels angefertigte Schaft von Hüftendoprothesen zu nennen. Der Schaft wird zunächst auf einem 5-achsigen Bearbeitungszentrum gefräst. Im Anschluß daran wird die Endoprothese in einer zweiten Aufspannung in einer Lasercav-Maschine der Firma MAHO weiterbearbeitet, wo feinste Strukturen aus dem Schaft abgetragen werden, um bessere Einwachsbedingungen und Verankerung im Oberschenkelknochen zu erhalten [108].

Bei Gesenken mit feinsten Hinterschnidungen wird derzeit das komplette Volumen durch Laserabtragen herausgearbeitet. Aufgrund der sehr geringen Abtragsrate dauert die Fertigungszeit extrem lange. Sinnvoller wäre es, wenn die großen Volumina in einem ersten Fertigungsschritt spanend herausgearbeitet (gefräst) und dann erst in der Fertigstellung die feinen Strukturen und Hinterschnidungen mittels Laser abgetragen würden.

Bei Schneid-, Umform- und Biegewerkzeugen werden die stark beanspruchten Oberflächen und Schneidkanten in einem letzten Bearbeitungsschritt durch Laserstrahlhärten veredelt, ohne daß sich das Werkzeug verzieht (Bild 39). Eine hohe Zähigkeit bei gleichzeitig hoher Härte an der Oberfläche sorgt für eine hohe Standzeit [109], [110].



Bild 39: Matrize aus legiertem Grauguß mit lasergehärteter Formfläche (Quelle: MAN).

Ein hoher Bedarf an Bearbeitungszentren mit integriertem Laser besteht derzeit beim *Control Metal Build-Up*, einer Verfahrenskombination aus Fräsen und Auftragschweißen, für die Reparatur von Spritzguß und Umformwerkzeugen [111] sowie bei der Reparatur von Turbinenschaufeln (Blade-Repair). Mit dem Lasergenerieren lassen sich komplexe 3D-Strukturen aufbauen, oder auch die verschlissenen Werkzeugbereiche flächig reparieren. Es können entweder pulverförmige Werkstoffe für feine Konturen oder Werkstoffe in Drahtform für hohe Auftragsraten verwendet werden. Eine jährlich anfallende Stückzahl von mehreren Millionen wird momentan an Handarbeitsplätzen repariert (Auftragsschweißen mit anschließendem Abschleifen). Neben einer Laserintegration müßten diese Werkzeugmaschinen noch zusätzlich um eine geeignete Zufuhreinheit des aufzutragenden Werkstoffes (Drahtvorschub, Pulverförderer) sowie um einen Scanner zur Erfassung der IST-Kontur vor und nach dem Auftragsschweißen erweitert werden. Eine Darstellung des Prozesses mit dem dazugehörigen mehrstufigen Fertigungsablauf ist in Bild 40 gegeben.

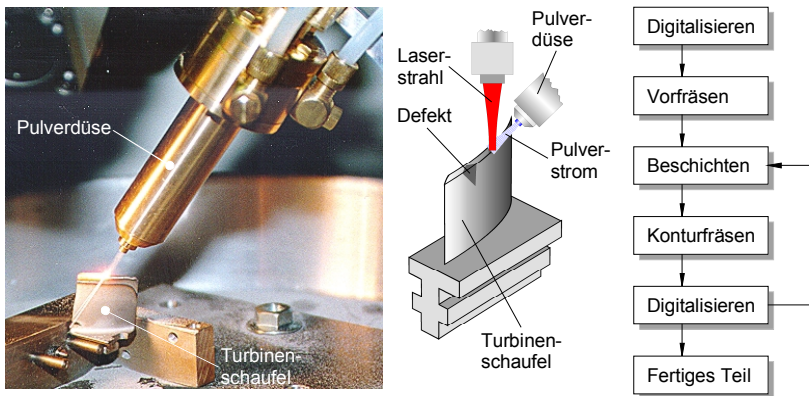


Bild 40: Reparieren von Turbinenschaufeln und Darstellung des Prozeßablaufs.

Prinzipiell sind mit der Integration des Lasers in Werkzeugmaschinen alle Laserverfahren durchführbar. Allerdings stoßen die Werkzeugmaschinen bezüglich der Antriebstechnik sehr schnell an ihre Grenzen, sobald die Prozesse aufgrund der Technologiedaten an hohe Prozeßgeschwindigkeiten gekoppelt sind. Die dynamischen Eigenschaften der Führungsmaschine begrenzen die erzielbaren Bahngeschwindigkeiten und die Arbeitsgenauigkeit des Bearbeitungszentrums. Problematisch sind insbesondere Bahnbewegungen, die starke Krümmungen aufweisen. Typische Beispiele hierfür sind Ecken- bzw. Kreisfahrten mit kleinen Radien r_0 . Die folgende Darstellung zeigt diese Problematik für den Bereich des Schneidens feiner Fenster in ein Hydraulikbauteil (Bild 41) [112]. Die maximale lasertechnologisch mögliche Schneidgeschwindigkeit wurde zu 3 m/min in Versuchen mit geradliniger Bewegung ermittelt. Beim Übertragen auf die Werkzeugmaschine ergab sich das in Bild 41 dargestellte Führungsverhalten aufgrund des begrenzten Beschleunigungsvermögens (für die bessere Darstellung wurde dazu die Laserleistung soweit reduziert, daß die Oberfläche lediglich angeschmolzen wurde). Erst bei einer Reduktion der Bahngeschwindigkeit um 90% (auf 0,3 m/min!) bewegte sich die Bahngenauigkeit innerhalb der vorgegebenen Toleranzen.

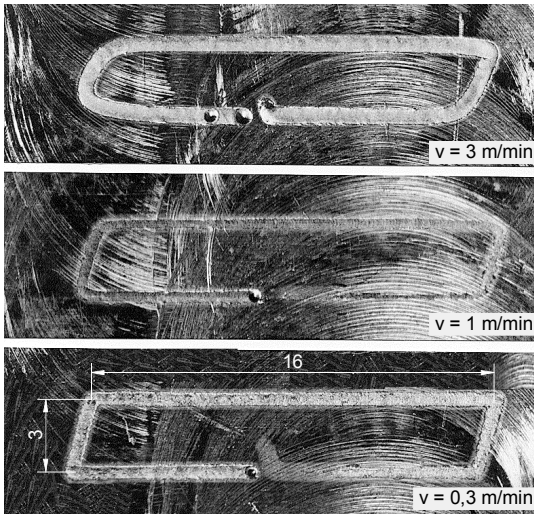


Bild 41: Führungsverhalten des Bearbeitungszentrums bei verschiedenen Bahngeschwindigkeiten (Für die Darstellung wurde die Oberfläche mit dem Laser lediglich angeschmolzen).

Das Bestreben, auch in diesen Bahnabschnitten mit technologisch möglicher Bahngeschwindigkeit zu fahren, erfordert in erster Linie ein hohes Beschleunigungsvermögen in den Vorschubachsen der Werkzeugmaschine. Dies zeigt die theoretische Betrachtung in Bild 42. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der maximal möglichen Bahngeschwindigkeit bei Eckenfahrt in Abhängigkeit des Beschleunigungsvermögens der Vorschubachsen bei unterschiedlichen Eckenradien. Die eingezeichnete Markierung stellt die obere Grenze der Beschleunigung heutiger Werkzeugmaschinen dar. Dem Beispiel liegt eine kartesische Maschinenkinematik zugrunde.

Selbst bei modernen Bearbeitungszentren und sogar bei Stand-Alone Laserbearbeitungsanlagen [113] liegen die theoretisch erzielbaren Bahngeschwindigkeiten in diesen Konturbereichen weit unterhalb von 6 m/min. Eine Verdopplung der Bahngeschwindigkeit bei gegebener Kreis- bzw. Eckenkontur würde bereits eine Vervierfachung des Beschleunigungsvermögens der Vorschubachsen erfordern. Derzeit müssen in diesen Konturabschnitten die Bahngeschwindigkeiten entsprechend verringert und die Laserleistung an diese Geschwindigkeit angepaßt werden, mit der Folge, daß die Hauptzeitanteile anwachsen.

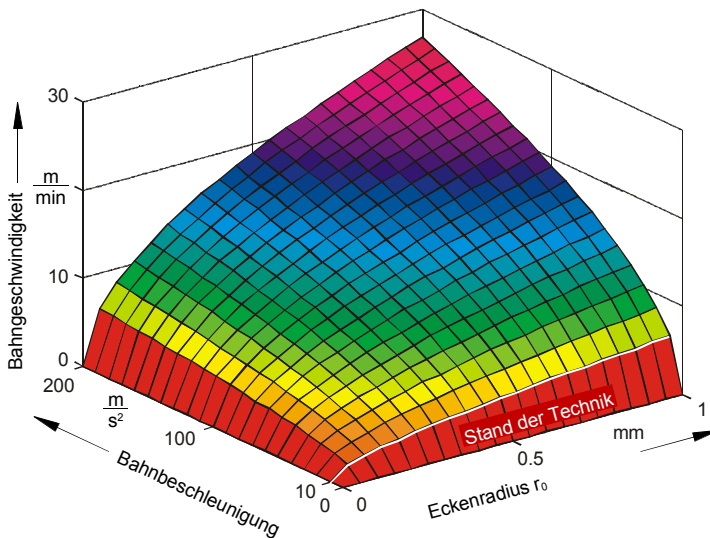


Bild 42: Anforderungen an Vorschubachsen von Führungsmaschinen bei Kreis- bzw. Eckenfahrt.

Bereits hier wird deutlich, daß die in den letzten Jahren erzielte und auch zukünftige Leistungssteigerung bei den Laserstrahlquellen [114] nicht in die technologisch möglichen Prozeßgeschwindigkeiten mit den heutigen konventionellen Werkzeugmaschinen (kartesische Achsen) umgesetzt werden kann. Die Entwicklung der Maschinentechnologie ist hier hinter den gewandelten Anforderungen zurückgeblieben. Das Beschleunigungsvermögen der Vorschubachsen und die maximale Geschwindigkeit bedürfen einer signifikanten Steigerung, um die Leistungsreserven wirtschaftlich bedeutender Lasermaterialbearbeitungsverfahren heute und auch zukünftig ausschöpfen zu können. Ein erster Ansatz liegt in dem Einsatz der Lineardirektantriebstechnik zur Steigerung der Dynamik der Maschinenachsen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen jedoch, daß durch die alleinige Substitution des Antriebssystems keine wesentlichen Verbesserungen erzielt werden können. Dies gründet darauf, daß im Gegensatz zur herkömmlichen Antriebstechnik erheblich höhere Anforderungen an die Steifigkeit und Massenreduktion gestellt werden, die konstruktiv zu lösen sind. Andererseits wachsen auch die Anforderungen an die Steuerungs- und Regelungstechnik in erheblichem Maße [115].

Folglich kann nur ein ganzheitlicher Lösungsansatz den angestrebten Technologiefortschritt in der Maschinentechnik herbeiführen. Insbesondere die jüngsten Entwicklun-

gen im Bereich der Parallelkinematiken zeigen – besonders in Verbindung mit Direktantrieben – neue Potentiale zur Leistungssteigerung [116, 117, 118].

5 Laserintegration in Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken

Der wirtschaftliche Einsatz innovativer Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungsverfahren wie Lasermaterialbearbeitung und HSC-Technologie (High Speed Cutting) erfordert geeignete Maschinenkonzepte, mit denen weit höhere Bahngeschwindigkeiten bei hoher Konturgenauigkeit erreicht werden können, als dies derzeit mit konventionellen Bearbeitungsmaschinen möglich ist.

5.1 Neue Werkzeugmaschinen

Neue Impulse gehen zum einen von der Direktantriebstechnik aus, die hinsichtlich Beschleunigungsvermögen, Achsgeschwindigkeit, Positioniergenauigkeit und Regeldynamik herkömmlichen Antriebssystemen überlegen ist. Zum anderen werden neue Maschinenkonzepte wie z.B. Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken (PKM) entwickelt, die sich hinsichtlich ihres Aufbaus stark von konventionellen Werkzeugmaschinen unterscheiden.

Die Kombination dieser PKM-Werkzeugmaschinen mit den neuen Antriebstechnologien erfüllen bestmöglich die Forderungen der neuen Fertigungstechnologien bezüglich hoher Geschwindigkeit und maximaler Beschleunigung bei großer Steifigkeit und gleichzeitig geringen bewegten Massen [119], [120]. Vor diesem beschriebenen Hintergrund wurden auf der EMO 1999 von unterschiedlichen Werkzeugmaschinenherstellern eine Vielzahl verschiedener Varianten von PKM-Maschinen vorgestellt, die sich hauptsächlich in der Anzahl der kinematischen Freiheitsgrade, der Ausrichtung und Anordnung der Antriebe sowie dem Merkmal längenveränderlicher Streben oder invarianter Strebenlängen unterscheiden.

Schematisch sind in Bild 43 das Modell einer PKM-Werkzeugmaschine mit drei translatorischen Achsen im Tool-Center-Point (TCP) und einer mit sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische) im TCP dargestellt. Die Anordnung der Werkzeugachse ist senkrecht zur Plattform. Deutlich sind in beiden Modellen die charakteristischen Merkmale

- hohe Modularität,
- niedrige Anzahl verschiedener Teile,
- hoher Wiederholteilegrad und
- Entkopplung der Achsen (kein Achsantrieb trägt einen anderen)

dieser Maschinen zu erkennen. Beiden Maschinentypen gemeinsam sind die längenunveränderlichen Streben, was bedeutet, daß der Abstand zwischen den Gelenkpunkten konstant ist. Der Grundgedanke bei diesen Anordnungen besteht darin, die Bewegung der Plattform (Werkzeugträger) mittels Stäben und Gelenken zu bewirken. Die Führungen und Antriebe sind parallel angeordnet und bilden Systemelemente eines Baukastens. Die Aufstellung der Maschine kann sowohl vertikal als auch horizontal erfolgen.

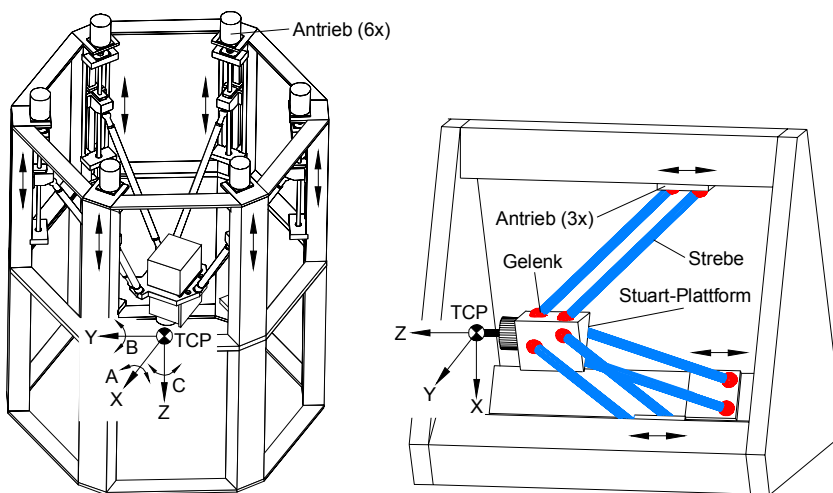


Bild 43: Prinzipschemata von PKM-Werkzeugmaschinen: Hexapod (links); Tripod (rechts).

Eine Parallelkinematik auf der Basis des in Bild 43 gezeigten Tripoden wurde von der Firma Renault-Automation auf der EMO 1999 für die Fräs- und Bohrbearbeitung vorgestellt. Mit diesem Maschinenkonzept werden Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/min und Beschleunigungswerte zwischen 35 m/s^2 und 50 m/s^2 am TCP erreicht [121].

Ein Hexapod mit längenunveränderlichen Streben, großen Schwenkwinkeln und sieben NC-gesteuerten Achsen (je 3 translatorische und rotatorische im TCP und eine Drehachse im Werkstück) für eine Fünf-Seiten-Bearbeitung [122] ist in der Frontansicht in Bild 44 dargestellt. Als Besonderheit zu den sonstigen Konfigurationen ist hier die Werkzeugspindel parallel zur Plattform ausgerichtet, was nicht zuletzt für die großen Schwenkwinkel von 45° in der A-Achse gegenüber den sonst üblichen 30° ausschlaggebend ist.

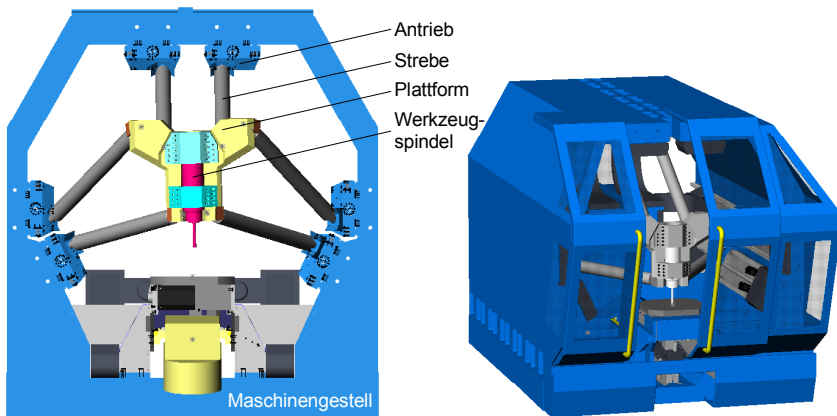


Bild 44: PKM-Werkzeugmaschine PARALIX (Hexapod) in horizontaler Ausrichtung für eine Fünf-Seiten-Bearbeitung.

Die PKM-Werkzeugmaschinen sind nicht nur für die spanende Bearbeitung geeignet, sondern in gleichem Maße für zahlreiche Laserverfahren. Ein Einsatz in der Lasermaterialbearbeitung als Stand-Alone-Lösung oder besser noch in Kombination mit der spanenden Bearbeitung im Sinne der laserintegrierten Komplettbearbeitung, erfordert eine dem hochdynamischen Maschinenkonzept gerechte Strahlführung.

5.2 Konzepte der Strahlführung in PKM-Maschinen

Die Laserintegration in PKM-Werkzeugmaschinen erfordert die Konzeption neuartiger Strahlführungskomponenten von der Laserstrahlquelle bis in den Bereich der Stuart-Plattform. Generell kann die Laserstrahlung dort senkrecht (wie in Bild 43) aus der Plattform heraus oder parallel zur Plattform (entsprechend Spindelanzordnung in Bild 44) auf das Werkstück treffen.

Die Einführung einer zweiten Werkzeugachse (hier optische Achse der Laserstrahlung) in paralleler oder senkrechter Anordnung zur Hauptspindelachse bereitet im Gegensatz zu konventionellen Werkzeugmaschinen keine Probleme und wird in der Transformation berücksichtigt. Von daher ist es nicht zwingend erforderlich, die Laserstrahlung koaxial zur Werkzeugachse zu führen.

Bei *Hochleistungsdiodenlasern* besteht aufgrund ihrer kompakten Bauform die Möglichkeit, diese **direkt** an der Plattform anstelle der Hauptspindel (bei senkrechter Anordnung) oder parallel dazu auf der Plattformrückseite (bei paralleler Anordnung) zu

montieren. Nachteilig sind jedoch die langen und zum Teil recht starren Versorgungsleitungen für elektrische Energie, Kühlwasser und Prozeßgas. Selbst bei der Verlegung in Energieketten beeinflussen sie das dynamische Verhalten der Werkzeugmaschine negativ. Auf die im Vergleich zum eigentlichen Laser großen Massen der Versorgungsleitungen wirken bei den Beschleunigungsvorgängen hohe Trägheitskräfte, so daß die Anschlüsse weitaus größer dimensioniert werden müssen, als zunächst vorgesehen. Ein weiterer entscheidender Aspekt, der eine Realisierung dieses Konzeptes ausschließt, sind die sehr justageempfindlichen elektrischen und mechanischen Komponenten im Laserkopf selbst. Diese dürfen mit einer maximalen Beschleunigung von bis zu 15 m/s^2 belastet werden, ohne daß es zur Schädigung der Bauteile kommt [123], [124]. Dies bedeutet, daß die hohe Dynamik dieser Maschinen (Beschleunigungen von über $2g$) hier nicht ausgenutzt werden kann.

Bei der *fasergeführten Integration* von Nd:YAG- und Diodenlasern wird die Strahlquelle so angeordnet, daß diese sich nicht mit der Stuart-Plattform bewegt. Die Auskoppeloptik wird senkrecht oder parallel zur Plattform angebracht. Bei senkrechter Anordnung muß das LLK in Richtung der Streben durch den hinteren Bereich des Maschinenraumes geführt werden. Eine Zufuhr der Glasfaser von oben erlaubt die parallele Anordnung. Eine Abspannung der Faser mit einem Federzug (ähnlich Bild 19) ist in beiden Fällen notwendig. Problematisch wirkt sich zum einen die Gestaltung des freien nicht geführten Faserendes mit einem Durchmesser von $600 \mu\text{m}$ für Laser mit einer Ausgangsleistung von bis zu 6 kW (bzw. mit einem Durchmesser von nur $100 \mu\text{m}$ für Scheibenlaser bis 1 kW) aus. Das freie Faserende ist äußerst empfindlich gegen Erschütterungen und Stöße und bricht sehr leicht. Beschleunigungen von maximal 20 m/s^2 dürfen bei ständiger Belastung nicht überschritten werden [125]. Zum anderen zeigt die labile Faser bei schnellen Richtungsänderungen ein peitschenähnliches Verhalten und wird durch die hohe Biegewechselbeanspruchung zerstört. Weiterhin wirken hohe dynamische Kräfte bei Bewegungen entgegen der Abspannrichtung durch den Federzug auf die Befestigungsstelle der Glasfaser in der Auskoppeloptik.

Eine weitere Möglichkeit den Laserstrahl von der Laserstrahlquelle durch den Maschinenraum bis zur Bearbeitungsoptik an der Plattform zu lenken, besteht im Einsatz von *flexiblen Strahlführungssystemen* (SFS). Die Ausbreitung des Laserstrahles erfolgt darin in freier Propagation, die Strahlführung bzw. Strahlumlenkung über Spiegel. Bislang werden diese Systeme in der Hauptsache für CO_2 -Laser in Kombination mit Knickarmrobotern zur Bearbeitung komplexer 3D-Konturen verwendet. Diese flexiblen Strahlführungssysteme stellen sozusagen den „Lichtleiter“ für CO_2 -Laser dar. Der Einsatz dieser Systeme bleibt jedoch nicht nur auf die Strahlführung von CO_2 -Lasern beschränkt, sondern ist auch sehr einfach durch die Modifizierung der Spiegel für andere Wellenlängen wie z.B. die der Nd:YAG- Laser oder HLDL konfigurierbar.

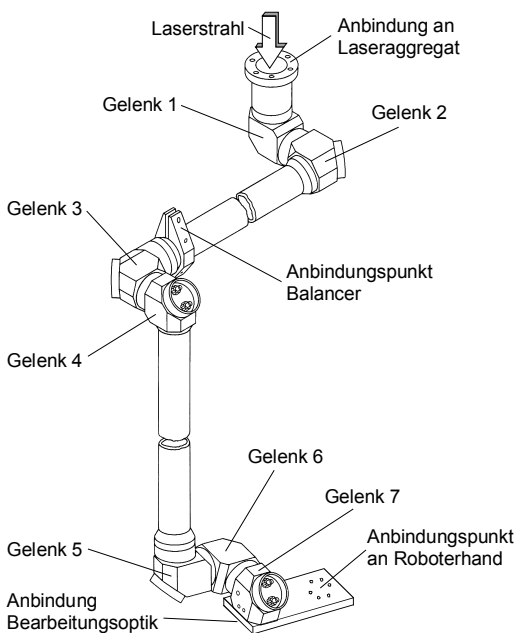


Bild 45: Schematische Darstellung des flexiblen Laser-Strahlführungssystems (Quelle: Fa. Carl Zeiss).

Die ersten Systeme für eine Strahlleistung von bis zu 10 kW werden in [126] beschrieben. Die schematische Darstellung dieses Systems sowie die Bezeichnung der einzelnen Komponenten ist in Bild 45 gegeben. Das derzeit kommerziell erhältliche System der Firma TRUMPF ist für den Einsatz eines bis zu 12 kW starken CO₂-Lasers geeignet [127] und wurde dem System der Firma ZEISS nachempfunden. Dieses System ist zusammen mit einem angekoppelten 12 kW-Laser und einem Roboter zur Bahnführung in Bild 46 dargestellt. Das Strahlführungssystem besteht im wesentlichen aus zwei Strahlführungsrohren und aus sieben Drehgelenken bzw. Drehspiegeln (Spiegellapertur 60 mm). Sie gewährleisten die Beweglichkeit des Gelenkarmes in allen Raumrichtungen. Nur wenn drei benachbarte Drehachsen sich in einer Ebene befinden, ist eine Bewegung in dieser Ebene nicht mehr erlaubt bzw. nicht mehr möglich. Durch eine geeignete Wahl des Bewegungsablaufes läßt sich diese Situation vermeiden. Wichtig für die Lasermaterialbearbeitung ist, daß bei linear polarisiertem Licht die Orientierung der Polarisationsrichtung durch die rotatorische Spiegeldrehung geändert wird. Maßnahmen dagegen werden durch die Verwendung von zirkular polarisiertem Licht oder durch die gesteuerte Nachführung der Polarisationsrichtung mittels eines

LIPOR (Linearpolarisations-Orientierer) [128] getroffen. Ein entscheidender Nachteil des Strahlführungssystems ist seine Eigeninstabilität. Dies hat zur Folge, daß es im Betrieb am Ende des ersten Rohres an einem Balancer aufgehängt oder über einen Seilzug nach oben abgespannt werden muß. Weiterhin wirkt sich das Gewicht von über 70 kg nachteilig beim Einsatz in hochdynamischen Werkzeugmaschinen aus.



Bild 46: Robotergeführtes flexibles Strahlführungssystem mit 12 kW CO₂-Laser (Quelle: Fa. TRUMPF).

Auf der Basis des vorgestellten Gelenkarmes mit Drehspiegeln für die Roboterhandienung wird im folgenden ein für den Einsatz in PKM-Werkzeugmaschinen neu entwickeltes und optimiertes Strahlführungssystem vorgestellt.

5.3 SFS für PKM-Maschinen

Der Einsatz bisheriger Strahlführungssysteme in Werkzeugmaschinen mit hoher Beschleunigung und insbesondere in Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken ist aufgrund der beschriebenen Gegebenheiten bislang nur begrenzt möglich. Die Grundvoraussetzung für die effiziente Nutzung des Lasers in PKM-Werkzeugmaschinen ist die Bereitstellung geeigneter Strahlführungssysteme.

Das neu entwickelte Strahlführungssystem kann hauptsächlich in PKM-Werkzeugmaschinen mit 6 Freiheitsgraden (Bild 43 links und Bild 44) eingesetzt werden. Der Einsatz ist jedoch problemlos auch auf andere Maschinentypen, beispielsweise auf Portalmaschinen oder Knickarmroboter, übertragbar. Zur Beschreibung und Erläuterung der Funktion ist das Strahlführungssystem in der Form einer kinematischen Kette mit den jeweiligen Gelenkfreiheitsgraden in Bild 47 dargestellt.

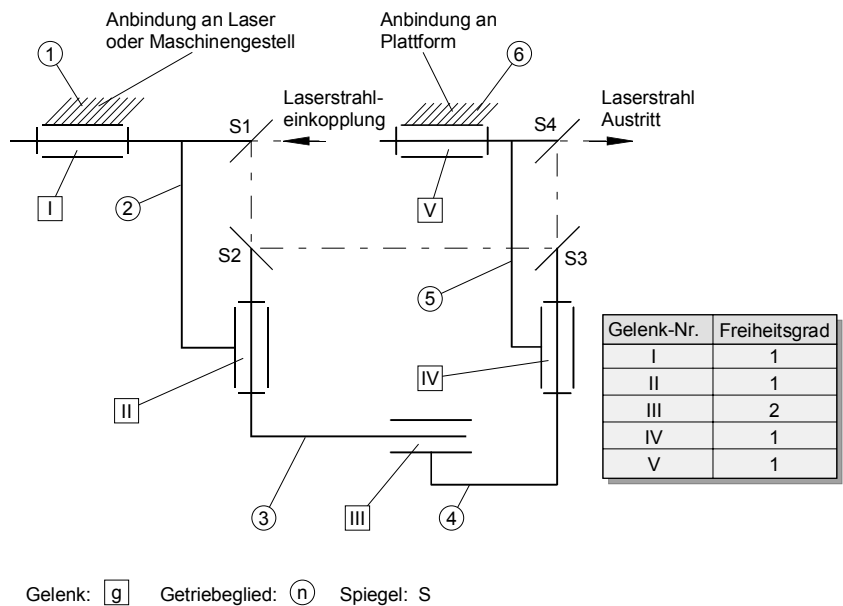


Bild 47: Kinematische Kette des neu entwickelten Strahlführungssystems.

Der Getriebe-Laufgrad (Getriebe-Freiheitsgrad) F des Strahlführungssystems berechnet sich nach [129] zu

$$F = b(n - 1) - \sum_{i=1}^g (b - f_i) . \tag{17}$$

Der Freiheitsgrad F ist von der Zahl n der Getriebeglieder (einschließlich Gestell), der Zahl g der Gelenke mit dem jeweiligen Gelenkfreiheitsgrad f und dem Bewegungsgrad b abhängig. Für allgemein räumliche Getriebe ist $b=6$, für sphärische und ebene Getriebe $b=3$ einzusetzen. Das Gelenk Nr. III ist ein Dreh-Schubgelenk mit dem Gelenkfreiheitsgrad $f=2$, die anderen Gelenke sind einfache Drehgelenke mit einem Gelenkfreiheitsgrad von $f=1$. Damit ergibt sich für das dargestellte Getriebe ein Freiheitsgrad

von $F=6$, d.h. das Strahlführungssystem ist im Raum frei beweglich.

Die Auslegung des SFS wurde so gewählt, daß es an die PKM-Werkzeugmaschine PARALIX (Bild 44) angebunden werden kann. Folgende allgemeine Anforderungen an die Konstruktion müssen dabei erfüllt werden:

- Der Laserstrahl muß der 6-achsigen Bewegung der Plattform im ganzen Arbeitsraum der Maschine folgen.
- Das SFS muß in sich stabil sein, d.h. es soll keine Abspannung über einen Seilzug erfolgen.
- Es ist keine Orientierungsänderung der Bildlage beim Drehen der Spiegel erlaubt.
- Der mechanische Aufbau ist für eine kostengünstige Fertigung einfach zu gestalten.
- Es ist ein hoher Wiederholteilegrad zu realisieren.

Die *speziellen* Anforderungen bzw. Bedingungen sind:

- Der Laserstrahl muß parallel zur Primärachse ausgerichtet werden (z.B. optische Achse des Eingangsobjektivs parallel zur primären Drehachse).
- Der Primärspiegel ist justierbar auszuführen (Ausrichten des Laserstrahles parallel zur Sekundärachse).
- Die Sekundärspiegel sind justierbar auszuführen (Ausrichten des Laserstrahles parallel zum Dreh-Schubgelenk).
- Die Längenänderung des Dreh-Schubgelenks muß geradlinig verlaufen, damit keine Winkeländerung der beiden Spiegelgruppen zueinander auftritt.
- Die zweite Spiegelgruppe muß die gleichen Justiermöglichkeiten wie die erste Spiegelgruppe besitzen.
- Die optische Achse der Bearbeitungsoptik muß parallel zur letzten Drehachse sein.

Voraussetzung: Die obengenannten Bedingungen gelten nur dann, wenn innerhalb des SFS ein paralleler Strahlengang propagiert.

Anmerkung: Es ist nicht erforderlich, daß die Spiegelachsen genau rechtwinklig und in einer Ebene zueinander ausgerichtet sein müssen.

Eine 3D-CAD-Darstellung des SFS ist (aus Übersichtsgründen mit verkürztem Tele-

skoprohr) in Bild 48 wiedergegeben. Das obere Spiegelgehäuse ist im Viertelschnitt, das Teleskoprohr sowie das untere Spiegelgehäuse im Halbschnitt dargestellt.

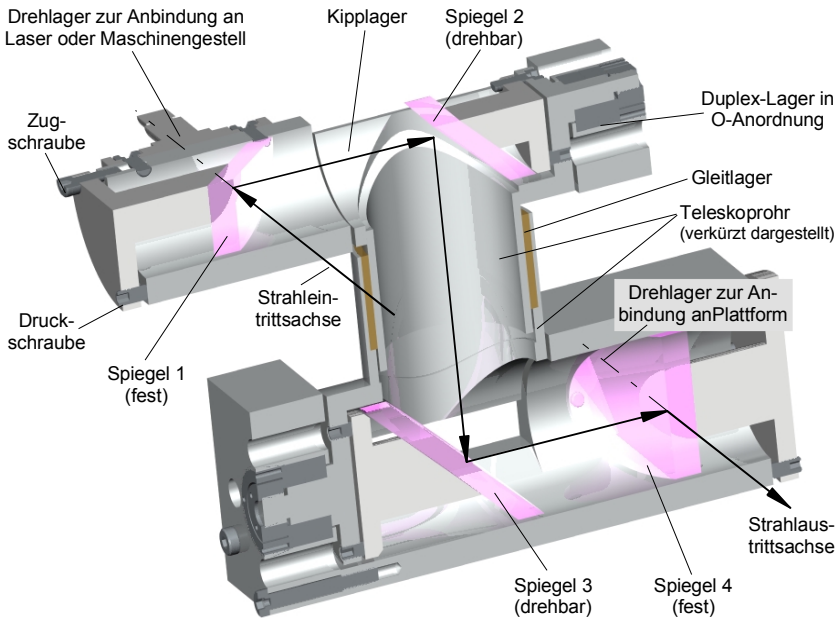


Bild 48: CAD-Modell und Strahlengang des neu entwickelten Strahlführungssystems mit Bezeichnung der wichtigsten Komponenten.

Das SFS besteht im wesentlichen aus den beiden Baugruppen Spiegelgehäuse und Teleskopauszug. Die beiden dargestellten Spiegelgehäuse sind völlig identisch aufgebaut und bestehen aus je einem feststehenden und einem drehbar gelagerten Spiegel. Beide Spiegel sind über je zwei Zug- und Druckschrauben justierbar. Die Gehäuse selbst sind um die Strahleintritts- bzw. Strahlaustrittsachse drehbar gelagert.

Der Teleskopauszug verbindet beide Spiegelgehäuse miteinander und dient als Steuerstange. Er erlaubt den Abstand zwischen den beiden Drehspiegeln in Strahlrichtung zu verändern. Die Drehgelenke und das Teleskoprohr folgen der Bewegung der Plattform derart, daß die Spiegel sich selbsttätig so ausrichten, daß der Laserstrahl immer mittig und senkrecht auf den Ausgang des zweiten Spiegelgehäuses trifft.

Die Apertur der Spiegel und des gesamten Systems beträgt mindestens 38 mm. Bislang wurde das SFS mit beschichteten Glasspiegeln für Nd:YAG-Laser ausgestattet. Durch den Einsatz von Kupferspiegeln kann das SFS auch für den Einsatz von CO₂-

Strahlung ausgerüstet werden.

Durch eine Variation der Teleskoparmlänge ist die Möglichkeit der Anpassung an maschinentypische Arbeitsräume sehr leicht möglich. Die Führung der einzelnen Teleskoprohre erfolgt über zwei Gleitlager. Die Lagerstellen haben einen Abstand von ca. 300 mm zueinander. Um eine Verkipfung der beiden Rohre und damit eine Winkeländerung der beiden Spiegelgruppen zueinander zu verhindern, muß das Innenrohr im Außendurchmesser genau gerade sein (Abweichung von der Zylinderform nach DIN 7184). Für die exakte zentrische Ausrichtung der beiden Gleitlager zueinander werden die Innenflächen in montiertem Zustand gemeinsam bearbeitet (z.B. Honen). Es ist unbedingt darauf zu achten, daß beim auseinanderfahren der beiden Teleskoprohre ein „Ansaugeffekt“ entsteht. Die Luft muß deshalb kontrolliert an genau definierten Stellen durch Filter in das System einströmen. Eine Verschmutzung im Innern des SFS und der optischen Komponenten wird dadurch verhindert. Bei einer Strahlrohrlänge von jeweils 1225 mm und einer Überlappung der Strahlrohre von 300 mm wird ein Arbeitsraum von $800 \times 800 \times 600 \text{ mm}^3$ abgedeckt. Bei einem Arbeitsraum von $400 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$ sind Rohrlängen von jeweils 665 mm ausreichend. Der Drehwinkel um das Drehschubgelenk ist nicht beschränkt. Die Drehwinkel der Schwenkspiegel sind, bedingt durch die kompakte Ausführung des Spiegelgehäuses, auf derzeit $\pm 30^\circ$ limitiert.

Die Anbindung des Strahleintrittsgehäuses erfolgt drehbar um die Strahleintrittsachse entweder am Maschinengestell oder am Laser selbst. Die zweite Spiegelbaugruppe wird an der Rückseite der Plattform des PARALIX drehbar um die Strahlaustrittsachse befestigt. Die optische Strahlachse liegt damit parallel zur Spindel- bzw. Werkzeugachse.

Durch die Anordnung an der Plattformrückseite ist das SFS sowie die Bearbeitungsoptik vor direkter Verschmutzung während der spanenden Bearbeitung weitgehend geschützt.

Mit dem Strahlführungssystem steht eine Strahlführungskomponente zur Verfügung, die die Grundlage bildet, Hochleistungslaser (CO_2 , Nd:YAG, Scheibe) in hochdynamische Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik effizient zu integrieren.

6 Experimentelle Untersuchungen zur Strahlsicherheit

Mit dem Einsatz der Lasertechnik in Werkzeugmaschinen, ist es unerlässlich den Bereich außerhalb des Arbeitsraumes der Werkzeugmaschine vor gefährdender Streustrahlung zu schützen. Im Vordergrund dieser Untersuchungen steht dabei nicht die direkte, gerichtete Strahlung auf Schutzscheiben, Spalte und dergleichen, sondern es wird vielmehr untersucht, inwiefern und in welchem Maße Streustrahlung (ungerichtete Strahlung) durch Spalte an Türen aus dem Maschinenraum austreten kann.

Wichtig ist hier festzuhalten, daß die auf ein Werkstück gerichtet Laserstrahlung in

- absorbierte Strahlung
- transmittierte Strahlung und
- reflektierte Strahlung

aufgeteilt werden kann. Die absorbierte Laserleistung wird zur eigentlichen Materialbearbeitung benötigt. Die transmittierte Strahlung durchdringt den Werkstoff, wobei bei Metallen aufgrund der geringen Absorptionslänge von weniger als $1\text{ }\mu\text{m}$ dieser Betrag vernachlässigt werden kann. Der Anteil der reflektierten Strahlung wird von der Werkstückoberfläche in den Halbraum zurückgestrahlt.

Diese reflektierte Strahlung – direkte Reflexionen oder Streustrahlung – stellt eine nicht zu unterschätzende Gefahr sowohl für die gerätetechnischen Elemente wie Versorgungsleitungen, Strahlführungsoptiken, Dichtelemente etc. als auch für den Werker dar. Deshalb ist es unbedingt erforderlich, Maßnahmen für eine geeignete Abschirmung der Strahlung so nahe wie möglich am Ort der Entstehung zu treffen.

Laserbearbeitungszentren werden durch spezielle Schutzwände und/ oder Schutzkabinen von der Umgebung abgeschirmt. Bei Bearbeitungszentren entstehen an Türen und Durchführungen für Versorgungsleitungen mehr oder weniger große Spalte, die eine absolute Strahlungsdichtheit nicht mehr garantieren. Anhand von Messungen wird deshalb untersucht, inwieweit Streustrahlung unter verschiedenen Bedingungen außerhalb des Arbeitsraumes auftreten kann. Da die Versuche an den verschiedenen Werkzeugmaschinen nur schwer zu realisieren sind, wurden unterschiedliche Spaltgeometrien, wie sie an den Türen vorkommen können, in einem Versuchsaufbau simuliert.

6.1 Versuchsaufbau

Für die Erfassung der aus einem Spalt austretenden Streustrahlung in Abhängigkeit des Einfallswinkels α der Strahlung ist es notwendig, daß sowohl der Einstrahlwinkel α als auch der Meßwinkel β des Detektors über einen Halbkreis verstellbar sein müssen. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Bild 49 dargestellt.

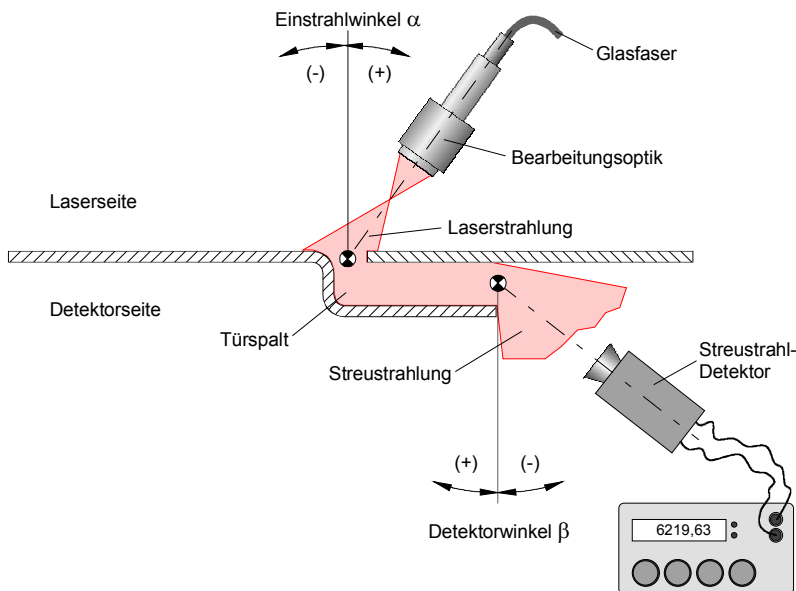


Bild 49: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Die Laserstrahlung wird fasergeführt zur Bearbeitungsoptik geleitet und trifft über einen Zwischenfokus defokussiert auf die Eintrittsöffnung des simulierten Spaltes auf. Ein Anteil der Strahlung propagiert direkt oder über Vielfachreflexion durch den Spalt und tritt auf der anderen Seite wieder aus. Die Intensität wird mit dem Detektor gemessen. Sowohl die Bearbeitungsoptik als auch der Detektor sind drehbar um die Mitte der Spaltöffnungen gelagert. Weiterhin ist der Abstand von Laseroptik und Detektor zum Spalt veränderbar, um die Abhängigkeit der Strahlintensität vom Abstand zwischen Bearbeitungsoptik und Detektor zu untersuchen.

Für die Versuche stand ein 2 kW-cw Nd:YAG-Laser der Firma HAAS zur Verfügung. Die Strahlführung erfolgt über eine Glasfaser (NA=0,2) mit einem Durchmesser von 600 μm . Die Bearbeitungsoptik mit einer Brennweite von 100 mm bildet das Faseren-

de im Abbildungsmaßstab 2:1 in die Bildebene ab. Für die Messung der Streustrahlung wurde ein Universal Radiometer Typ Rm-6600 mit pyroelektrischem Detektorkopf RKP-575 der Firma Laser-Precision verwendet.

6.2 Konstruktive Gestaltung der verschiedenen Spaltgeometrien

Im folgenden werden die verschiedenen Türspalte simuliert (s. Bild 50) und als Stumpfstoß, Überlappstoß und als U-Labyrinth bezeichnet. Dazu werden 2 mm dicke Aluminiumbleche mit einer Größe von 200 mm x 250 mm verwendet, die mit dem entsprechenden geometrischen Profil vorliegen. Die dabei entstehenden Kanten sind zunächst nicht weiter behandelt.

Der *Stumpfstoß* wird mit Hilfe zweier parallel zueinander ausgerichteter Bleche simuliert. Die Einstellung der Spaltbreite p erfolgt mittels Endmaßen und Fühlerblattlehren. Sowohl die Fokussieroptik als auch der Detektor werden so angeordnet, daß das Drehzentrum jeweils in der Mitte des Spaltes liegt.

Beim *Überlappstoß* wird der Spalt zusätzlich mit einer Lasche überdeckt. Bei dieser Stoßgeometrie erfolgt die Geometrievariation des Spaltes über die beiden Parameter Spaltbreite p und Spalthöhe s . Die Ausrichtung des Laserstrahles erfolgt wie beim Stumpfstoß. Die Drehachse des Detektors ist stets in der Mitte der durch die Lasche gebildeten Austrittsöffnung angeordnet.

Beim Türspalt *U-Labyrinth* ist der Spalt p beidseitig von einer Lasche umgeben. Der Parameter Spalthöhe s wird hier als Breite der Austrittsöffnung definiert (ausgehend von der Mittellage des Bleches in der Lasche wird der Spalt bei den Messungen verringert). Die Laserstrahlung ist mittig zur Eintrittsöffnung ausgerichtet, der Detektor entsprechend dem Überlappstoß angeordnet.

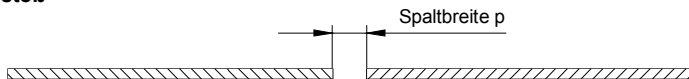
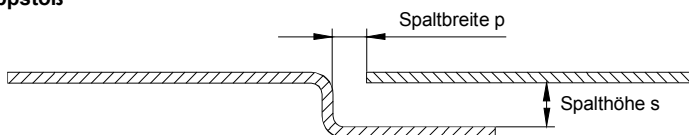
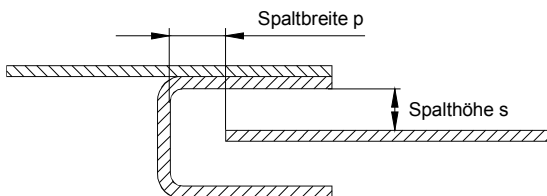
Stumpfstoß**Überlappstoß****U-Labyrinth**

Bild 50: Konstruktive Gestaltung der verschiedenen Stoßarten.

6.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche erfolgen zunächst an unbehandelten Blechen. Für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit sind die Bleche mit verschiedenen hitzebeständigen Lacken (grün und schwarz) behandelt. Um Deformationen während der Bestrahlung und die Überschreitung der maximalen Bestrahlungsstärke des Detektors zu vermeiden, ist in Vorversuchen eine geeignete Laserleistung von 240 Watt ermittelt worden. Der Abstand zwischen Laseroptik und Spalt ist zu 200 mm definiert. Mit einer Brennweite von 100 mm ergibt sich in der Spaltebene eine Strahlfleckgröße von 36 mm Durchmesser. Der Abstand der Detektorfläche zum Spalt ist auf 500 mm eingestellt worden. Lediglich bei den Untersuchungen zur Abhängigkeit der Streustrahlintensität vom Abstand Detektor - Spalt wird dieser verändert.

Die Variation des Einstrahlwinkels α und des Detektorwinkels β erfolgt derart, daß jeweils bei fest eingestelltem Einstrahlwinkel ($-58^\circ < \alpha < 58^\circ$) der Streustrahlbereich mit dem Detektor in Winkelschritten zu 5° vermessen wird. In den Bereichen eines Intensitätsmaximums wird die Schrittweite des Detektors verfeinert. Zur Ermittlung der Abhängigkeit der Streustrahlintensität von den Spaltparametern p und s erfolgen die

Messungen bei unterschiedlichen Spaltmaßkombinationen.

6.4 Auswertung der Messungen und Ergebnisse

Die maximal zulässige Bestrahlung (MZB) für die direkte Einwirkung von Laserstrahlung auf die Hornhaut des Auges bei direktem Blick in den Laserstrahl darf gemäß der Richtlinie VDE 0837 einen Wert von 9 mW/cm^2 nicht überschreiten. Diesem Wert wird eine Bestrahlungszeit t zwischen $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ und 10^{-3} s zugrunde gelegt. Laut VDE 0837 wird bei diesen Intensitätsmessungen eine Meßblende mit 7 mm Lochdurchmesser verlangt. Mit dem vorgegebenen Detektordurchmesser von 11,3 mm werden zwar höhere Werte der Streustrahlungsleistung gemessen, jedoch liegen die Ergebnisse für die Intensität dadurch auf der sicheren Seite.

6.4.1 Ergebnisse am Stumpfstoß

Die Untersuchungen am Stumpfstoß zeigen eine starke Abhängigkeit der maximal gemessenen Intensitäten in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel α . Hier muß unterschieden werden zwischen der gerichteten Strahlung, die direkt durch den Spalt durchtritt und der Strahlung, die an den Stirnflächen der Spaltränder reflektiert wird (Bild 51).

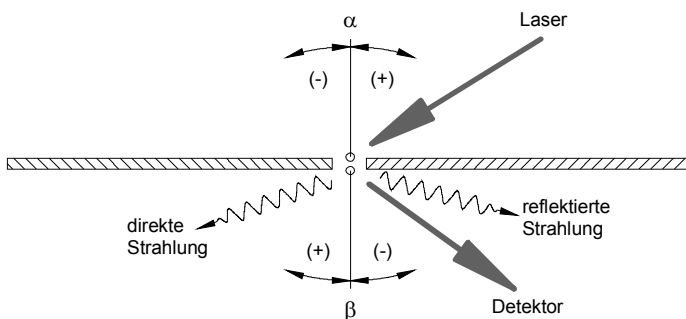


Bild 51: Meßbereiche und Strahlausbreitung am Stumpfstoß.

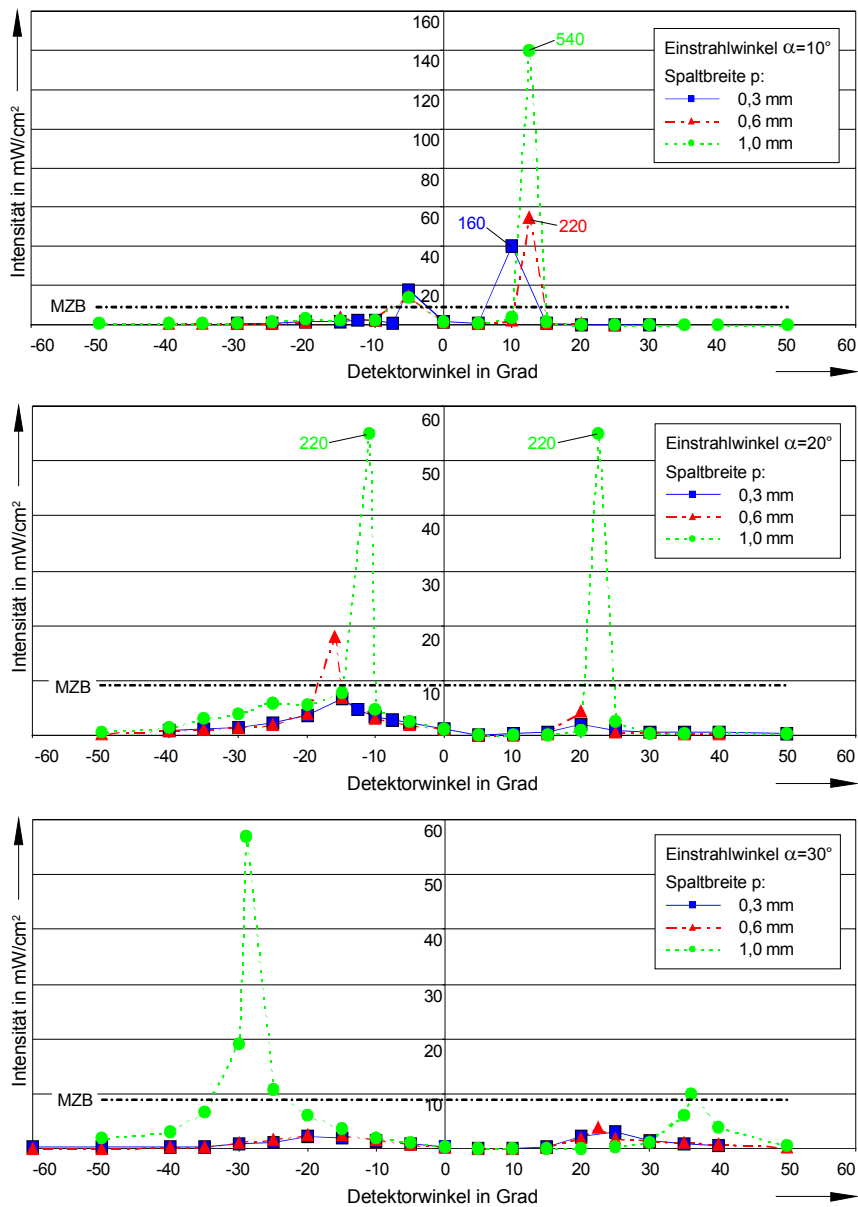


Bild 52: Intensitätsverteilung im Halfeld am Stumpfstoß bei verschiedenen Einstrahlwinkeln α .

Für einen positiven Einstrahlwinkel α kennzeichnen negative Detektorwinkel β den Bereich der reflektierten Strahlung. Im Gegensatz dazu werden im Bereich negativer Detektorwinkel β (und $\alpha > 0$) die maximalen Intensitäten durch die direkte Strahlung hervorgerufen. In den Diagrammen in Bild 52 ist zu erkennen, daß mit größer werden dem Einstrahlwinkel α die maximalen Intensitäten sich vom positiven Bereich des Detektorwinkel β hin zum negativen Bereich verschieben.

Dieser Effekt läßt sich daraus erklären, daß bei Spaltbreiten p im Bereich der Blechdicke die effektive Spaltfläche mit zunehmendem Einstrahlwinkel α abnimmt. Bei kleinem Einstrahlwinkel α entspricht die projizierte Spaltbreite nahezu dem Spaltmaß p , bei großem Einstrahlwinkel α geht sie gegen den Grenzwert Null. Bereits ab einem Einfallswinkel von $\alpha = 30^\circ$ ist nahezu kein direkter Strahldurchtritt mehr möglich, während gleichzeitig der über Einfachreflexion an der Stirnseite der Spaltbleche in den Halbraum des Detektors reflektierte Anteil zunimmt. Eine weitere Erhöhung des Einstrahlwinkels führt zur Mehrfachreflexion im Spalt und damit zu einer starken Intensitätsabschwächung (Bild 53).

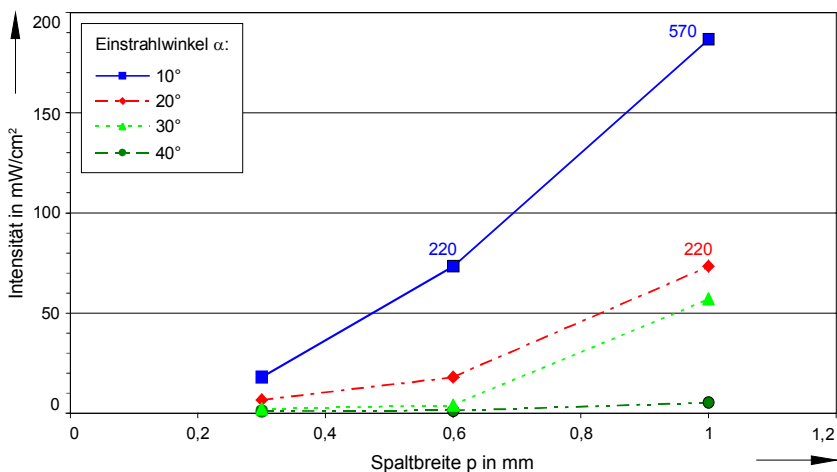


Bild 53: Maximale Intensitäten am Stumpfstoß in Abhängigkeit der Spaltbreite p .

Aus den Diagrammen in Bild 52 und Bild 53 kann entnommen werden, daß die gemessenen maximalen Intensitäten proportional zur Spaltbreite p sind. Mit Zunahme der Spaltbreite p ist auch der direkt durch den Spalt tretende Anteil an direkter Strahlung größer. Erst unterhalb einer Spaltbreite p von 0,3 mm liegen die gemessenen Intensitäten unterhalb des zulässigen Grenzwertes. Um das größte Maß an Sicherheit zu

erreichen, sollte der Stumpfstoß jedoch auf den Null-Spalt ausgelegt werden. Bei Türen bedeutet dies die schwer umzusetzende Berührung beider Elemente entlang der gesamten Kante.

6.4.2 Ergebnisse am Überlappstoß

Beim Überlappstoß wurde gegenüber dem Stumpfstoß als zusätzliche Schutzmaßnahme eine Lasche über den Spalt gebogen (Bild 54). Damit ist es nicht mehr möglich, daß direkte Strahlung durch den Spalt tritt. Mit dem Detektor wird nur noch die über Mehrfachreflexion aus den Spalt austretende Strahlung gemessen. Das in Bild 55 dargestellte Diagramm zeigt die Intensitäten in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels α und des Detektorwinkels β bei vorgegebener Spaltbreite $p=1\text{ mm}$ und Spalthöhe $s=6\text{ mm}$. Aus den Messungen ist zu erkennen, daß die Streustrahlintensitäten bei dieser Anordnung deutlich geringer als bei Stumpfstoß sind, aber die von der Richtlinie VDE 0837 maximal zulässigen Werte teilweise immer noch überschritten werden.

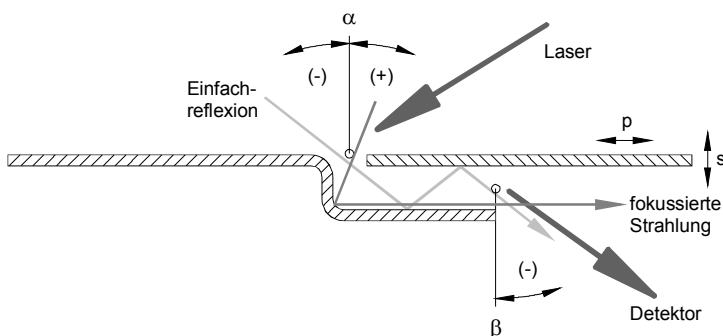


Bild 54: Meßbereiche und Strahlausbreitung am Überlappstoß.

Deutlich sind zwei Bereiche erhöhter Intensität zu erkennen. Der erste Bereich ist gekennzeichnet durch negativen Einstrahlwinkel bei in etwa gleich großem Detektorwinkel. Dieses Maximum wird vom Strahldurchtritt mit der kleinstmöglichen Zahl von Reflexionen gebildet. Der Laserstrahl tritt in dieser Konstellation von links in den Spalt ein, wird einmal an der gebogenen Lasche und ein weiteres mal am ebenen Blech reflektiert. Die austretende Strahlung ist stark gerichtet, und der Eintrittswinkel entspricht in etwa dem Austrittswinkel. Der zweite Bereich erhöhter Intensität findet sich für positive Einstrahlwinkel und maximaler Austrittswinkel von bis zu 90° . Die Ursache dieses Maximums liegt darin begründet, daß bei positiven Einstrahlwinkeln α die Strahlung in der Rundung der gebogenen Lasche fokussiert wird und streifend par-

allel zur Überlappflasche austritt.

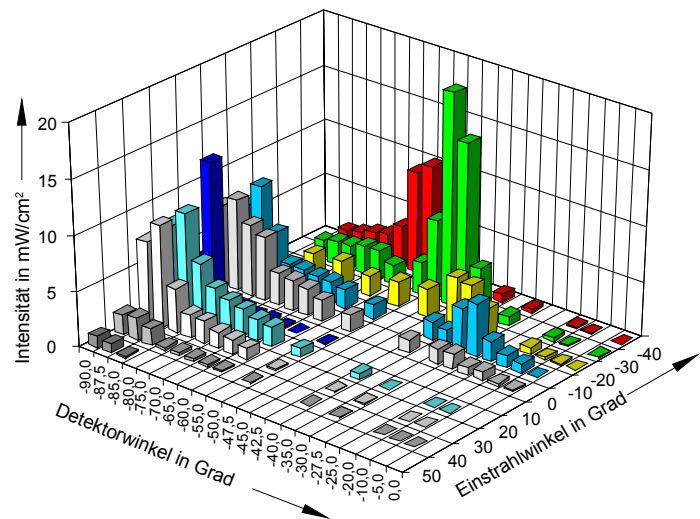


Bild 55: Intensitätsverteilung am Überlappstoß bei Spaltbreite $p=1\text{ mm}$ und Spalthöhe $s=6\text{ mm}$.

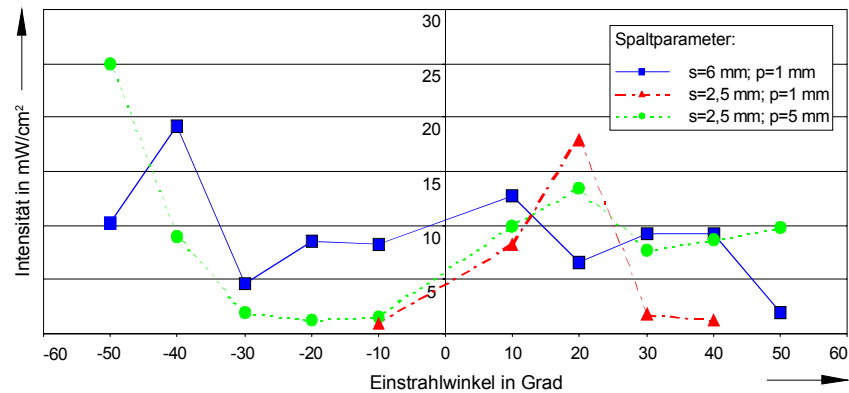


Bild 56: Maximale Intensitäten am Überlappstoß in Abhängigkeit von Spaltbreite p und Spalthöhe s .

Die maximalen Intensitäten sind in Bild 56 bei drei verschiedenen Spalteinstellungen

dargestellt. Obwohl die durch Mehrfachreflexion entstehenden Intensitätsmaxima mit abnehmender Spalthöhe s stark abgeschwächt werden, liegen die insgesamt auftretenden Maximalintensitäten aufgrund des Fokussiereffektes durch die Rundung der Lasche für alle Spaltgeometrien dennoch in der gleichen Größenordnung.

6.4.3 Ergebnisse am U-Labyrinth

Beim U-Labyrinth wurde der Spalt von beiden Seiten mit einer gebogenen Lasche umgeben (Bild 57). In dieser Anordnung werden im folgenden zwei verschiedene Spaltgrößen verglichen. Die Spalthöhe s wurde auf einen konstanten Wert von $s=5\text{ mm}$ eingestellt und nicht verändert. Die Messungen der Streustrahlintensität wurden zum einen bei einer Spaltbreite $p=1\text{ mm}$ gemessen (Bezeichnung „s5p1“). Zum anderen wurde die Geometrie des Spaltes in der folgenden Messung auf die Spaltbreite $p=5\text{ mm}$ (Bezeichnung „s5p5“) erweitert.

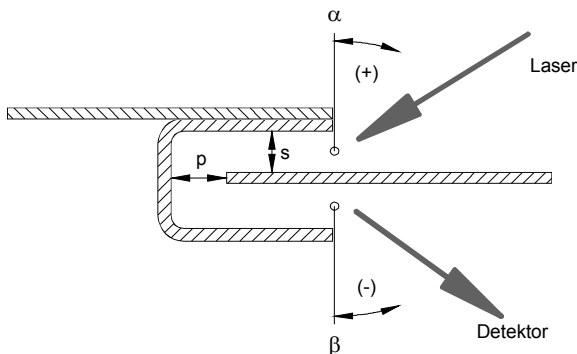


Bild 57: Meßbereiche und Strahlausbreitung am U-Labyrinth.

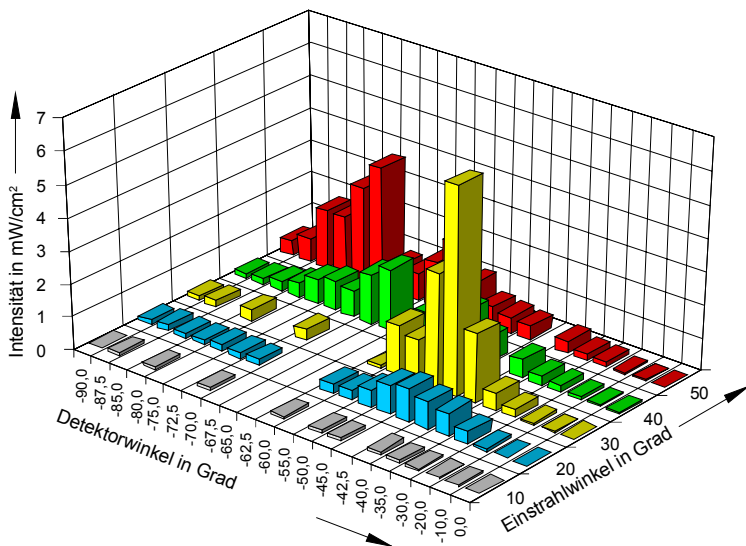


Bild 58: Intensitätsverteilung am U-Labyrinth bei Spaltbreite $p=1$ mm und Spalthöhe $s=5$ mm.

Aus dem Diagramm in Bild 58 ist zu erkennen, daß die gemessenen Intensitäten beim U-Labyrinth in der Konfiguration s5p1 deutlich unter dem von der Richtlinie VDE 0837 vorgegebenen zulässigen Grenzwert von 9 mW/cm^2 liegen. Im Gegensatz dazu werden bei der s5p5-Konfiguration extreme Intensitätswerte gemessen, die weit über dem zulässigen Grenzwert liegen (Bild 59). Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß an der Basis der U-Lasche bei ausreichend großer Spaltbreite p eine Direktreflexion möglich ist. Wie aus Bild 59 entnommen werden kann, ist dies ab einem Einstrahlwinkel α von über 40° möglich.

Die Darstellung in Bild 60 gibt die maximal ermittelten Intensitäten am U-Labyrinth bei den Konfigurationen s5p1 und s5p5 in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels wieder.

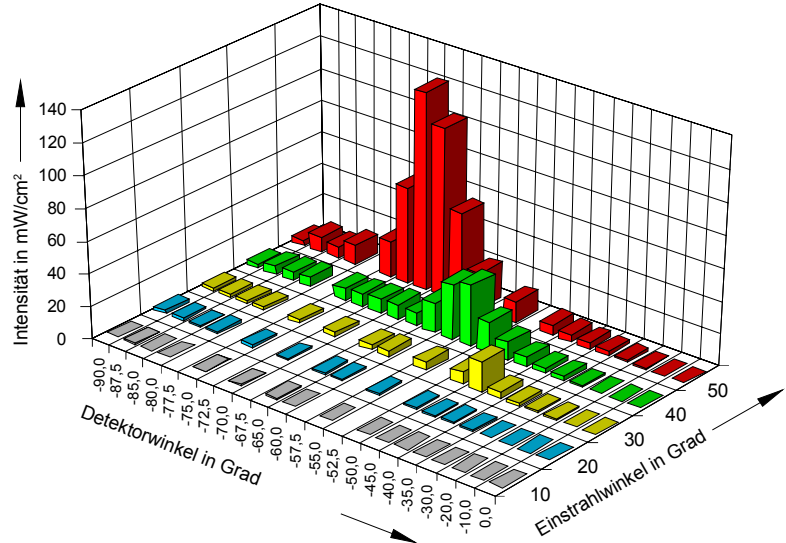


Bild 59: Intensitätsverteilung am U-Labyrinth bei Spaltbreite $p=5\text{ mm}$ und Spalthöhe $s=5\text{ mm}$.

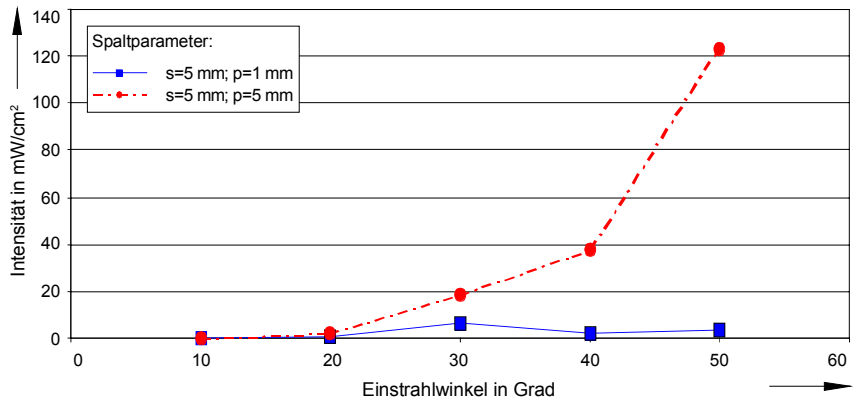


Bild 60: Maximale Intensitäten am U-Labyrinth in Abhängigkeit von Spaltbreite p und Spalthöhe s .

6.4.4 Einfluß von Werkstoff und Oberfläche

Das Absorptionsverhalten von Laserstrahlung am Werkstück und damit verbunden auch die rückreflektierte Strahlung, hängt in hohem Maße vom Werkstoff selbst, aber auch von der Oberflächenbeschaffenheit des bestrahlten Objekts ab. Zur Verdeutlichung dieses Einflusses werden verschieden beschaffene Oberflächen und Materialien unter einem Winkel von 45° bestrahlt und der Anteil der direkt rückreflektierten Strahlung gemessen. Aus gezogenem Aluminium- und Stahlblech sind Proben mit jeweils natürlicher Oberfläche sowie schwarz und grün lackierter Oberfläche hergestellt worden. Um eine Zerstörung der lackierten Oberflächen zu verhindern ist die Leistung bei diesen Versuchen von 240 W auf 120 W reduziert worden.

Die Ergebnisse sind in Bild 61 dargestellt. Deutlich ist das höhere Absorptionsverhalten von unbehandeltem Stahlblech gegenüber dem hochreflektierenden Aluminiumblech zu erkennen (ca. Faktor 2,5). Bei den lackierten Proben ist kein Unterschied im Absorptionsverhalten zwischen den beiden Werkstoffen zu messen. Sie sind deshalb nicht getrennt in den Diagrammen aufgeführt.

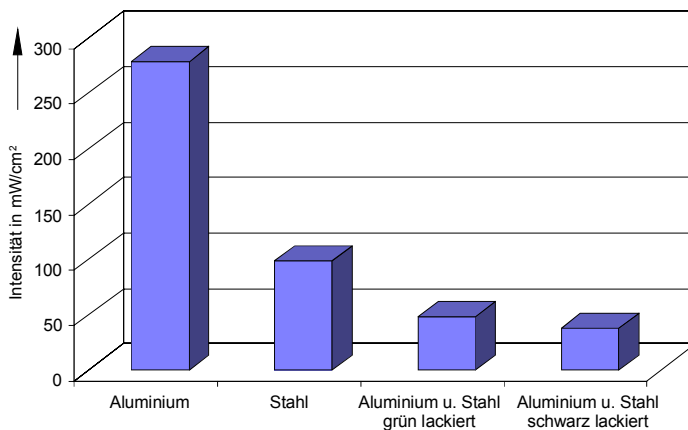


Bild 61: Direkte Reflexionsmessung an verschiedenen Oberflächen.

Diese Erkenntnisse werden nun auf die Stoßart U-Labyrinth mit grün und schwarz lackierten Blechen angewandt. In Bild 62 sind die Ergebnisse bei einem Einstrahlwinkel von 50° herausgearbeitet, dem Winkel, bei dem am unbehandelten Blech die stark erhöhten Intensitäten der Streustrahlung gemessen wurden. Deutlich ist der stark absorptions erhöhende Einfluß der beiden lackierten Oberflächen im Vergleich zur unbehandelten Oberfläche zu erkennen. Sowohl bei der grünen als auch bei der schwarzen

Oberfläche liegen die Intensitäten der Streustrahlung hier weit unter dem geforderten Grenzwert.

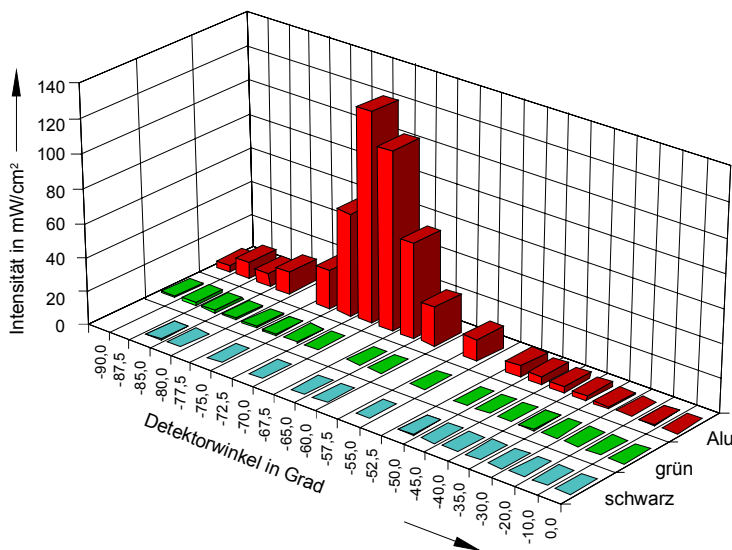


Bild 62: Intensitätsverteilung am U-Labyrinth bei verschiedenen Oberflächen (Spaltbreite $p=5$ mm, Spalthöhe $s=5$ mm).

6.4.5 Einfluß der Abstände von Laseroptik und Detektor vom Meßspalt

Die Strahlungsintensität ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes zwischen Laserfokus und Detektor:

$$I \sim \frac{1}{(a+b)^2}. \quad (18)$$

Die Strecke a kennzeichnet den Abstand des Fokus zur Eintrittsebene des Spaltes, die Strecke b beschreibt die Entfernung der Detektorfläche zur Spaltaustrittsöffnung. Die Auswirkungen dieses Zusammenhangs veranschaulichen die in Bild 63 dargestellten Meßergebnisse. Daraus wird ersichtlich, daß eine Verdoppelung des Gesamtabstandes vom Fokus zu Detektorfläche eine Reduzierung der Intensität um den Faktor vier bewirkt. Folglich können in Grenzfällen zu hohe Streustrahlintensitäten durch eine Erhöhung der Abstände zwischen Laseroptik und der Maschinenkabine bzw. zwischen Maschinenkabine und Bedienpult der Maschine mit relativ einfachen Mitteln deutlich

herabgesetzt werden.

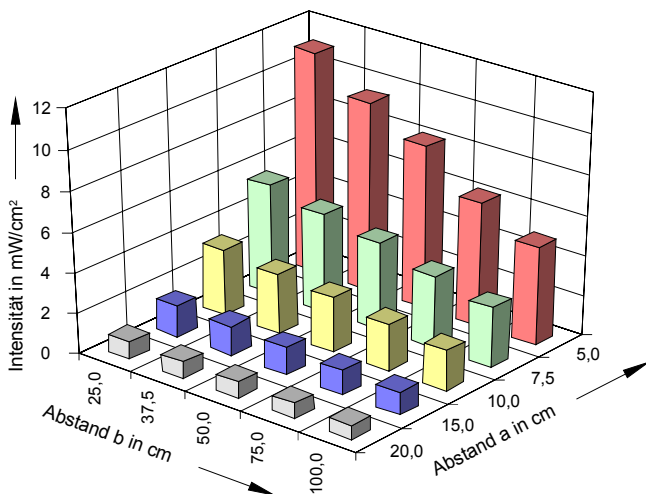


Bild 63: Experimentell ermittelte Werte für den Einfluß der Entfernung auf die Intensitätsverteilung.

6.5 Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, daß die Intensität der durch Türspalte propagierenden Streustrahlung sehr stark von der konstruktiven Gestaltung des Spaltes selbst und den geometrischen Abmessungen sowie von der Oberflächenbeschaffenheit des verwendeten Materials abhängt. Bei ungünstigen Parametern, d.h. einfachste Geometrien an den Stoßkanten von Maschinentüren (z.B. Stumpfstoß) und/ oder zu großen Spalten bei sich überlappenden Kanten von Türen und Türrahmen, werden Intensitäten festgestellt, die den maximal zulässigen Grenzwert von 9 mW/cm^2 um ein Vielfaches überstiegen. Bereits bei geringfügigen Veränderungen in der Anordnung kann die Streustrahlintensität jedoch auf einen deutlich unterhalb der zulässigen Grenze liegenden Wert reduziert werden.

Der Einstrahlwinkel α bewirkt direkt die Propagation der Strahlung im Spalt. Je nach Stoßart und Spaltbreite kann die Strahlung direkt, durch einfache oder durch vielfache Reflexion den Spalt durchlaufen. Da die Rückreflexion der Laserstrahlung vom Werkstück bei allen Fertigungsverfahren mit Laserstrahlung und damit der Einstrahlwinkel der Streustrahlung auf Türspalte nur sehr schwer bzw. kaum beeinflußt werden kann, sind geeignete konstruktive Maßnahmen zu treffen, die eine Propagation der Streu-

strahlung durch die Türspalte aus dem Arbeitsraum heraus verhindern. Der Stumpfstoß versagt hinsichtlich dieser Bedingung, da nur bei einer Spaltbreite nahe dem Null-Spalt eine direkte Durchstrahlung vermieden werden kann. Der Überlappstoß und das U-Labyrinth bieten hinsichtlich direkter Strahlung genügend Sicherheit. Allerdings darf auch in diesen Fällen die Spaltbreite p nicht zu groß sein, da sonst hohe Strahlungsintensitäten über Vielfachreflexion aus dem Spalt gelangen können.

Eine wichtige Erkenntnis der Untersuchungen liegt in der Feststellung von sehr hohen Austrittsintensitäten beim Überlappstoß. Die Innenradien an gebogenen Blechen können hierbei eine fokussierende Wirkung haben und die Intensitäten der Streustrahlung um ein Vielfaches des zulässigen Wertes erhöhen. Diese Strahlung tritt streifend entlang der Maschinenverkleidung aus dem Türspalt. Durch konstruktive Maßnahmen gilt es, derartige Rundungen zu vermeiden oder abzudecken.

Hinsichtlich möglichst geringer Strahldurchlässigkeit hat sich bei den unbeschichteten Abdeckungen das U-Labyrinth mit großem Überlappungsbereich als am besten geeignet erwiesen.

Einen gewichtigen Einfluß auf eine noch stärkere Reduzierung der austretenden Streustrahlung hat die Wahl der Oberfläche. Durch Aufbringen von geeigneten Farbschichten kann die Intensität im Vergleich zur sehr stark reflektierenden Oberfläche von Aluminium oder Stahl deutlich verringert werden. Da die stärkere Absorption zu einer höheren Erwärmung führt, sind hitzebeständige Farben oder besser noch dunkel matt-eloxierte Materialien zu verwenden.

Eine weitere Möglichkeit, die Intensität der Streustrahlung sehr wirkungsvoll zu verringern, besteht in der Vergrößerung des Abstandes vom Werkstück (Ort der Entstehung) zum Türspalt bzw. darin, den unmittelbaren Bereich um die Spaltaustrittsöffnung für den Werker unzugänglich zu machen.

Die hier ermittelten Ergebnisse können lediglich grundlegende Aussagen zum Auftreten und zur Ausbreitung von Streustrahlung durch Türspalte an Werkzeugmaschinen geben. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Streustrahlungsintensität von den technischen und technologischen Gegebenheiten ist es jedoch weiterhin unumgänglich, jedes mit einem Laser aus- bzw. nachgerüstete Bearbeitungszentrum individuell auf austretende Streustrahlung zu überprüfen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Den immer höher werden Anforderungen der Fertigungstechnik an Qualität, Verkürzung der Fertigungszeit, Flexibilität sowie Reduktion der Fertigungskosten haben bei der spanenden Fertigung die Entwicklung immer komplexer werdender Werkzeugmaschinen mit verschiedenen integrierten Funktionsgruppen hervorgerufen. Die Fertigung eines Bauteils in einer einzigen Maschine, in einer Aufspannung hat den Begriff der spanenden Komplettbearbeitung geprägt.

Die heutige Verfügbarkeit der unterschiedlichsten Hochleistungslaser ermöglicht es, die verschiedensten Fertigungsverfahren durchzuführen. Aufgrund seiner hohen Prozesssicherheit und hohen Flexibilität hat sich der Laser bereits in vielen Bereichen der industriellen Fertigung fest etabliert und einen hohen Stellenwert eingenommen. Bemerkenswert jedoch ist, daß die unterschiedlichsten Verfahren der Lasermaterialbearbeitung wie z.B. Härten, Schweißen, Beschichten nicht in den Fertigungseinrichtungen integriert, sondern in Stand-Alone-Stationen eingesetzt werden. Die hohe Flexibilität und Ansteuerbarkeit des Lasers prädestiniert dieses Werkzeug für eine Integration in Fertigungseinrichtungen.

Um dem Anwender die Hemmungen für die Investition einer laserintegrierten Komplettbearbeitung zu nehmen, werden die Vorteile dieses Verfahrens diskutiert und mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinterlegt. Es zeigt sich, daß eine reine Kostenrechnung nicht in jedem Fall das gewünschte Ergebnis, nämlich eine Reduktion der Fertigungskosten, ergibt. Die laserintegrierte Komplettbearbeitung kann in einem ersten Ansatz auch teurer als die bisherige Fertigung sein. Hier ist es erforderlich mit Hilfe der Nutzwertanalyse die nicht monetären Vorteile einer laserintegrierten Komplettbearbeitung herauszuarbeiten und in einem direkten Vergleich der konventionellen Fertigung gegenüberzustellen. Allerdings bleibt es dem Unternehmen bzw. Kostenrechner an dieser Stelle selbst überlassen welche Gewichtung er der Nutzwertanalyse bzw. welche er der Kostenrechnung gibt, um eine Entscheidung für das eine oder andere Fertigungsverfahren zu finden.

Die verschiedenen erarbeiteten Konzepte zeigen die prinzipiellen Möglichkeiten auf, den Laser als ein zusätzliches Werkzeug in Fräs-/ Bohrzentren für eine ganzheitliche Komplettbearbeitung zu integrieren. Mit einem der umgesetzten Konzepte konnten die vertikale und horizontale Spindel des Fräs-/ Bohrzentrums der Firma MAHO mit dem Werkzeug „Laser“ ausgerüstet werden. Diese Entwicklung ermöglicht jede dieser Maschinen nachträglich umzubauen. Es sind dabei keine größeren Veränderungen am Maschinenkonzept und an der Spindel erforderlich, allerdings wird der Arbeitsraum

durch die Komponenten der Strahlführung etwas beeinträchtigt.

Eine weitere Realisierung wurde an einem Bearbeitungszentrum der Firma Steinel durchgeführt. Durch eine Neuentwicklung der Drehdurchführung, Veränderungen am Bohrungsdurchmesser der internen Kühlmittelzufuhr und durch Veränderungen im Bereich der Spannzange war es möglich, die Strahlführung völlig in die Spindel zu verlegen.

Die Vorschläge zu konstruktiven Maßnahmen für zukünftige Neuentwicklungen von Spindeln, sollen dem Konstrukteur helfen diese bereits im Vorfeld zu berücksichtigen. Eine spätere Nachrüstung mit Laser wird dadurch deutlich vereinfacht bzw. ermöglicht.

Die rasanten Entwicklungsschritte im Bereich der hochdynamischen Werkzeugmaschinen und insbesondere von Maschinen mit Parallelkinematiken, rechtfertigen aufgrund des vorgestellten hohen Anwendungspotentials die Integration des Lasers als zusätzliches Werkzeug. Die hohen Beschleunigungen an der Stuart-Plattform dieser Maschinen erlaubt es jedoch nicht den Laser selbst oder die Glasfaser dort direkt anzubringen. Das entwickelte Strahlführungssystem mit sechs Freiheitsgraden ermöglicht die laserintegrierte Fertigung auch in diesen neuen Maschinenkonzepten. Dieses Strahlführungssystem ist gleichermaßen für CO₂-Laser und Nd:YAG-Laser geeignet.

Nicht zuletzt stellt der Schutz des Bedieners vor ungerichteter Streustrahlung eine wichtige Rolle und ein nicht zu unterschätzendes Gefahrenpotential dar. Die bei der Lasermaterialbearbeitung auftretende ungerichteten Streustrahlung kann durch Spalte und Ritze an Maschinentüren gelangen. Die experimentell durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß die konstruktive Gestaltung der Türspalte an Werkzeugmaschinen bereits heute einen ausreichenden Schutz vor aus dem Arbeitsraum austretender Streustrahlung bietet. Die gemessenen Werte liegen deutlich unter dem von der VDE 0837 vorgegebenen Richtwert.

Mit der laserintegrierten Komplettbearbeitung in Fräsmaschinen werden neue Arbeitsgebiete erschlossen sowie neue Fertigungsverfahren und Produktionsstrategien ermöglicht. Der Erfolg dieser Fertigungsstrategie ist zum einen davon abhängig, inwieweit bereits im Vorfeld der Entwicklung und Konstruktion die Anforderungen einer lasergerechten Konstruktion berücksichtigt und auch umgesetzt werden. Zum anderen ist die Verbreitung der Lasertechnik in besonderem Maße auch von der Entwicklung der Laserhardwarekosten abhängig.

Man darf gespannt sein, wann die laserintegrierte Komplettbearbeitung fester Bestandteil einer produktivitätsoptimierten Fertigungslinie sein wird.

8 Literatur

- [1] HAUG, U.: *Gut besucht – Messebericht AMB*. Maschinenmarkt 96 (1990) 41, S.70-75.
- [2] SCHAAL, H.: *Erschließung technischer und organisatorischer Potentiale durch die Komplettbearbeitung auf Drehmaschinen mit Hilfe der Teilanalyse*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1993. Berlin: Springer, 1993.
- [3] N.N.: *Fräsen ins Drehen integriert*. mav (Maschinen Anlagen Verfahren) 6, 1997, S.28.
- [4] SCHULZ, H., SCHERER, J.: *Bearbeiten bei hohen Schnittgeschwindigkeiten*. Werkstatt und Betrieb 122 (1989), S.133-142.
- [5] AUTORENKOLLEKTIV: *Wettbewerbsfaktor Zeit*. Tagungsband zum Münchner Kolloquium '91, Heidelberg: Springer, 1991.
- [6] GEBHARDT, A.: *Rapid Prototyping*. München: Hanser, 1996.
- [7] HÜGEL, H.: *Laser – Universalgerät oder Spezialwerkzeug. Die Aufgabe bestimmt die Anforderungen, die Strahleigenschaften die Effizienz des Prozesses*. wt-Werkstatttechnik 87 (1997), S. 281 – 288. Springer-VDI-Verlag, 1997.
- [8] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1992 (Teubner Studienbücher Maschinenbau).
- [9] KNEUBÜHL, F.; SIGRIST, M.: *Laser*. Stuttgart: B.G. Teubner, 1989 (Teubner Studienbücher Physik).
- [10] IFFLÄNDER, R.: *Festkörperlaser zur Materialbearbeitung*. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [11] WEBER, H.; HERZIGER, G.: *Laser, Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim a. d. Bergstr.: Physik Verlag,. 1972.
- [12] CHEO, P.K.: *Handbook of Solid-State Lasers*. New York: Dekker, 1989.

- [13] WINSTEL, G.H.; WEYRICH, C.: *Optoelektronik. Band 1: Lumineszenz- und Laserdioden*. Berlin: Springer, 1981.
- [14] KÖCHNER, W.: *Solid-State Laser Engineering*. 2nd Edition, Berlin: Springer, 1988.
- [15] NORM DIN/ EN ISO 11145: *Laser und Laseranlagen – Begriffe und Formelzeichen*. Berlin: Beuth Verlag, 1994.
- [16] WAGNER, H.P.; BORIK, S.; GIESEN, A.: *Änderung der Eigenschaften optischer Komponenten bei Bestrahlung*. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Vorträge des 9. Internationalen Kongresses Laser und Optoelektronik in der Technik, München, 1989. Berlin: Springer, 1990, S. 789.
- [17] BEA, M.; BORIK, S.; GIESEN, A.; ZOSKE, U.: *Transient Behavior of Optical Components and Phase Correction by Low Cost Adaptive Mirror*. In: Proceedings of Laser Materials Processing (ICALEO), Boston, 1990. Orlando: Laser Institut of America (LIA), 1991, S.83 (LIA Vol.71).
- [18] MATSUMOTO, T.; SEKI, Y.; YASKUDA, K.: *Evaluation of the Transmission Characteristics of CO₂-Laser Beam in a Hollow Waveguide*. In: Proceedings of LAMP 1992, Nagaoka, Japan.
- [19] HONGO, A.; MOROSAWA K.; SHIOTA, T.; SUZUKI, K.; IWASAKI, S.; MIYAGI, M.: *Transmission of 1 kW-class CO₂ Laser Light Through Circular Hollow Waveguides for Materialprocessing*. Applied Physics Letters 58 (15), 1991, S.1582-1584.
- [20] MATSUURA, Y.; MIYAGI, M.: *Er:YAG, CO and CO₂ Laser Delivery by ZnS-coated Ag Hollow Waveguides*. Applied Optics 32 (00), 1993.
- [21] OPOWER, H.; GEHRINGER, H.: *Flexible Hollow Waveguides for Three Dimensional Manufacturing Process with High Power CO₂ Laser Radiation*. In: Laser Applications in the Automotive Industries (Proceedings of the 25th International Symposium on Automotive Technology and Automation) ISATA, Florence, 1992.
- [22] N.N.: *Produktionformation metallischer Hohlleiter für CO₂-Laser bis 1 kW*. Hitachi: 1991.

- [23] N.N.: *Produktionformation flexible Strahlführung für CO₂-Laser als Linsenkette*. GFO: 1993.
- [24] SEILER, P.; HUNSDÖRFER, R.: *Der Charme der Scheibe: Effizienz bei bestem Strahl*. EuroLaser 2, 1999, S. 10-15.
- [25] HOMBURG, A.; MEYER, C.: *Strahlanalyse eines kW-Festkörperlaser mit Lichtleitfaser*. Laser Magazin 4/1989, S. 19-25.
- [26] TÖNSHOFF, H.K.; BESKE, E. U.: *Flexible Anwendung von kW-Nd:YAG-Lasern*. In: Vorträge zur 2. Tagung Laser-Material-Bearbeitung für den Automobilbau, Bremen, 1990. Bremen: BIAS Schriftenreihe, 1990, S. 30-40.
- [27] SCHRÖDER, G.: *Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen*. Würzburg: Vogel, 1990.
- [28] GÖRLICH, S.; LUDWIG, M.; RICHTER, W.: *Einkopplung von Leistungslaserstrahlung in Lichtleiter*. Feingerätetechnik, Berlin 40 (1991) 3, S. 108-112.
- [29] MAYER, A.: *Lasermarkt: Stand und Perspektiven*. In: Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, FGSW (Hrsg.): CD-ROM zu den Vorträgen der Stuttgarter Lasertage 1999 (SLT '99). Stuttgart., 1999.
- [30] Patentschrift: *Laseranordnungen*. Patentnummer DE4102505C2.
- [31] MEINERS, E.: *Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß*. Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart: B. G. Teubner, 1995 (Forschungsberichte des IFSW).
- [32] WIEDMAIER, M.: *Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren*. Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart: B. G. Teubner, 1997 (Forschungsberichte des IFSW).
- [33] HACK, R.: *System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW*. Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart: B. G. Teubner, 1997 (Forschungsberichte des IFSW).
- [34] PRODUKTINFORMATION: *Diodengepumpte Nd:YAG-Laser: Baureihe Rofin DY 044*. Rofin Sinar GmbH, Hamburg, Deutschland.

- [35] GIESEN, A.; OPOWER, H.: *Diodenlaser und diodengepumpte Festkörperlaser für die Materialbearbeitung*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H. W.; Sigel, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT '96)*, Stuttgart. Wiesbaden: Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V., 1996, S. 11.
- [36] GIESEN, A.; HÜGEL, H.; VOSS, A.; WITTIG, K.; BRAUCH U.; OPOWER H.: *Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers*. *Applied Physics B* 58, 1994, S. 365.
- [37] HÜGEL, H.; OPOWER, H.; SEILER, P.: *Neue Hochleistungslaser für die Fertigung*. In: Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, FGSW (Hrsg.): *CD-ROM zu den Vorträgen der Stuttgarter Lasertage 1999 (SLT '99)*. Stuttgart, 1999.
- [38] N.N.: *Innovation in Produkten und neue diodengepumpte Scheibenlaser – Vom Turboresonator bis zum Scheibenlaser*. *Lasermarkt* 2000, S. 66.
- [39] MANN, K.; VOß, A.; HUONKER, M.: *Der Scheibenlaser, ein neues Festkörperlaserkonzept*. *EALA 2000*, 1st European Conference and Exhibition – Laser Application in Car-body Production. 27-28 Januar 2000, Bad Nauheim.
- [40] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität*. Habilitationsschrift, Stuttgart: B. G. Teubner, 1995 (Forschungsberichte des IFSW).
- [41] HILLER, N.: *Halbleiterlaserdioden: Grundlagen, Strukturen, Eigenschaften, Anwendungen*. In: Kohler, H. (Hrsg.): *Laser: Technologie und Anwendungen* (2. Ausgabe), Essen: Vulkan-Verlag, 1993.
- [42] MÜLLER-LUFT, S.: *Temperatur und wellenlängenabhängige Absorption von Aluminium und Aluminiumwerkstoffen*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Diplomarbeit, 1994, (IFSW 94-03).
- [43] TODD, S.: *Aluminium-Free Laser Diodes*. *CLEO '98*, May 1998

- [44] HAAG, M.; HERRMANN, A.; JÄGER, E.; LINK, M.: *Diodenlaser: Ein neues Strahlwerkzeug für die Produktion*. In: Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, FGSW (Hrsg.): CD-ROM zu den Vorträgen der Stuttgarter Lasertage 1999 (SLT '99). Stuttgart., 1999.
- [45] HAAG, M.; KRASTEL, K.; DRECHSEL, J.; RUDLAFF, T.: *Einsatzmöglichkeiten eines Hochleistungsdiodenlasers in der Materialbearbeitung*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H. W.; Sigel, J. (Hrsg.): Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT '96), Stuttgart. Wiesbaden: Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V., 1996, S. 829.
- [46] N.N.: *Diodenlaser der neuesten Generation – Ein Zwerg wird erwachsen*. LASER 3, 1999, S. 40.
- [47] PRODUKTINFORMATION: *Kleiner Fokus – große Leistung*. Laserline, Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb von Diodenlasern mbH, Koblenz, Deutschland.
- [48] PRODUKTINFORMATION: *High Power Diode Lasers*. JENOPTIK Laserdiode GmbH, Jena, Deutschland.
- [49] PRODUKTINFORMATION: *Hochleistungs-Diodenlaser*. FISBA-Optik AG, St. Gallen, Schweiz.
- [50] LEWIS, J.R.: *Device for Optical Converting a Plurality of Beams*. Polaroid Corporation, Internationale Patentschrift WO 96/04584, 1996.
- [51] YAMAGUCHI, S.; KOBAYASHI, T.; CHIBA, K.: *Collimation of Emissions from a High-power Multistripe Laser-diode Bar with Multiprism Array Coupling and Focusing to a Small Spot*. Opt. Letters 20, 1995.
- [52] LUFT, J.: *Hochleistungsdiodenlaser für direkte Anwendungen sowie zum Pumpen von Festkörperlasern*. Forschungsbericht Laser 2000, Industrieverbund Hochleistungsdiodenlaser (Siemens AG).
- [53] WOLFF, D.: *Faserkopplung von Hochleistungsdiodenlasern*. Workshop "Anwendung von Hochleistungsdiodenlasern", Dresden, 19.01.1999, CD-ROM.
- [54] BAUMANN, M.: *Fasergekoppelte Hochleistungs-Diodenlasersysteme mit Treppenspiegeln*. Laseropto 31, 1/1999, S.58.

- [55] PRODUKTINFORMATION: *Hochleistungs-Diodenlaser*. Albers Laser GmbH, Konstanz, Deutschland.
- [56] PRODUKTINFORMATION: *Hybrid Optical Chip*. LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH, Dortmund, Deutschland.
- [57] LOOSEN, P.: *Advanced Concepts of using Diode Lasers in Material Processing*. In: Proceedings of the Conference on Lasers in Material Processing, Laser '97, München, 1997, SPIE Vol 3097, S.480.
- [58] HAAG, M.: *Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlaser*. Universität Stuttgart, Dissertation, München: Utz-Verlag, 2000 (Forschungsberichte des IFSW).
- [59] HÜGEL, H.; WIEDMAIER, M.; RUDLAFF, T.: *Laserprocessing integrated in machine tools – design, applications, economy*. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): *Laser Assisted Net Shape Engineering (Proc. of the LANE'94)*, Erlangen 1994. Bamberg: Meisenbach, 1994.
- [60] EBERL, G.; HILDEBRAND, P.; KÜHL, M.; SUTOR, U.; HÜGEL, H.; MEINERS, E.; WIEDMAIER, M.; ZELLER, T.: *Laserspanen eine neue Technologie zum Abtragen*. *Laser und Optoelektronik*, 25 (1993) Nr. 3, S. 80-87.
- [61] WOLFRUM, S.: *Einsatz des Laserspanens mit einem 50 W cw Nd:YAG-Laser zum Kantenbrechen*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 94-66), 1994.
- [62] DIENERT, J.: *Reaktives Entgraten mit einem Nd:YAG-Laser*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 95-17), 1995.
- [63] N.N.: *Cutting the flash and the cost of forgings by laser*. *Metalworking Production*, 130 (1986) 11, S.36.
- [64] SCHÄFER, P.; KAISER, E.: *Feinschneiden mit Festkörperlaser*. In: VDI-Seminar BW 33-11-04 „Laser als Werkzeug in der Feinwerktechnik und Mikrotechnik“. Düsseldorf: VDI, 1995.
- [65] RADAJ, D. U.A.: *Laserschweißgerechtes Konstruieren*. Forschungsbericht Stuttgart: Daimler-Benz, 1993.

- [66] VOLZ, R.: *Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern*. Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart: B. G. Teubner, 1998 (Forschungsberichte des IFSW).
- [67] SIGEL, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Integration of the generative LAPS-J process into a CNC turning center*. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): *Laser Assisted Net Shape Engineering (Proc. of the LANE'97, 24.-26. Sep. 1997, Erlangen)*. Bamberg: Meisenbach, 1997, S. 733.
- [68] KÖNIG, W.; ZABOKLICKI, A.: *Laser assisted hot machining processes: technological potentials*. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): *Laser Assisted Net Shape Engineering (Proc. of the LANE'94)*, Erlangen 1994. Bamberg: Meisenbach, 1994, S. 389-404.
- [69] WIEDMAIER, M.; MEINERS, E.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Integrierter Lasereinsatz erweitert Komplettbearbeitung in Drehzentren*. VDI-Z, 136 (1994), Nr. 4, S. 78-81.
- [70] SPUR, G.: *Keramikbearbeitung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1989.
- [71] KÖNIG, W.; WAGEMANN, A.; MAYROSE, H.-G.: *Laserunterstütztes Drehen von heißgepreßtem Silizium*. Industrieanzeiger, 1990, Nr. 3/4, S. 38-39.
- [72] RAJAGOPAL, S.: *Laser assisted machining of tough materials*. Laser, March 1982, S. 49-55.
- [73] KÖNIG, W.; TREPPE, F.; ZABOKLICKI, A.: *Laserunterstütztes Fräsen*. VDI-Z, 134 (1992) Nr. 2, S. 43-48.
- [74] N.N.: *Laserunterstützte Keramikbearbeitung*. Laser-Praxis, März 2000, S. 20.
- [75] MÜLLER-HUMMEL, P.: *Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung*. Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart: B. G. Teubner, 1999 (Forschungsberichte des IFSW).
- [76] ZABOKLICKI, A.; DEMMER, A.: *Laser assisted pressure shaping of metal*. OLE, Februar 1996, S. 12.

- [77] LOPEZ, C. D.; DUBSLAFF, J.; HÖFLING, R.; ASWENDT, P.: *Application of a high-power diode laser for laser bending*. In: Proceedings of the Conference on Lasers in Material Processing, München, 1997, SPIE Vol 3097.
- [78] KRASTEL, K.; DRECHSEL, J.: *Laserintegration in spanende Werkzeugmaschinen – Komplettbearbeitung*. In Proceedings of 44th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 20-23, 1999.
- [79] COPLEY, S. M.; BASS, M.: *Shaping Materials with a Continuous Wave Carbon Dioxide Laser*. In: Applications of Lasers in Material Processing (Proceedings of a Conference, Washington D.C., 18.-24.04.1979), S. 121-134.
- [80] RAJAGOPAL, S.; PLANKENHORN, D. J.; HILL, V.: *Machining Aerospace Alloys with the Aid of a 15 kW Laser*. Journal of applied metalworking 2, No. 3 July 1982.
- [81] N.N.: *Laser Machining, Chunk by Chunk*. American Machinist 129 (1985), Nr. 2.
- [82] FARNUM, G.-T.: *Reinventing the Lathe*. Manufacturing Engineering 96 (1986), Nr. 6, S. 36-39.
- [83] WECK, M.; MAYROSE, H.-G.: *Laserintegration in Bearbeitungsmaschinen*. Industrie-Anzeiger 111 (1989) Nr. 48, S. 46-47.
- [84] DRECHSEL, J.: *Die Integration der Lasertechnik in den Bearbeitungsmodul Drehen*. TU Karl-Marx-Stadt, Sektion Fertigungsprozeß und -mittel, Diplomarbeit, 1990.
- [85] TESCHAUER, G.; WÄTZIG, R.; DRECHSEL, J.: *Verfahrenskombination Laser- und spanende Bearbeitung in Werkzeugmaschinen*. dima (die maschine) 10/91 (1991), S. 30-32.
- [86] N.N.: *Laser-Technik einmal anders*. mav (Maschinen Anlagen Verfahren) 9, 1993, S. 18.
- [87] WIESNER, F.: *Laserintegration in ein CNC-Dreh-Fräszentrum: Präzision im Laserlicht*. Betriebstechnik 3/94 (1994), S. 56-57.

- [88] KRASTEL, K.; DRECHSEL, J.: *Integration of laser processing in machine tools and their economy*. In: Proceedings of SPIE – Solid State Lasers VIII, Photonics West '99, San Jose, California, 1999, SPIE Vol 3613, S. 65.
- [89] NIETHAMMER, R.: *Integration des Lasers in bestehende Werkzeugmaschinen*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 91-21), 1991.
- [90] BACHER, C.: *Neukonstruktion eines Optikkopfes zur Aufnahme im Werkzeugwechselsystem eines Drehzentrums*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 93-04), 1993.
- [91] DAHLKE, P.: *Konstruktion einer YAG-Laseroptik für ein Drehzentrum INDEX G200 mit Y/B-Achse*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 91-21), 1991.
- [92] RUDLAFF, T.; PESCH, M.; WIEDMAIER, M.; BRANDNER, M.: *Laserintegrierte Komplettbearbeitung – erste Anwendung in der Praxis*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H. W.; Sigel, J. (Hrsg.): Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT '96), Stuttgart. Wiesbaden: Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V., 1996.
- [93] N.N.: *In Serie laserunterstützt drehen – CNC-Drehmaschine mit Diodenlaser*. Laser-Praxis, März 2000, S. 20.
- [94] N.N.: *Laser-Weltpremiere zur 3. EMO in Mailand. Trumpf pulst sanft aufs Blech*. Maschine und Werkzeug 80 (1979) Nr.23, S. 22-23.
- [95] BENZINGER, M.; GOBEL, C.: *Integration von CO₂-Lasern in Fertigungssysteme für die Blechbearbeitung*. VDI-Z 132 (1990), Nr.1, S. 40-45.
- [96] PRODUKTINFORMATION: *Kombinierte Bearbeitung heißt Komplettbearbeitung*. Fa. Trumpf, Ditzingen, Deutschland.
- [97] SUMMERAUER, I.: *Kombination der Stanntechnik mit anderen Fertigungstechnologien*. Dokumentation Firma Bruderer, 1996.
- [98] WESTKÄMPER, E.; LANG, S.: *Innovationspotentiale durch Laserintegration in Werkzeugmaschinen*. dima (die maschine) 8-9/93 (1993), S. 40-41.

- [99] GRIMM, H.; LANG, W.; BERGEN, K.-H.; LANG, E.; KLINK, U.: *Honverfahren zur Feinbearbeitung von Werkstückoberflächen*. Offenlegungsschrift EP 565742, 20.10.1993, Maschinenfabrik Gehring GmbH & Co.
- [100] ZIEGLER, TH.: *Kosten- und Nutzenbetrachtung bei der laserintegrierten Komplettbearbeitung*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 94-15), 1994.
- [101] HACKSTEIN, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2. unveränderte Auflage, 1988.
- [102] FURKERT, M.: *Integration des Werkzeuges Laserstrahl in ein Bearbeitungszentrum*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Diplomarbeit (IFSW 93-42), 1993.
- [103] LIPPERT-HERTLE, A.: *Integration eines Nd:YAG-Lasers in ein Bearbeitungszentrum*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 95-03), 1995.
- [104] FRIEDRICH, L. K.: *Die Diskussion um normfähige Schnittstellen zwischen Maschine und Werkzeug geht weiter*. dima (die maschine) 4/93 (1993), S. 16-21.
- [105] MÜLLER, H. K.: *Abdichtung bewegter Maschinenteile*. Waiblingen: Medienverlag U. Müller, 1990.
- [106] HEISEL, U.: *Grundlagen der Werkzeugmaschinen*. Universität Stuttgart, Institut für Werkzeugmaschinen, Vorlesungsmanuskript, 1989.
- [107] PRODUKTINFORMATION: *Katalog H8D – Miniaturwälzlager 1995*. RMB Miniaturwälzlager AG, Biel, Schweiz.
- [108] N.N.: *Werbefilm zur Werkzeugmaschine MAHO LASERCAV*. 1995, Fa. Maho AG, Pfronten, Deutschland.
- [109] AMENDE, W.: *Oberflächen mit Laser härten und beschichten*. mav (Maschinen Anlagen Verfahren) 5, 1999, S. 72.
- [110] LEIBINGER, B.: *Lasergehärtete Biegewerkzeuge sorgen dauerhaft für Präzision*. mav (Maschinen Anlagen Verfahren) 12, 1999, S. 16.

- [111] ULLMANN, C.: *Mehr Leistung, bessere Strahlqualität*. mav (Maschinen Anlagen Verfahren) 5, 1999, S. 76.
- [112] DIMTER, M. F.: *Laserintegrierte Komplettbearbeitung – Verfahrensqualifikation für das Schneiden, Schweißen und Härten*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Studienarbeit (IFSW 97-02), 1997.
- [113] KRASTEL, K.; GRINGEL, M.; HÜGEL, H.: *Laserbearbeitungsanlagen – Stand der Technik und Leistungspotential*. dima (die maschine) 4/99 (1999), S. 12-22.
- [114] HÜGEL, H.: *Neue Hochleistungslaser – Entwicklungstendenzen und fertigungstechnische Einsatzpotentiale*. Fertigungstechnisches Kolloquium (FTK) 2000, Stuttgart, Springer-Verlag, 2000.
- [115] PRITSCHOW, G.: *On the influence of the velocity gain factor on the path deviation*. In: Annals of the CIRP, Vol. 45, Nr. 1, 1996.
- [116] HEISEL, U.; GRINGEL, M.: *Machine tool design requirements for high speed machining*. Annals of the CIRP, Vol. 45, Nr. 1, 1996.
- [117] TÖNSHOFF, H.K.; SOEHNER, C.: *Georg V: Parallelroboter für die Laserbearbeitung*. EuroLaser 4/97, 1997, S. 32-35.
- [118] PRITSCHOW, G.; WURST, K.-H.: *Zur Gestaltungs- und Konstruktionssystematik von Maschinen mit Stabkinematiken*. wt-Produktion und Management 87 (1997) 6, S. 46-51, Springer-VDI-Verlag, 1997.
- [119] GOHRITZ, A.: *Anforderungen an parallelstrukturgerechte Baugruppen*. In: Berichte aus dem IWU, Bd. 1, Verlag wissenschaftlicher Scripten, Zwickau, 1998.
- [120] HEISEL, U.; GRINGEL, M.; MAIER, V.: *Eine neue Generation der Werkzeugmaschinen?* dima (die maschine), 6/96 (1996), S. 130-135.
- [121] FRENOY, O.: *Urane SX – Le concept d’ultra agilité*. Machine Automation, Nr. 21, 5/1999, S. 10-11.
- [122] HEISEL, U.; HESTERMANN, J.-O.; BÖHLER, H.; PLISCHKE, N.; THAYSEN, O.: *Fünf-Seiten-Bearbeitung mit Parallelkinematik-Werkzeugmaschinen*. VDI-Z 142 (2000), Nr.6, S. 33-37.

- [123] SALVO, G.: *Persönliche Mitteilung zu Untersuchungen der dynamischen Belastung von Hochleistungsdiodenlasern der Fa. FISBA Optik AG*. St. Gallen, 1999.
- [124] HAAG, M.: *Persönliche Mitteilung zur Gewährleistung der Stabilität des mechanischen Aufbaus bei Erschütterungen und Beschleunigungen von Hochleistungsdiodenlasern der Fa. DILAS*. Mainz, 2000.
- [125] SCHÄFER, P.: *Persönliche Mitteilung zur konstruktiven Auslegung und Belastung von Glasfasern*. Fa. Haas. Schramberg, 1999.
- [126] PRODUKTINFORMATION: *Laserkomponenten: Laser-Strahlführungssysteme, Gelenkarme Multiax*. Fa. Carl Zeiss, Geschäftsbereich: Optische und Elektronische Systemkomponenten, Oberkochen, Deutschland.
- [127] PRODUKTINFORMATION: *TRUMPF Laserarm TLA 60*. Ident-Nr. 147998-30-10-98, TRUMPF Lasertechnik GmbH, Ditzingen, Deutschland.
- [128] Wahl, R.: *Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit der Steuerung der Polarisationsrichtung*. Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart: B. G. Teubner, 1994 (Forschungsberichte des IFSW).
- [129] Dubbel: *Taschenbuch für den Maschinenbau*. 17. Auflage. Berlin: Springer, 1990.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei allen, die mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart in der Lasergruppe unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Professor Dr.-Ing. H. Hügel, Leiter des Instituts für Strahlwerkzeuge, für seinen fachlichen Rat und seine Unterstützung,

Herrn Professor Dr.-Ing. U. Heisel für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes,

meinen beiden langjährigen Kollegen Jan Drechsel und Matthias Haag sowie meinen Projektkollegen am IFSW Mathias Wiedmaier und Klaus Frederking für die freundschaftliche Zusammenarbeit und die Bereitschaft für zahlreiche Diskussionen,

dem ehemaligen Geschäftsführer Joachim Berkemer, der sich für die Verbesserung der Promotionsbedingungen am ZFS einsetzte,

allen nicht erwähnten Kolleginnen und Kollegen am IFSW und ZFS aus Werkstatt, Sekretariat, Verwaltung und den anderen Fachbereichen für das angenehme und humorvolle Arbeitsklima.

Herzlichen Dank auch meiner Frau Ingrid, die mich während meiner Arbeiten unterstützte sowie meinen Eltern, die mit der Finanzierung meines Studiums den Grundstein für diese Arbeit legten.

Stuttgart, im Juli 2002

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von
Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im
Strahlführungssystem von
Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende
Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen
beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des
Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die
Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell
längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit
Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter
Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in
längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der
Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger
Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer
Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in
Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und
Prozeßeffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und
Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als
zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von
Gasentladungsstrecken für CO₂-
Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur
Qualitätssicherung beim gepulsten
Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle
Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden
dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch
Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und
deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißbeignung von Aluminiumwerkstoffen
für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Pläß, Wilfried

Zerstörsschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur
Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim
Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der
Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur
Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und
Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminium-
werkstoffen mit Festkörperlasern für den
Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf
Glas- und Kunststoffsubstraten für die Her-
stellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung
des Weichlötens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften
von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des
Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle
Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschwei-
ßen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven
Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2