

*Robert Schmidt-Hebbel*

## Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher

ISBN 3-446-17778-7





Robert Schmidt-Hebbel

*Laserstrahlbohren  
durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher*



Robert Schmidt-Hebbel

*Laserstrahlbohren  
durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher*

Bericht aus dem Lehrstuhl für  
Fertigungstechnologie  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

**LFT**



Carl Hanser Verlag München Wien

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	14. Juli 1993
Tag der Promotion:	30. November 1993
Dekan:	Prof. Dr. Dr. h.c. F. Durst
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger Prof. Dr.-Ing. H. W. Bergmann

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Schmidt-Hebbel, Robert:**

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher/  
vorgelegt von Robert Schmidt-Hebbel. – München; Wien: Hanser, 1994  
(Fertigungstechnik – Erlangen; 38)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1993  
ISBN 3-446-17778-7

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1993  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germanv

## Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg. Wichtige Bestandteile wurden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungsvorhabens erarbeitet. Als Industriepartner wirkten an diesem Vorhaben die Firmen Robert Bosch GmbH und Haas-Laser GmbH mit. Allen drei Förderern gilt mein ausdrücklicher Dank.

Herrn Univ.-Professor Dr.-Ing. Dr.h.c. M. Geiger, Ordinarius am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, danke ich besonders für die aktive fachliche Unterstützung sowie die Übernahme des Hauptreferats zu dieser Dissertation.

Des weiteren gilt mein Dank Herrn Univ.-Professor Dr.-Ing. H.W. Bergmann, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften II an obengenannter Universität, für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen ergänzenden Hinweise.

Viele Versuchsergebnisse und Anregungen verdanke ich den Kolleginnen und Kollegen sowie Studentinnen und Studenten am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie und im Forschungsverbund Lasertechnologie Erlangen. Sie haben mich durch aktive Mitarbeit am Forschungsvorhaben entlastet beziehungsweise das gedeihliche Arbeitsumfeld mitgestaltet.

Hirschaid, November 1993

Robert Schmidt-Hebbel





## **Inhalt**

Vorwort	3
Inhalt	5
Formelzeichen und Abkürzungen	8
1 Einleitung	13
2 Kenntnisstand zum Laserstrahlbohren	16
2.1 Laserstrahlquellen und ihre Eignung für Bohranwendungen	17
2.2 Technologie des Laserstrahlbohrens mit Nd:YAG-Lasern	21
2.2.1 Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie	22
2.2.2 Verfahrensvarianten	23
2.2.3 Laserstrahlerzeugung, -modulation und -formung; Laserstrahlparameter für die Laserstrahlbearbeitung	26
2.2.4 Optiksenschutz	29
2.2.5 Beeinflussung beziehungsweise Unterstützung des Laserstrahlbohrprozesses	31
2.2.6 Relativbewegung zwischen Laserstrahlfokus und Werkstück	34
2.2.7 In-process-Beurteilung beziehungsweise -Steuerung der Lochgeometrie	37
2.2.8 Fazit	39
3 Zielsetzung der Arbeit	40
4 Konzept und Ausführung einer Laserstrahlbohrereinrichtung mit Durchflußregelung	42
4.1 Gesamtaufbau zur Durchflußmessung und Regelung des Bohrprozesses	42
4.2 Werkstückspannvorrichtung mit integrierter Prozeßgaskammer	43
4.3 Durchflußmeßgerät	45
4.4 Regelkreis	47
4.5 Regelstrategien	49

4.5.1	Geregelter Bohrvorgang über eine Variation der Laserstrahl- pulsenergie	49
4.5.2	Geregelter Bohrvorgang über eine Variation der relativen Lage des Laserstrahlfokus zum Werkstück	50
4.5.2.1	Regelstrategie "Spiralbahn"	50
4.5.2.2	Regelstrategie "Fokuslagenverschiebung"	51
5	Eingesetzte Laseranlage und deren Betriebsverhalten	54
5.1	Laserstrahlquelle	54
5.1.1	Aufbau und Betriebsweise	55
5.1.2	Betriebsverhalten	56
5.2	Laserstrahlquelle mit Modenblende	66
5.3	Standardmäßige Strahlführung und -formung	73
5.4	Optikschutz	75
6	Untersuchungen zum durchflußgeregelten Laserstrahlbohren	77
6.1	Eingrenzung der Untersuchungen	77
6.2	Anordnung der Prozeßgaskammer	80
6.2.1	Prozeßgaskammer auf der Laserstrahleintrittsseite	81
6.2.2	Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite	81
6.3	Durchflußstreuung von Einzellöchern und Mehrlochbohrbildern ohne Regelung des Laserstrahlbohrvorgangs	83
6.3.1	Durchflußstreuung einzelner Löcher	85
6.3.2	Durchflußstreuung von zu Lochbildern zusammengefaßten Einzellöchern	86
6.4	Reduzierung der Durchflußstreuung durch Regelung des Laserstrahl- bohrvorgangs mit in-process-Durchflußmessung	87
6.4.1	Regelstrategie "adaptive Fokuslagenverschiebung"	87
6.4.1.1	Bearbeitungsbeispiel 1: 0,2 mm dickes Blech, Mehr- lochbohrbild	87
6.4.1.2	Bearbeitungsbeispiel 2: 0,5 mm dickes Blech, Simula- tion eines Mehrlochbohrbildes	95
6.4.1.3	Bearbeitungsbeispiel 3: 1,0 mm dickes Blech, zweistufi- ge Einzellöcher	99
6.4.2	Regelstrategie "konstante Fokuslagenverschiebung"	110
6.4.3	Regelstrategie "Spiralbahn"	112

---

7	Ergänzende Hinweise für die industrielle Anwendung des durchflußgeregelten Laserstrahlbohrverfahrens	118
8	Zusammenfassung	122
	Literatur	125
	Anhang	135
A.1	Rechnersteuerung der Laseranlage	135
A.2	Laserstrahldiagnostik	136
A.2.1	Laserstrahldiagnosesystem	137
A.2.2	Photodiode mit Auswertegeräten	138
A.2.3	Weitere Laserstrahlenergiemeßgeräte und -hilfsmittel	138
A.2.4	Pumpleistungsmeßgerät	140
A.3	Versuchsauswertemethoden	140
A.3.1	Herstellung von Schlifflinien	140
A.3.2	Kriterien für die qualitative Bewertung laserstrahlgebohrter Löcher	142
A.3.3	Bestimmung der Laserstrahl-Fokuslage	143
A.3.4	Bestimmung der Fokussierzahl des Laserstrahlengangs	145

## Formelzeichen und Abkürzungen

Im folgenden sind die in dieser Arbeit mehrfach vorkommenden Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen wiedergegeben. Die Formelzeichen sind in Anlehnung an die derzeit in der Fachwelt diskutierten Vorschläge [1], Vornormen [2] beziehungsweise Normentwürfe [3, 4] benannt und definiert. Dort, wo diese Normungsansätze entweder die Belange gepulster Laserstrahlung nicht ausreichend berücksichtigen oder die gebotene Sinnfälligkeit vermissen lassen, wird ersatzweise eine geeignetere Schreibweise definiert. Im Falle nichttrivialer Zusammenhänge sind Berechnungsformeln, wo erforderlich auch Vereinbarungen mit angegeben. Bild 1 illustriert die mit dem zeitlichen Verlauf der Laserstrahlleistung zusammenhängenden Größen.

Größe	Bedeutung	übliche Einheit
a	Aufweitungsfaktor der Laserstrahlformung	1
a	Abstand zwischen benachbarten Spirallinien	mm
b	Bogenlänge zwischen benachbarten "Spiralpunkten"	mm
c	Konstante	versch.

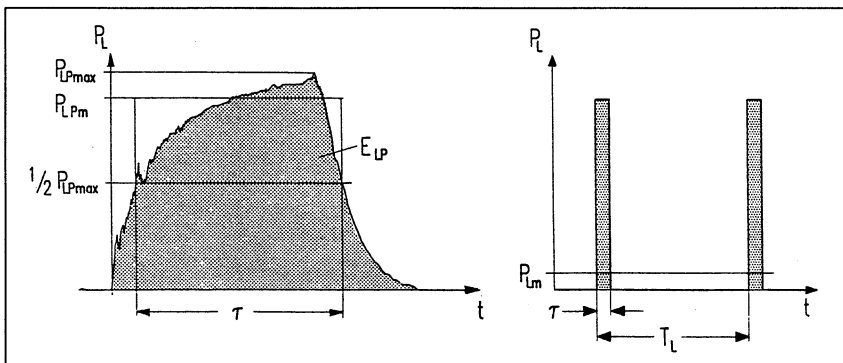


Bild 1: Kenngrößen zum zeitlichen Verlauf der Laserstrahlleistung

c	spezifische Wärme	J/(kg K)
d	Lochdurchmesser	mm
$d_{Ap}$	Modenblendendurchmesser	mm
$d_i$	Lochdurchmesser auf der Laserstrahleintrittsseite	mm
$d_L$	Laserstrahldurchmesser (an der Laserstrahltaile, wenn nicht anders vermerkt)	mm
$d_{L90}$	Laserstrahldurchmesser, durch welchen 90 % der Laserstrahlleistung tritt	mm
$d_o$	Lochdurchmesser auf der Laserstrahlaustrittsseite	mm
$E_{LP}$	Laserstrahlpulsenergie $E_{LP} = \int_{LP} P_L dt = P_{LPm} \tau = P_{Lm} / f$	J
$f_{lens}$	Brennweite einer (Fokussier-) Optikeinheit	mm
f	Laserstrahl-Pulsfrequenz	Hz
F	Fokussierzahl $F = f_{lens} / d_L$ , mit $d_L$ am Ort der Fokussierlinse	1
$I_{LP}$	Laserstrahl-Pulsleistungsdichte (intensity) $I_{LP} = P_{LPm} / (\frac{1}{4} \pi d^2)$ (gemittelt über Pulsdauer $\tau$ und Lochquerschnittsfläche)	MW/mm <sup>2</sup>
m	Modenordnung eines Laserstrahls	1
n	Anzahl Bearbeitungsschritte	1
N	Anzahl Laserstrahlpulse	1
N	Stichprobengröße	1
p	Druck (in der Prozeßgaskammer) Angewandene Gasdrücke sind grundsätzlich Überdrücke (über dem atmosphärischen Druck)	MPa
$P_L$	Momentane Laserstrahlleistung	W
$P_{Lm}$	Mittlere Laserstrahlleistung	W
$P_{LPm}$	Mittlere Laserstrahlpulseleistung	W

$P_{LPmax}$	Maximale Laserstrahlpulsleistung, Pulsspitzenleistung	W
$P_{Pm}$	Mittlere Pumpleistung des Lasers	kW
q	Durchfluß	versch.
q	Durchflußäquivalent (Signal des Durchflußsensors)	mV
$q_m$	Massendurchfluß [5]	kg/min
$q_n$	Volumendurchfluß bezogen auf den Normzustand [5]	cm <sup>3</sup> /min
$q_v$	Volumendurchfluß [5]	cm <sup>3</sup> /min
$q^*$	Laserstrahlparameterprodukt $q^* = \frac{1}{4} \Theta d_L$	mrاد mm
R	Streubreite (range) (einer Meßreihe)	versch.
s	Standardabweichung (einer Meßreihe)	versch.
s	Blechdicke	mm
$t'$	Konizität (taper) $t' = (d_i - d_o) / (2 s)$ in Anlehnung an Konizität einer laserstrahlgeschnittenen Fuge [1]	%
$t_A$	Eingestellte Pulsdauer des Laserverstärkers	ms
$t_d$	(Relative) Verzögerungszeit zwischen Laseroszillator und -verstärker	ms
T	Laserstrahl-Pulsperiode $T = 1 / f$	ms
$t_O$	Eingestellte Pulsdauer des Laseroszillators	ms
$U_A$	Ladespannung des Laserverstärkers	V
$U_O$	Ladespannung des Laseroszillators	V
Ü	Überlappgrad von Laserstrahlpuls zu -puls entlang der Bearbeitungsbahn	%
V	Volumen	m <sup>3</sup>
$x_M, y_M$	zu $z_M$ rechtwinklige Maschinenkoordinaten	mm

$z_F$	Laserstrahl-Fokuslage bezüglich Werkstückoberfläche	mm
$z_M$	Maschinenkoordinate in Laserstrahlrichtung Position der Fokussieroptik beziehungsweise der Werkstückaufnahme	mm
$\alpha, \beta$	Kipp- beziehungsweise Drehwinkel der Laserstrahlbohrvorrichtung	°
$\lambda$	Wellenlänge der Laserstrahlung	nm
$\Theta$	Laserstrahldivergenz (voller Winkel)	mrاد
$\rho$	spezifisches Gewicht	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Pulsdauer: Halbwertsbreite eines Laserstrahlpulses, das heißt Zeitintervall in dem gilt: $P_L \geq \frac{1}{2} P_{Lmax}$	µs
$v$	Variationskoeffizient (einer Meßreihe) [6] $v = s /  \bar{x} $ , mit $\bar{x} \neq 0$	%

Index	Bedeutung
-------	-----------

O	(Laserstrahl-) "Rohstrahl"
A	Laserverstärker (amplifier)
Ap	Modenblende (aperture)
d	Verzögerung (delay)
D	Photodiode
F	(Laserstrahl-) Fokus
i	Laserstrahleintritt (in Werkstück, incidence)
i	beliebiger Abschnitt eines Laserstrahlengangs
L	Laserstrahl
lens	Fokussierlinse (lens), Fokussiereinheit
m	mittlerer Wert
max	höchster Wert [5]
min	niedrigster Wert [5]
o	Laserstrahlaustritt (aus Werkstück, outlet)
O	Laseroszillator (oscillator)
q	Durchfluß
t	gesamt (total)

**Abkürzung Bedeutung**

---

A	Laserverstärker (amplifier)
...äquiv.	...äquivalent
Ap	Modenblende (aperture)
Atm.	Atmosphäre, Umgebung
CP	Dauerpulsbetrieb (des Lasers, continuous pulse)
LS	Laserstrahl (laser beam)
O	Laseroszillator (oscillator)
Oszill.	Laseroszillator
SP	Einzelpulsbetrieb (des Lasers, single pulse)
Verst.	Laserverstärker



## 1 Einleitung

Bereits Ende der sechziger Jahre wurden dem Laserstrahlbohren erste Anwendungen im industriellen Maßstab erschlossen. Schon damals wurden Gummitteile, wie Dichtungen, Isolatoren oder Baby-Sauger, mit Löchern ab einem Durchmesser von 0,01 mm versehen [7]. Die rasanteste Entwicklung des Laserstrahlbohrens vollzog sich etwa zeitgleich bei der Herstellung von Uhrenlagersteinen aus Rubin, wo die einschlägige Industrie in der Schweiz mit eine Vorreiterrolle spielte [8, 9], sowie von Diamantziehsteinen für die Drahtindustrie [9, 10, 11].

Es wurde damit einer der wesentlichen Vorteile des Laserstrahls als Bearbeitungswerkzeug erkannt und in die Praxis umgesetzt: Er eignet sich besonders zur Bearbeitung von harten, zähen beziehungsweise spröden Werkstoffen. Weitere Anwendungen, bei denen dieser Vorteil genutzt wird, finden sich beispielsweise beim Bohren von Düsen für das Wasserstrahlschneiden mit Lochdurchmessern von 0,12 bis 0,4 mm in Saphir [12] oder beim Bohren beziehungsweise Schneiden oder Ritzen von Keramiksubstraten in der Elektronikindustrie [13-15].

Ein weiteres Einsatzfeld ergab sich an Teilen, an denen kleine und/oder besonders tiefe Löcher gefordert waren. Laserstrahlgebohrte Löcher mit Durchmessern unter 0,2 mm finden sich zum Beispiel an Kunststoffkappen von Spray-Dosen, an Mikrodüsen (wenige  $\mu\text{m}$  Lochdurchmesser) aus Molybdän oder Titan für Arzneimittelinjektionen [16] und an Nadeln für chirurgische Zwecke [7]. Selbst bei geringen Teilstückzahlen ist das laserstrahlbasierte Fertigungsverfahren interessant: Es wird beispielsweise an der Hohlzylinder eines Laserstrahlleistungsmeßgeräts oder an Quarzglasplättchen für ein astronomisches Teleskop (Durchmesser 5  $\mu\text{m}$ , Dicke 0,2 mm) [16] eingesetzt. Löcher mit einem großen Schachtverhältnis (Tiefe/Durchmesser) sind beispielsweise charakteristisch für Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken [17, 18]. Bei einer solchen Applikation kommt erschwerend hinzu, daß die verwendeten Nickelbasislegierungen als schlecht bearbeitbar gelten und die Bohrungen sehr häufig unter extremen Neigungswinkeln zur Werkstückoberfläche stehen.

An letztgenanntem Anwendungsfall läßt sich ein weiterer Vorteil einer Laserstrahlbearbeitung erkennen: Für ein komplettes Triebwerk müssen Tausende von Löchern hergestellt werden, was besonders vorteilhaft mit dem sehr schnellen und trägheits-

arm zu bewegendem Werkzeug Laserstrahl geschehen kann. Die Möglichkeit, sehr viele Löcher innerhalb kurzer Zeit herzustellen, wird auch beim Lochen von Polyäthylen-Schläuchen zur Bewässerung in der Landwirtschaft [19] genutzt.

Die kurzen Bearbeitungszeiten deuten auf das gewichtigste Argument für das Laserstrahlbohren hin: die Wirtschaftlichkeit. Sehr häufig lassen sich die benötigten Bohrungen mit keinem konkurrierenden Fertigungsverfahren kostengünstiger als mit dem Laserstrahl herstellen. Ein Beispiel aus der dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuchspraxis möge dies dokumentieren: Bei geeigneter Wahl der Betriebsparameter des Laseraggregats sowie der sonstigen Prozeßparameter ist es möglich, in nahezu beliebigen Werkstoff ein Loch mit einem Durchmesser von etwa 0,2 mm und einer Tiefe von über 1,0 mm in deutlich unter 1 ms zu bohren. Prozeßzeiten dieser Größenordnung sind weder beim mechanischen Bohren (Spiralbohrer, Spitzbohrer, Flachbohrer) [20-27] noch beim funkenerosiven [17, 22, 28-34] oder elektrochemischen [17, 20, 24, 35-37] Bohren erreichbar. Nur das Elektronenstrahlbohren [38, 39] ist unter dem Aspekt der Prozeßzeiten mit dem Laserstrahlbohren konkurrenzfähig, verliert jedoch bei einem Vergleich der Fertigungsnebenzeiten, da die Elektronenstrahlbearbeitung das zeitaufwendige Evakuieren der Arbeitskammer erforderlich macht.

Andererseits sprechen in vielen Anwendungsfällen Qualitätskriterien gegen das Laserstrahlbohren, da die geometrische Reproduzierbarkeit der gefertigten Löcher im Vergleich zu konkurrierenden Bearbeitungsverfahren schlecht ist. Dies liegt im wesentlichen darin begründet, daß es sich beim Laserstrahlbohren um einen Wechselwirkungsprozeß handelt, der in seinen verschiedenen Phasen Schwankungen stochastischer Natur unterliegt: Jeder Teilprozeß, beginnend bei der Laserstrahl-einkoppelung in den Werkstoff über die dann im Werkstoff auftretende Wärmeleitung und die Phasenübergänge vom festen Material hin zur Werkstoffschmelze beziehungsweise zum -dampf sowie schließlich dem eigentlichen Austriebsmechanismus für das Material aus der Bearbeitungszone, trägt mit der ihm eigenen Schwankungsbreite zu einer beträchtlichen Gesamtstreuung der Bearbeitungsergebnisse bei.

So kommt es, daß der Laserstrahl wegen der mangelhaften Qualität der erzeugten Löcher in einigen Fällen lediglich zum Vorbohren eingesetzt wird. Als Beispiel seien hier Präzisionsmikroaperturen mit Durchmessern von 0,5 bis 1000  $\mu\text{m}$  in 12,5  $\mu\text{m}$  dickem Edelstahl aufgeführt, bei deren Herstellung das Laserstrahlbohren als vorbereitender Arbeitsgang für eine abschließende mechanische Bearbeitung eingesetzt wird [40].

Aber auch unzählige weitere Anwendungsfälle mit kleinen, teils hochpräzisen Bohrungen, bei denen das Laserstrahlbohren mangels Bearbeitungsqualität heute - noch - nicht eingesetzt werden kann, zeugen davon, daß eine Verfahrensweiterentwicklung hinsichtlich der erreichbaren Lochqualität von großem technischen und wirtschaftlichen Interesse ist. So werden zum Beispiel für die Elektronenmikroskopie sogenannte Trägernetzchen mit Hunderten von Löchern im Durchmesserbereich ab  $35\ \mu\text{m}$  sowie Blenden mit Einzellöchern ab unter  $10\ \mu\text{m}$  benötigt [41, 42]. Die Materialien dieser Teile variieren zwischen Platin mit Iridium-Beimengungen, Molybdän, Tantal, Titan, Kupfer oder Gold. Die Werkstückdicken liegen in der Größenordnung von  $0,2\ \text{mm}$ , in Extremfällen aber bei nur  $0,5\ \mu\text{m}$ , und die Durchmessertoleranzen belaufen sich auf typischerweise  $\pm 1\ \%$  des Lochdurchmessers, im Falle kleinster Durchmesser jedoch  $\pm 1\ \mu\text{m}$ .

Einen weitverbreiteten Spezialfall stellen Bohrungen dar, die eine mengenzumessende, durchflußbestimmende Funktion haben. Sie finden Anwendung in Düsen aller Art, wie sie beispielsweise in der Kraftstoffeinspritztechnik für Automobile [43], beim Spinnen von Textilfasern [29], in der Klima-, Umwelt- und Verfahrenstechnik, bei Oberflächenbehandlungen, im Maschinen- und Bergbau, in Stahlwerken, bei chemischen Verfahren und im Pflanzenschutz [44, 45] eingesetzt werden. Für solch hochpräzise Applikationen kann das Werkzeug Laserstrahl ebenfalls bislang nicht eingesetzt werden, da es an der gewünschten Reproduzierbarkeit der Lochgeometrie mangelt. Die Durchmessertoleranzen laserstrahlgebohrter Löcher, die mit bestenfalls  $5\ \%$  des Durchmessernennwertes [46] angegeben werden, reichen bei weitem nicht aus, zumal der Lochdurchmesser in erster Näherung quadratisch in den Durchfluß eingeht. Neben den Durchmesserschwankungen bestimmen aber noch viele weitere makro- und mikroskopische Formabweichungen des Loches den resultierenden Durchfluß, so daß dieser mit großen Streubreiten behaftet ist.

Vor dem geschilderten Hintergrund wird im nachfolgenden Kapitel zunächst der derzeitige Stand der Technik zur Herstellung kleiner Löcher mittels Laserstrahlung aufgezeigt. Darauf basierend wird eine Zielsetzung für die vorliegende Arbeit formuliert, die eine nennenswerte Einengung der Durchfluß- und damit auch Durchmesserstreuung bei ansonsten zufriedenstellender Qualität der gefertigten Löcher anvisiert. Leitsatz für diese Arbeit soll letztlich sein, dem Laserstrahlbohren mit seiner sich aus den kurzen Bearbeitungszeiten ergebenden Wirtschaftlichkeit ein noch breiteres Einsatzfeld zu erschließen.

## 2 Kenntnisstand zum Laserstrahlbohren

Im Vorgriff auf die in Kapitel 3 formulierte Zielsetzung für diese Arbeit sowie die in Abschnitt 6.1 vorgenommene thematische Eingrenzung für die Untersuchungen wird das Augenmerk schon hier auf laserstrahlbasierte Fertigungsverfahren gerichtet, mit denen Löcher mit Durchmessern unter 0,5 mm in möglichst guter geometrischer Reproduzierbarkeit hergestellt werden können. Als zu bearbeitende Werkstoffe werden Metalle und im besonderen Stähle betrachtet.

Das Laserstrahlbohren ist gekennzeichnet durch folgende, teilweise bestechende Vorteile [47-49]:

- hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit im Vergleich zu alternativen Fertigungsverfahren,
- kein physischer Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück,
- kein Werkzeugverschleiß im konventionellen Sinn,
- empfindliche, dünnwandige Werkstücke bearbeitbar,
- gratarmes, unter Umständen nachbearbeitungsfreies Bohren möglich,
- auch härteste und spröde Werkstoffe bearbeitbar,
- sehr genaue Positionierung der Löcher möglich,
- sehr kleine Durchmesser ( $\mu\text{m}$ -Bereich) realisierbar,
- Schachtverhältnisse in Extremfällen bis 100 möglich,
- Löcher unter sehr flachen Winkeln zur Werkstückoberfläche möglich,
- Löcher an schwer erreichbaren Stellen möglich,
- an Verbundwerkstoffen durch selektiven Abtrag sehr genaue Einhaltung der Lochtiefe möglich,
- einfacher, relativ kompakter Aufbau von Werkstück- und Werkzeugaufnahme (Laserstrahlführung und -formung).

Die folgenden Abschnitte befassen sich zunächst mit den Eigenschaften der marktüblichen Laserstrahlquellen sowie deren Eignung für Bohraufgaben. Des Weiteren wird auf die Technologie des Laserstrahlbohrens eingegangen, wie sie aus der umfangreichen Literatur hervorgeht.

## 2.1 Laserstrahlquellen und ihre Eignung für Bohranwendungen

Von den am Markt für Materialbearbeitungszwecke erhältlichen Laseraggregaten sind sowohl Excimer- als auch Festkörper- sowie Gas- beziehungsweise Dampfaser zum Laserstrahlbohren geeignet. Diese Lasertypen lassen sich jeweils unterteilen: Bei den Excimer-Lasern kommen entsprechend der Gaszusammensetzung verschiedene Laserstrahlungswellenlängen zum Einsatz. Unter den Festkörperlasern gibt es für die Materialbearbeitung neben den heute eher exotischen Alexandrit-, Erbium- oder Rubin-Lasern die große Gruppe der Neodym-Laser. Letztere unterscheiden sich nach dem Trägermaterial für die Neodym-Atome in Glas- beziehungsweise YAG-Laser sowie nach der Art ihrer Anregung in gepulst oder kontinuierlich betriebene Systeme, wobei letztgenannte häufig auch gütegeschaltet werden. Aus der Gruppe der Gas- beziehungsweise Dampfaser seien hier CO<sub>2</sub>-, CO- und Kupferdampfaser erwähnt.

Der Excimer-Laser bietet durch seine kurzen Wellenlängen von  $\lambda = 157, 193, 248, 308$  und  $351$  nm dort große Vorteile, wo es um die Materialbearbeitung an organischen Stoffen geht. Der Materialabtragsprozeß basiert auf der Ablation des Werkstoffs, wodurch ein nur sehr geringer Anteil der Laserstrahlenergie in Form von Wärme in den Grundwerkstoff eingebracht wird. Dies hat in ihrer Größe vernachlässigbare Wärmeeinflußzonen zur Folge. Das Bearbeiten von Polyimid (Kapton) ist am vorteilhaftesten durch Laserstrahlung mit  $\lambda = 248$  oder  $308$  nm realisierbar [50]. Polytetrafluoräthylen läßt sich hingegen besonders gut mit  $\lambda = 157$  nm abtragen, da dieser Kunststoff oberhalb circa  $180$  nm schlecht absorbiert [51]. Eine interessante Anwendung ergibt sich bei mehrschichtigen Leiterplatten, bei denen selektiv die Kunststoffschichten, nicht aber die elektrisch leitenden Schichten aus Kupfer abgetragen werden müssen [52]. Aber auch Kollagene, die in medizinischen Applikationen eingesetzt werden und weder mit dem Spiralbohrer (wegen der verfahrensbedingten thermischen Belastung) noch mit dem Wasserstrahl (wegen des Werkstoffschwellens) bearbeitet werden können, sind mit Excimer-Laserstrahlung mit  $\lambda = 193$  nm gut abzutragen [53].

Keramiken stellen einen weiteren Einsatzbereich dar, bei dem der Excimer-Laser erfolgreich ist. Per Maskenprojektion können Löcher mit einem Durchmesser von zum Beispiel  $150 \mu\text{m}$  eingebracht werden. Bei Steigerung der Abbildungsqualität sind Strukturen in der Größenordnung von  $10 \mu\text{m}$  herstellbar [54].

Auch transparente Materialien lassen sich mit dem Excimer-Laser gut bearbeiten.

Exemplarisch wird mit einem Excimer-Laser mit  $\lambda = 193 \text{ nm}$  Saphir in einer Dicke von  $0,5 \text{ mm}$  gebohrt. Die Löcher weisen einen Durchmesser von circa  $40 \text{ }\mu\text{m}$  auf. Zum Vergleich kommt auch ein Nd:YAG-Laser zum Einsatz, wobei zwecks Begünstigung des Einkoppelverhaltens eine Schwärzung des Werkstoffs erforderlich ist und sich Lochdurchmesser von etwa  $100 \text{ }\mu\text{m}$  ergeben. Das Erscheinungsbild der Löcher ist in letztgenanntem Fall von Rissen in der vergleichsweise dicken Schmelzschicht geprägt. Nur der Zeitfaktor spricht für den Nd:YAG-Laser, da er die Bearbeitung um etwa den Faktor 100 schneller absolviert [55].

Metalle, insbesondere Silber, Gold und Kupfer, absorbieren im ultravioletten Spektralbereich deutlich besser als im infraroten. Der Excimer-Laserstrahl wird in dünnen Oberflächenschichten von etwa  $0,5$  bis  $1 \text{ }\mu\text{m}$  mit vernachlässigbaren Reflexionsverlusten absorbiert, wobei ein Schmelzbad von circa  $1 \text{ }\mu\text{m}$  Tiefe entsteht [56]. Bei der Herstellung von Löchern mit Durchmessern ab  $10 \text{ }\mu\text{m}$  wird eine kreisförmige Apertur von der Laserstrahlung ausgeleuchtet und verkleinert auf das Werkstück abgebildet. Mit den Energiedichten heute erhältlicher Excimer-Laser können viele Löcher gleichzeitig gebohrt werden, was die Verwendung einer Mehrlochprojektionsmaske voraussetzt.

Der Excimer-Laser kann aus laserphysikalischen Gründen nur gepulst, und zwar mit extrem kurzen Pulsen von in der Größenordnung  $20 \text{ ns}$  Dauer betrieben werden. Die hohen Laserstrahlpulseleistungen, die sich daraus ergeben, bedeuten prinzipiell, daß der Verdampfungsanteil im Vergleich zu Bearbeitungen mit anderen Laserstrahlquellen deutlich höher ist. Dadurch wird der Austritt des Werkstoffs aus der Bearbeitungszone verbessert und, im Umkehrschluß, die Tendenz zur Ablagerung schmelzflüssiger und dann wieder erstarrter Partikel in der Bearbeitungszone minimiert.

Generell gilt aber für den Excimer-Laser, daß er wegen der Abtragsraten in einer maximalen Größenordnung von  $1 \text{ }\mu\text{m}/\text{Puls}$  nur langsame Bearbeitungsgeschwindigkeiten erlaubt. Dieser Nachteil kommt besonders dort zum Tragen, wo die sich aus der kurzen Wellenlänge ergebenden technologischen Vorteile des Excimer-Lasers ihre Gültigkeit verlieren. Dies gilt zum Beispiel für die große und in der modernen technisierten Welt sehr bedeutsame Werkstoffgruppe der Metalle. Neben den langen Bearbeitungsdauern beeinträchtigen aber auch die hohen Investitionskosten [56] die Wirtschaftlichkeit eines Excimer-Lasers.

Große Ähnlichkeit zum Excimer-Laser hinsichtlich der mittleren Laserstrahlleistungen

und der -pulsdauern weist der Kupferdampfaser auf, von dem einige Prototypen derzeit in Forschungslabors auf ihre Tauglichkeit für industrielle Bohranwendungen untersucht und optimiert werden [57, 58]. Die gegenüber Excimer-Lasern deutlich geringere Pulsenergie wird durch die hohe Pulsfrequenz wettgemacht. Die beiden möglichen Wellenlängen von 510 nm und 578 nm lassen a priori gute Bearbeitungseigenschaften für Metalle erwarten.

Der CO<sub>2</sub>-Laser ist gegenüber dem Festkörperlaser für Bohranwendungen in der Regel im Nachteil, wie beispielsweise Versuche an Keramik zeigen [59]. Obwohl gepulst betrieben, sind die Pulsleistungen eines CO<sub>2</sub>-Lasers nicht ausreichend, um die sich aus der längeren Wellenlänge ergebenden Nachteile der schlechteren Fokussierbarkeit und der bei den meisten Materialien schlechteren Absorption zu kompensieren. Dies hat zur Folge, daß der Schmelzeanteil beim Bearbeitungsprozeß größer und somit auch die wiedererstarrte Schicht dicker ist als bei einer vergleichbaren Bearbeitung mit dem Festkörperlaser.

Glas hingegen, das gegenüber den typischen Laserstrahlwellenlängen von Festkörperlasern nahezu transparent ist, läßt sich gut mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung bearbeiten [60]. Bei geeigneter Wahl der Laserstrahlpulsparameter, der Fokusslage und angepaßter Führung des Prozeßgases läßt sich die Ribbildung im gegenüber thermischen Spannungen sehr anfälligen Werkstoff minimieren. Auch Kunststoffe absorbieren die Wellenlänge von CO<sub>2</sub>-Lasern sehr gut, so daß damit zum Beispiel Düsen an Spray-Dosen mit Löchern ab einem Durchmesser von 0,1 mm versehen werden [61].

Mit kontinuierlich strahlenden CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen lassen sich nur in Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit Löcher brauchbarer Qualität erzeugen [62], da die relativ geringe mittlere Laserstrahlleistung sonst die erforderliche Erwärmung nicht bewerkstelligen kann.

Die Übersicht in Bild 2 zeigt, warum sich für das Laserstrahlbohren der Nd:YAG-Laser in gepulster Betriebsweise besonders eignet. Das Zahlenbeispiel bezieht sich auf den in Kapitel 5 vorgestellten gepulsten Nd:YAG-Laser. Einerseits können bei relativ geringen mittleren Laserstrahlleistungen ohne weiteres um einen Faktor 100 bis 1000 höhere Laserstrahlpulsleistungen erzielt werden. Hohe Pulsleistungen begünstigen die Einkopplung der Laserstrahlung in den zu bearbeitenden Werkstoff sowie den Mechanismus des Materialabtrags. Der Nd:YAG-Laser bietet damit deutlich höhere Abtragsraten als der Excimer-Laser. Andererseits ergeben sich aus der Wellenlänge

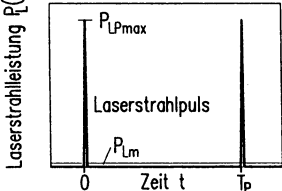
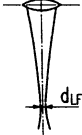
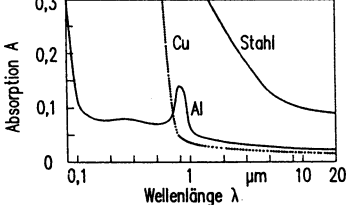
<p>hohe Laserstrahlleistung</p>		<p> <math>f_{LP} = 90 \text{ Hz}</math>  <math>T_{LP} = 11 \text{ ms}</math>  <math>\tau = 75 \text{ }\mu\text{s}</math>  <math>E_{LP} = 0,14 \text{ J}</math>  <math>P_{Lm} = 13 \text{ W}</math>  <math>P_{LPm} = 1,9 \text{ kW}</math> </p>
<p>günstige Wellenlänge</p>		
<p>relativ gute Fokussierbarkeit</p>		<p> <math>d_{LF} \approx 50 \text{ }\mu\text{m}</math>  <math>I_{LPm} \approx 1 \cdot 10^6 \text{ W/mm}^2</math> </p>
<p>relativ gute Energieeinkopplung</p>		

Bild 2: Vorteile des Nd:YAG-Lasers ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) beim Bohren

von 1064 nm gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Laser Vorteile: Die Nd:YAG-Laserstrahlung ist prinzipiell auf einen kleineren Brennfleckdurchmesser fokussierbar, was wiederum zu hohen Strahlungsdichten in der Bearbeitungszone führt, und der Absorptionskoeffizient der meisten Werkstoffe ist für diese Wellenlänge höher. Außerdem sprechen für den Einsatz eines Nd:YAG-Lasers sein kompakter Aufbau sowie die Möglichkeit, die Laserstrahlführung mittels eines Lichtleitkabels flexibel zu gestalten.

Als Alternative zum gepulst betriebenen Nd:YAG-Laser kann auch ein solcher in gütegeschalteter Ausführung eingesetzt werden. Die extrem kurzen, dafür aber mit hoher Leistung versehenen Laserstrahlpulse vermögen es, jeweils ein kleines Werkstoffvolumen mit hohem Verdampfungsanteil abzutragen, was zu verhältnismäßig rückstandsfreien Werkstückoberflächen führt. Trotz des geringen Abtrags pro Laserstrahlpuls ergeben sich durch die im kHz-Bereich liegende Wiederholfrequenz befriedigende Abtragsraten. Jüngste Untersuchungen zum Fein- und Mikrobohren an Metall



und Keramik zeigen, daß sich für den gütegeschalteten Nd:YAG-Laser mit optimierter Strahlqualität interessante Einsatzperspektiven auf tun [63].

Die von der Pumpleistung abhängige thermische Linse [64, 65] führt bei den oben erwähnten Nd:YAG-Lasern mit zylinderförmigem Laserkristall zu nicht vernachlässigbaren Schwankungen bei Fokusslage und -durchmesser [66], was die Justage der Laseranlage für eine bestimmte Laserstrahlbearbeitung erschwert. Nd:YAG-Lasersysteme höherer Leistungen weisen, im wesentlichen ebenfalls wegen der thermischen Linse, keine gute Strahlqualität auf [65], wodurch die Fokussierbarkeit limitiert wird.

Bei den Neodym-Lasern wird derzeit intensiv an neuen, effizienteren Geometrien für den Festkörper geforscht; der Slab-Laser ist der erste Exponent für solch neue Geometrien auf dem Markt. Durch seine im Vergleich zu Stab-Lasern bessere Strahlqualität, das heißt geringeres Strahlparameterprodukt  $q^*$ , und deren Unempfindlichkeit gegenüber Pumpleistungsänderungen eröffnet er neue Möglichkeiten in der Fein- und Feinstbearbeitung, insbesondere wenn höhere Laserstrahlleistungen gefordert sind [65, 67, 68]. Der zur Zeit in einem frühen Entwicklungsstadium befindliche Rohr-Laser ist hingegen durch eine schlechte Strahlqualität gekennzeichnet, was ihn bislang nur für Wärmebehandlungsaufgaben interessant erscheinen läßt [65]. Mittelfristig wird auch der diodengepumpte Laser zu einer beachtenswerten Alternative avancieren, kennzeichnet ihn doch ein deutlich besserer Gesamtwirkungsgrad als der von lampen-angeregten Systemen [69, 70].

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß unter den verschiedenen Lasertypen der Excimer-Laser wegen der hohen Kosten und der geringen Abtragsraten ausscheidet, während der Kupferdampf laser noch nicht die nötige Entwicklungsreife aufweisen kann. Dem  $\text{CO}_2$ -Laser fehlt es hingegen an der notwendigen Feinfokussierbarkeit sowie der erforderlichen Laserstrahlpulsleistung. Demnach ist der Nd:YAG-Laser der geeignetste für die hier angestrebten Bohranwendungen.

## 2.2 Technologie des Laserstrahlbohrens mit Nd:YAG-Lasern

Für die Versuche zur vorliegenden Arbeit steht ein gepulster Nd:YAG-Laser zur Verfügung. Die folgenden Betrachtungen werden deswegen im wesentlichen auf diese Laser-Type beschränkt.

### 2.2.1 Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie

Nach Treusch [46, 71, 72] läßt sich die Entstehung eines laserstrahlgebohrten Loches in drei wichtige Phasen mit unterschiedlichen Wechselwirkungsmechanismen einteilen: die Startphase mit der anfänglichen Einkopplung der Laserstrahlung, eine Verdampfungsphase und schließlich die Phase eines laserstrahlinduzierten Plasmas. Für die Geometrie eines laserstrahlgebohrten Loches werden Abhängigkeiten von der Strahlintensität und deren Verteilung, von Strahlradius und -kaustik sowie von Pulsformung und -modulation dargestellt. Auch auf einige Störgrößen bei der Bearbeitung, wie zum Beispiel die thermische Linse im Laserstab oder die (meist unkontrollierte) Ablagerung der Werkstoffschmelze, wird eingegangen. Die physikalischen Grundlagen sind jedoch umstritten: Geht der letztgenannte Autor von einer Einkopplung der Laserstrahlung über das Plasma in das zu bearbeitende Material aus, so betont Dausinger [73] die Einkopplung über Vielfachreflexion im Dampfkanal eines entstehenden Loches.

Die Literatur zur physikalisch-mathematischen Modellierung des Laserstrahlbohrvorgangs hat inzwischen einen stattlichen Umfang erreicht. Die abzubildende Realität erweist sich jedoch als so komplex, daß die Abweichungen zwischen Rechenmodell und Experiment entweder generell beträchtlich sind oder nur für Spezialfälle auf erträgliche Maße reduziert werden können.

Für eine erfolgreiche Bohrbearbeitung an Metallen ist es gemäß [46, 74] angebracht, mit vergleichsweise hohen Laserstrahlintensitäten von

$$0,1 \text{ MW/mm}^2 \leq I_{LP} \leq 10 \text{ MW/mm}^2 \quad (1)$$

zu operieren. Bei anlagenbedingt begrenzter Laserstrahlpulsenergie lassen sich solche Strahlungsdichten nur bei Einsatz kurzer Laserstrahlpulsdauern  $\tau$  erreichen. Typische Pulsdauern für das Feinbohren und -schneiden betragen für gepulste Nd:YAG-Lasersysteme größenordnungsmäßig 100  $\mu\text{s}$  [75, 76]. Solche Laserstrahlpulse begünstigen zum einen die Einkopplung der Strahlung in den zu bearbeitenden Werkstoff, da die heftige Erwärmung desselben die Absorption schnell verbessert. Zum anderen wird aber auch der Materialabtragsmechanismus verstärkt, da es zu einem erhöhten Dampfanteil und einem entsprechend intensiven Dampfdruck kommt, der wiederum den Schmelzeaustrieb forciert. Umgekehrt wird die Abfuhr von Wärmeenergie in den umliegenden Grundwerkstoff gehemmt, weil Wärmetransporteffekte

verhältnismäßig träge ablaufen. Dies hat wiederum zur Folge, daß sich keine ausgeprägte Wärmeeinflußzone im verbleibenden Grundwerkstoff bilden kann. Im Versuch wird festgestellt, daß eine intensive Bestrahlung zu einer Reduzierung von Schmelzeablagerungen sowie zu einer geringeren seitlichen Ablenkung und Konizität der Löcher [77] beiträgt. In [49] wird gezeigt, daß für verschiedene Metalle der Schmelzeanteil im aus einem Loch ausgetriebenen Werkstoff mit der Laserstrahlpulsdauer  $\tau$  ansteigt und bei etwa  $\tau = 100 \mu\text{s}$  50 % ausmacht. Steffen [78] liefert eine Formelsammlung für die Einstellparameter eines Laseraggregats in Abhängigkeit von den Werkstoffkennwerten (insbesondere der thermischen Größen) der zu bearbeitenden Probe.

2.2.2 Verfahrensvarianten

Beim Laserstrahlbohren wird in drei Verfahrensvarianten unterschieden: Einzelpuls-, Perkussions- und Trepannierbohren [79-83]. Bohrverfahren und Lochdurchmesser

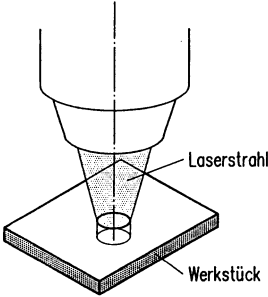
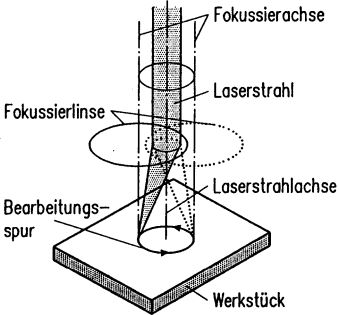
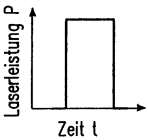
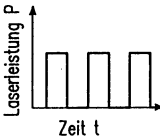

Verfahren	Einzelpulsbohren	Perkussionsbohren	Trepannierbohren
typ. Bohr $\phi$	20 $\mu\text{m}$ – 250 $\mu\text{m}$	0,1 mm – 0,5 mm	0,4 mm – 5 mm
Prinzip			
Pulsfolgen			

Bild 3: Gegenüberstellung der Laserstrahlbohrverfahren

können in etwa zugeordnet werden, Bild 3: das Einzelpulsbohren für Durchmesser bis 0,25 mm, das Perkussionsbohren von 0,1 bis circa 0,5 mm und das Trepannierbohren ab 0,4 mm.

Beim Einzelpulsbohren [77, 79] wird ein Loch mit einem einzigen Laserstrahlpuls gefertigt. Hierbei sind Lochtiefen bis etwa 1,5 mm bei Durchmessertoleranzen um  $\pm 10 \mu\text{m}$  und einer Rauheit von  $15 \mu\text{m}$  erreichbar. Das Schachtverhältnis beträgt typischerweise  $l/d \approx 1$ , kann aber bis  $l/d = 10$  reichen. Die sich ergebende Lochform ist konisch [84]. Bild 5 zeigt exemplarisch die schlechte Wiederholbarkeit, die typisch für Einzelpulsbearbeitungen in Blechdicken über 0,5 mm ist. Entsprechend der Pulsfrequenz der Laserstrahlquelle lassen sich bei geeigneter Laserstrahl- oder Werkstückhandhabung bis zu 200 Löcher/s herstellen. Im Falle kleiner Löcher, zum Beispiel ab  $20 \mu\text{m}$  Durchmesser, muß der Laserstrahl eine niedrige Modenordnung aufweisen.

Beim Perkussionsbohren [47, 79, 85], auch Mehrfachpuls- oder Multipulsbohren genannt, entsteht ein Loch durch mehrere Laserstrahlpulse, wobei die Laserstrahlachse ortsfest bleibt. Bei der für dieses Verfahren typischen Anwendung an Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken wird beispielsweise ein bis zu 8 mm tiefes Loch mit einem gepulsten Laserstrahl von 30 Hz Pulsfrequenz und 25 kW Pulsleistung gebohrt. Das Loch kann ein Schachtverhältnis von  $l/d \leq 15$  und eine Schräglage bis circa  $75^\circ$  zur Oberflächennormalen aufweisen. Wegen der Erosionswirkung der herausgeschleuderten Schmelze ergibt sich bei Werkstoffdicken über 0,25 mm eine Lochkonizität  $t'$  von circa 20 %. Die Durchmesserstreuungen liegen größenordnungsmäßig bei  $\pm 10 \%$  [86], wobei für kleine Löcher eher  $\pm 15 \%$ , für größere  $\pm 5 \%$  gelten. In einem industriellen Anwendungsbeispiel mit einem  $\text{CO}_2$ -Laser werden 1,2 mm starke Lagerschalen mit Schmiermittelbohrungen von 0,2 mm Durchmesser versehen; die Streubreite besagter Durchmesser beträgt 0,06 bis 0,1 mm [87]. Genauere Löcher lassen sich nur an dünnen (deutlich unter 0,1 mm) Werkstücken erzielen [9]. Die sich in Metallen einstellende Wärmeinflußzone weist maximal 50  $\mu\text{m}$  Dicke auf. Im Falle von Ziehsteinen, bei denen in ein 1,0 mm dickes Diamantwerkstück ein Durchgangsloch mit Durchmesser 0,1 mm einzubringen ist, wird letztere mit Laserstrahlpulsen von 1 J und 5 Hz in 2,0 min gebohrt [28]. Als Verfahrensvariante erweist sich bei diesen Ziehsteinen ein Drehen der Werkstücke in einem Zentrierfutter als vorteilhaft. Wahlweise kann auch die Fokuslage der Lochtiefe nachgeführt werden.

Während die Qualität perkussionsgebohrter Löcher Anlaß zu weiterer Forschungs-

tätigkeit gibt, steht die Wirtschaftlichkeit außer Diskussion: Ein beispielhafter Vergleich [82] von Fertigungsverfahren für Kühlbohrungen in Flugzeug-Turbinenschaufeln weist nach, daß die kurzen Bearbeitungszeiten für das Laserstrahlbohren sprechen.

Beim Trepannierbohren [79] wird ein Durchgangsloch mit einer kreisenden Relativbewegung zwischen Laserstrahlfokus und Werkstück "ausgeschnitten". Diese Relativbewegung wird typischerweise mittels einer exzentrisch zur Laserstrahlachse positionierten und um dieselbe rotierenden Fokussierlinse bewerkstelligt. Bei besonders flexiblen Trepannierköpfen kann die Exzentrizität der Linse durch einen CNC-gesteuerten Zusatzschlitten eingestellt werden [88]. Alternative zu einer exzentrisch angeordneten Fokussieroptik ist, das Werkstück mit einer hochdynamischen Positioniereinheit unter dem feststehenden Laserstrahl zu bewegen. In der Regel werden mehrere Umdrehungen der beschriebenen Relativbewegung benötigt, um die volle Werkstückdicke zu durchdringen. Die Bearbeitungszeit liegt beim Trepanning in der Größenordnung von 1 s pro Loch [17].

Als Variante des Trepannierbohrens ist das "Bohrschneiden" [79, 80] zu verstehen, bei dem das Material von jedem Laserstrahlpuls gänzlich durchtrennt wird. Wahlweise kann zunächst eine Mittelbohrung eingebracht werden, von der aus die nachfolgende Schneidbewegung beginnt. Die Lochdurchmesser liegen in der Regel bei über 2,5 mm. Die Spaltweiten dieser Feinschneidoperation betragen zwischen 50 und

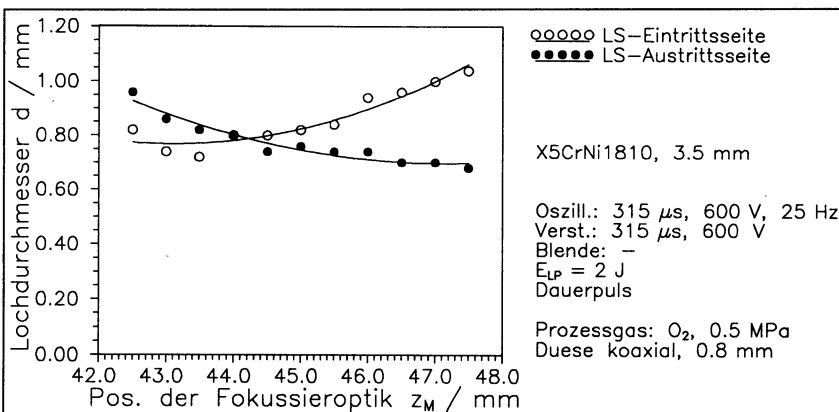


Bild 4: Lochdurchmesser auf der Laserstrahleintritts- und -austrittsseite in Abhängigkeit von der Position der Fokussieroptik beim "Bohrschneiden"

400  $\mu\text{m}$ . Bild 4 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Bohrschneidoperation an 3,5 mm dickem Edelstahlblech. Das Verhältnis der Lochdurchmesser auf Laserstrahleintritts- und -austrittsseite, das heißt die Lochkonizität  $t'$ , läßt sich wirkungsvoll durch die Laserstrahlfokuslage beeinflussen.

Vergleichsweise sei schließlich angemerkt, daß beim Laserstrahlschneiden mit geeigneten gepulsten Nd:YAG-Lasern Toleranzen der Schnittfugenbreite von  $\pm 5 \mu\text{m}$  erreicht werden und selbst bei Einsatz einer Lichtleitfaser zur Strahlführung noch Schnittfugenbreiten bis herab zu 0,1 mm möglich sind [89].

### 2.2.3 Laserstrahlerzeugung, -modulation und -formung; Laserstrahlparameter für die Laserstrahlbearbeitung

Sollen kleine Löcher mit dem Laserstrahl gefertigt oder aber eine filigrane Trepannierbearbeitung durchgeführt werden, so ist es erforderlich, einen Laserstrahl mit kleinem Fokusedurchmesser bei vergleichsweise langer Schärfentiefe verfügbar zu haben. In erster Näherung gilt, daß die Schnittspaltweite beim Laserstrahlschneiden – beziehungsweise in übertragenem Sinne der Lochdurchmesser beim Laserstrahlbohren – in etwa dem Fokusedurchmesser entspricht [74]:

$$d \approx d_{LF} \quad (2)$$

Die maßgebliche Kenngröße zur Charakterisierung der Qualität und damit auch der Fokussierbarkeit eines Laserstrahls ist das Strahlparameterprodukt

$$q^* = \frac{1}{4} \Theta_0 d_{L0} = \frac{1}{4} \Theta_i d_{Li} = \frac{1}{4} \Theta_F d_{LF} = \text{const} \quad (3),$$

$$q^* = (m + 1) \lambda / \pi, \quad m \geq 0, \quad m \in \mathbb{N} \quad (4).$$

Zur Erzielung eines möglichst kleinen Fokusedurchmessers  $d_{LF}$  ist es demnach erforderlich, entweder  $q^*$  bereits in der Strahlquelle zu minimieren ( $\Theta_0 d_{L0} = \text{min}$ ) und/oder den Fokussierwinkel  $\Theta_F$  zu maximieren. Ersteres kann bei gegebener Spiegelkonfiguration entweder mit einem einstellbaren Teleskop oder einer Modenblende im Laserresonator, letzteres durch Einsatz einer Strahlaufweitung vor der Fokussieroptik erfolgen.

Der Einsatz von Modenblenden ist ein bewährtes Mittel, um das Strahlparameterprodukt zu verkleinern. So wird von einem Einsatzfall berichtet, in dem ein gepulster Nd:YAG-Laser durch das Einfügen einer Modenblende in die Lage versetzt wird, in 0,5 mm dickem Edelstahlblech Schnitte mit einer Spaltweite von lediglich 50  $\mu\text{m}$  herzustellen [75]. Modenblenden weisen jedoch den Nachteil auf, daß sie, wie in Kapitel 5 demonstriert, mit kleiner werdendem Durchmesser zu einer Abnahme der Laserstrahlleistung führen. Außerdem können sie nur durch Austausch an die jeweiligen Bedürfnisse hinsichtlich Strahlqualität beziehungsweise -leistung angepaßt werden, was die Flexibilität und den Bedienungskomfort deutlich einschränkt. Besonders bedienerfreundlich ist eine Laserstrahlanlage, bei der 8 verschiedene, in einem Revolver untergebrachte Modenblenden CNC-gesteuert in den Laserresonator eingebracht werden können [88], um Strahlqualität und letztendlich Lochdurchmesser und -qualität zu beeinflussen.

Ein im Laserresonator plaziertes Teleskop dient der Kompensation der sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Laserpumpleistung einstellenden thermischen Linse im Laserkristall [13], so daß der Laserresonator immer unter den konstruktiv festgelegten, bestmöglichen Bedingungen betrieben wird. Dies hat eine nahezu gleichbleibende Strahlqualität zur Folge und vermeidet unnötige Verluste an Laserstrahlausgangsleistung. Im Sinne einer hohen Einsatzflexibilität kann das Teleskop bei einer Änderung der Laserbetriebsparameter automatisch beziehungsweise fernbedient mit Hilfe eingebauter Stellglieder angepaßt werden.

Der bereits aus dem Laserresonator ausgekoppelte Strahl kann ebenfalls durch eine Blende geschickt werden [49]. Bei geschickter Anordnung wird der Laserstrahlfokusdurchmesser damit von der Pumpleistung unabhängig gemacht, und die Leistungsverteilung über den verbleibenden Laserstrahlquerschnitt ist gleichmäßiger. Bei Verwendung entsprechender Blendenformen können auch Löcher mit nichtrundem Querschnitt hergestellt werden.

In gewissen Fällen erweist sich ein Eingriff in den zeitlichen Verlauf der Laserstrahlleistung, sei es in Form einer Modulation oder einer Pulsformung, als vorteilhaft für die bezweckte Materialbearbeitung. Verschiedene Modulationsvarianten werden zum Beispiel für den Einsatz beim Bohren von Uhrensteinen vorgeschlagen [8]. Anstelle der weitverbreiteten Pockelszelle, ein elektrooptischer, über die Polarisation des Laserstrahls wirkender Schalter, können unter der Voraussetzung relativ geringer mittlerer Laserstrahlleistungen ( $\leq 12 \text{ W}$ ) für die Mikromaterialbearbeitung auch passive

Güteschalter eingesetzt werden [90].

In einer speziellen Anwendung, nämlich beim Perkussionsbohren der Kühlluftbohrungen in Flugzeugturbinenschaufeln, wird nach der Detektion des Durchstechzeitpunkts noch eine "niederenergetische Impulsreihe von Reinigungsschüssen" auf die Bearbeitungsstelle gegeben [88].

An einem weiteren Beispiel aus der aeronautischen Industrie wird demonstriert, daß

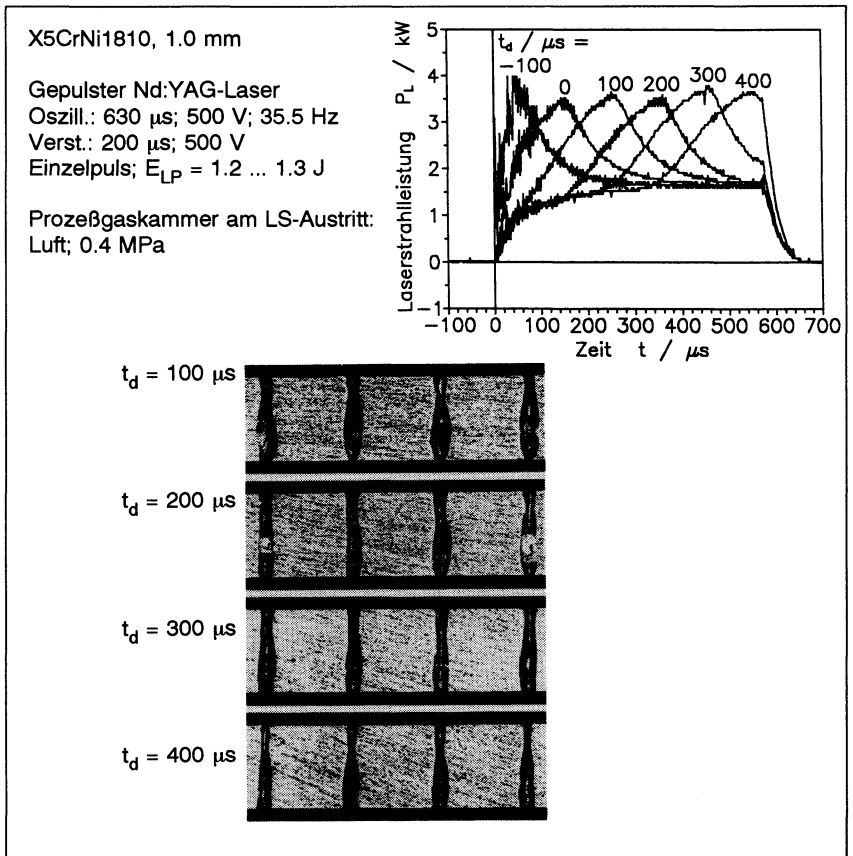


Bild 5: Bearbeitungsbeispiel mit zeitlicher Formung der Laserstrahlpulse



eine Laserstrahlpulsformung, bei der ein langer Laserstrahlpuls durch eine Sequenz schwächerer Pulse ersetzt wird, bis zu 25 % Einsparung in der Bearbeitungszeit bei verringerter Lochkonizität bringen kann [91]. Bild 5 zeigt Versuchsergebnisse, wie sie sich unter Einsatz der selbstentwickelten rechnergesteuerten Pulsformungsmöglichkeit am in Kapitel 5 vorgestellten Laser erzielen lassen. Es ist erkennbar, daß sich die Form eines Loches längs seiner Mittelachse mit den unterschiedlichen Laserstrahlpulsformen verändert. Die Photographien machen aber auch deutlich, daß die Wiederholbarkeit der Lochgeometrie, in diesem Fall beurteilt entlang der Lochachse, nur mäßigen Ansprüchen genügen kann.

Interessante Bearbeitungsvarianten ergeben sich ferner aus dem Einsatz von Lichtleitfasern [92, 93] zur Strahlführung. Sie haben zum einen eine homogenisierende Wirkung auf die Energieverteilung über den Laserstrahlquerschnitt. Zum anderen werden sie besonders beim Laserstrahlschneiden und -schweißen eingesetzt, um das Werkzeug Laserstrahl flexibel an beliebige Bearbeitungsstellen führen zu können.

#### 2.2.4 Optikschutz

Besondere Bedeutung kommt beim Bohren dem Optikschutz zu [83]: Die Spritzer aus der Bearbeitung können einerseits die Fokussieroptik beschädigen, andererseits bilden sie Streu- und Absorptionszentren für die Laserstrahlung. Nach wenigen Löchern verschlechtert sich die Bohrqualität rapide.

Als Abhilfe wird der zunächst trivial anmutende Vorschlag eingebracht, den Arbeitsabstand zwischen dem Bearbeitungsort und der Fokussieroptik möglichst groß zu gestalten [94], um deren Verschmutzungsgefährdung durch Spritzer unmittelbar zu minimieren beziehungsweise die bauliche Unterbringung einer geeigneten Optiksicherungsrichtung zu gestatten. Dies entspricht einer Vergrößerung der Brennweite  $f_{\text{lens}}$  der Fokussieroptik, womit nach der Beziehung [95]

$$\Theta_F \approx d_{L \text{ lens}} / f_{\text{lens}} \quad (5),$$

die genähert für kleine  $\Theta_F$  gilt und bei der  $d_{L \text{ lens}}$  einem gegebenen Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse entspricht, der Fokussierwinkel  $\Theta_F$  verkleinert werden würde. Um aber vergleichbare Bearbeitungsergebnisse erhalten zu können, müßte der Fokussierdurchmesser  $d_{LF}$  in etwa erhalten bleiben, was wegen Gleichung (3) eine

Verbesserung der Strahlqualität, das heißt den Einsatz eines Laseraggregats mit einem kleineren Strahlparameterprodukt  $q^*$ , zwingend erforderlich machen würde. Es zeigt sich also, daß eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes Folgen für die Gestaltung der Laserstrahlquelle mit sich zieht, die unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzuwägen sind. In Extremfällen, in denen wegen der hohen Qualitätsanforderungen Laser mit bestmöglicher, das heißt beugungsbegrenzter Strahlqualität eingesetzt werden, wird eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes zwangsweise mit einem proportional anwachsenden Fokussdurchmesser einhergehen und somit zu einer Verschlechterung des Arbeitsergebnisses führen.

Beim bereits erwähnten Laserstrahlbohren von Kühlluftbohrungen an Triebwerkschaufeln, an denen die Dimensionen der Löcher relativ groß sind, werden üblicherweise Fokussierbrennweiten von gut 100 mm bis 200 mm eingesetzt. Dabei genügt es, die Fokussierlinse durch ein davorgesetztes Glasplättchen zu schützen [88]. Unterstützend wird eine koaxial zum Laserstrahl angeordnete Prozeßgasdüse eingesetzt, die in einem im Vergleich zum Laserstrahlschneiden großen Abstand zum Werkstück ( $> 10$  mm) plaziert wird. Auf diese Weise gelangen nur vereinzelt Partikel durch die Düsenöffnung und gegen den Prozeßgasstrom bis zum schützenden Glasplättchen.

Neben solchen Glasplättchen sind Opfer- oder Verschleißteile in Form von Filmen und Scheiben üblich, die, zwischen Bearbeitungsstelle und Fokussieroptik angebracht, letztere vor den Spritzern und Dämpfen schützen [28, 77, 85, 96, 97]. Die Verschleißteile bestehen aus gegenüber der Laserstrahlung weitgehend transparentem Kunststoff oder Glas. Als Nachteile solcher Lösungen ergeben sich die Verluste an Laserstrahlleistung, die bei zwei nicht antireflexbeschichteten Grenzflächen bis 10 % ausmachen können, sowie die oftmals schlechten optischen Eigenschaften, die sich aus wirtschaftlichen Erwägungen ergeben und letztlich zu einer Laserstrahlverschlechterung führen. Zwecks Unterstützung der Schutzfunktion können zum Laserstrahl quergerichtete Gasstrahlen, die die aus der Bearbeitungszone strömenden Partikel ablenken, zwischen der Bearbeitungsstelle und dem Verschleißteil angebracht werden [86].

Im Falle kurzer Laserstrahlpulsdauern bei geringer Pulsfrequenz lassen sich mechanische Chopper einsetzen, die zu den Laserstrahlpulsen zeitlich synchronisiert werden müssen [77].

Schutzverfahren unter Nutzung der Elektrostatik beziehungsweise der Thermophorese werden ebenfalls erprobt [96]. Sie erweisen sich jedoch als nahezu wirkungslos, wenn, wie beim Laserstrahlbohren die Regel, die abzulenkenden oder abzubremsenden Partikel mit großer kinetischer Energie versehen sind.

Als hingegen sehr effektiv für den Optikschatz erweist sich im Falle einer Bearbeitung mit einem gütegeschalteten Nd:YAG-Laser, bei der wegen der hohen Laserstrahlleistung ein beträchtlicher Dampfanteil entsteht, eine oxidierende Atmosphäre [97]. Durch die schnelle Reaktion der Dampfpartikel mit dem Sauerstoff wird vermieden, daß sie an der Fokussieroptik anhaften können. Dieser günstige Effekt gilt im übrigen auch für die Lochwandung, die frei von wiedererstartem Material bleibt.

#### 2.2.5 Beeinflussung beziehungsweise Unterstützung des Laserstrahlbohrprozesses

Beim Trepannier- beziehungsweise beim Bohrschneiden wird das Prozeßgas mittels einer Düse zugeführt [85], da es auf diese Weise durch seine kinetische Energie zum Austrieb des Werkstoffs aus der Bearbeitungsfuge beitragen kann. Dieser Austriebsmechanismus bleibt beim Einzel- oder Mehrfachpulsbohren weitgehend ohne Wirkung, da das zunächst bestehende Sackloch den Austrieb in Prozeßgas-Strömungsrichtung nicht zuläßt.

Vom Laserstrahlbrennschneiden her ist bekannt, daß Sauerstoff als Prozeßgas über die exotherme Oxidationsreaktion mit dem zu schneidenden Werkstoff zu erhöhten Vorschubgeschwindigkeiten beiträgt [98]. Die Übertragung dieses Sachverhalts auf das Laserstrahlbohren ist nicht ohne weiteres zulässig: Bei Bohrbearbeitungen mit kurzen Laserstrahlpulsen reicht die Dauer, über die der Werkstoff von den Laserstrahlpulsen auf Zündtemperatur gehalten wird, nicht zur Auslösung der Reaktion mit dem Sauerstoff aus. Außerdem wird der größte Anteil der eingekoppelten Laserstrahlleistung mit dem verdampften beziehungsweise geschmolzenen Werkstoff abtransportiert, und die geringe im Grundwerkstoff verbleibende Wärmemenge wird sehr schnell in den umliegenden, kalten Werkstoff abgeführt.

Die Bearbeitungsatmosphäre wirkt sich aber durch den durch sie verursachten Wärmeentzug auf den Prozeß aus: So wird zum Beispiel beim Bohren mit dem Excimer-Laser festgestellt, daß die Gase Helium, Luft und Argon entsprechend ihrer

abnehmenden Wärmeleitfähigkeit zu einer unterschiedlich schnellen Verfestigung der Werkstoffschmelze führen, wodurch wiederum die durch Oberflächenspannung bewirkte Glättung der Oberfläche entweder begünstigt oder gehemmt wird [99]. Der konvektive Vorgang kann maßgeblich durch die Geschwindigkeit des Gases, die im wesentlichen durch den Gasdruck und die Düsenform bestimmt wird, beeinflusst werden. Gashochdruck und unter Umständen auch ein Flüssigkeitszusatz zum Schneidgas können sich positiv auf das Bearbeitungsergebnis auswirken [100].

Als weitere Einrichtung, mit der eine Beeinflussung der Bearbeitungsatmosphäre erreicht werden kann, wird eine Kammer auf der der Laserstrahlquelle zugewandten Seite des Werkstücks eingesetzt [101]. Damit wird unter anderem ermittelt, wie sich ein partielles Vakuum auf die beim Laserstrahlbohren entstehende Dampf- und Plasmawolke und letztlich auf die Bearbeitungsqualität auswirkt. Obwohl eine Beeinflussung nachgewiesen wird, sind die Ergebnisse für die vorliegende Arbeit von geringer Bedeutung, da die "Qualität" der gefertigten Löcher als unannehmbar anzusehen ist. Relevant ist hingegen der konkrete Konstruktionsvorschlag für eine Prozeßgaskammer, die den wesentlichen Anforderungen nach Werkstückeinspannung, Durchlässigkeit für die Laserstrahlung sowie Zuleitung des Prozeßgases entspricht. In [102] wird ohne nähere Präzisierung erwähnt, daß der Auswurf des Werkstoffs aus eines Durchgangsloches durch Luftüberdruck in einer solchen Kammer unterstützt werden kann.

Das Laserstrahlschneiden und -bohren kann auch unter Wasser durchgeführt werden. Im Falle einiger Keramiken führt es zur Vermeidung der sonst typischen Risse und der umgeschmolzenen Schicht [103, 104]. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn ein gütegeschalteter Laser mit Pulsdauern in der Größenordnung von 100 ns und Strahlintensitäten um  $1 \text{ MW/mm}^2$  eingesetzt wird. Erreichen die Pulse jedoch Dauern, die gepulsten Lasern entsprechen, oder sind gar kontinuierlich strahlende Laser im Einsatz, ist der qualitätsverbessernde Effekt der Bearbeitung unter Wasser nicht mehr wirksam.

Auf der Werkstückrückseite angebrachte Unterlagen (Backer) werden in der Regel mit zweierlei Zweck beim Elektronenstrahl- und Laserstrahlbohren eingesetzt: Zum einen verbessern sie den Austrieb des Werkstoffs aus dem entstehenden Bohrloch durch die Aufrechterhaltung eines erhöhten Dampfdruckes auch nach dem Durchbruch durch die Rückseite des Werkstücks, zum anderen vermeiden sie gegebenenfalls die Beschädigung von hinter der Bearbeitungsstelle liegenden Partien des Werkstücks.

Letzteres ist zum Beispiel an Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken der Fall, wo die zweite Wandung nicht durch den durch die erste Wandung durchtretenden Laserstrahl beschädigt werden darf. Für solche Fälle werden Füllstoffe wie Polytetrafluoräthylen (Nylon) [85], Harze [105], die jedoch Aushärtezeiten bis 24 Stunden aufweisen, oder gar wasserlösliche, thixotropische Medien [106], die die Laserstrahlung absorbieren, verteilen und zum Teil auch reflektieren sollen, eingesetzt. Einen Sonderfall bildet eine Anwendung, bei der eine Reflexionsplatte in einem kleinen Abstand zur Werkstückrückseite angebracht wird, um die dort reflektierte Laserstrahlung zur gezielten Kantenrundung auf der Lochaustrittsseite einzusetzen [107].

Ein Vorwärmen des Werkstücks trägt dazu bei, bestimmte Werkstoffe rißärmer oder überhaupt erst laserstrahlchneiden zu können. Dies gilt insbesondere bei spröden Stoffen mit einem hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten, wie bestimmte Keramiken und Gläser [108]. Temperaturbeständiges Glas (Pyrex) kann mit einem gepulsten CO<sub>2</sub>-Laser erst nach Vorwärmung auf 260 °C mikrorißfrei gebohrt werden, da sich dadurch gemäß einer Simulationsrechnung die thermisch induzierten Spannungen um circa 30 % reduzieren [109]. Bei Stählen liegt der Vorteil eines Vorwärmens auf zum Beispiel 180 °C in einer Verbesserung des Werkstoffausfließverhaltens und damit geringeren Rauhtiefen bei höheren Schneidgeschwindigkeiten; er wird jedoch mit der Vergrößerung von Schnittfugenbreite und Wärmeeinflußzone erkauft [110]. Das Vorwärmen der Werkstücke kann mittels elektrischer Widerstandsheizung, elektromagnetischer Induktion, eines Plasmabrenners oder auch eines auf der Werkstückrückseite positionierten Plasmastrahls bewerkstelligt werden [111, 112].

Verschiedene dem eigentlichen Laserstrahlbohrprozeß überlagerte physikalische Effekte sollen in der Lage sein, besagten Prozeß zu unterstützen beziehungsweise für eine bessere Bearbeitungsqualität zu sorgen. Ultraschallschwingungen tragen über ein verbessertes Fließverhalten der Schlacke dazu bei, die wiedererstartete Schmelzschicht im Loch zu verkleinern, und, wie für einen konkreten Fall mit einer Schwingungsamplitude von 25 µm berichtet, helfen, die Tiefe von Sacklöchern um 10 % zu vergrößern [49]. Durch die Beeinflussung des Plasmas oberhalb der Bearbeitungsstelle zeitigen elektromagnetische Felder ebenfalls eine begünstigende Wirkung [113].

Wie auf den Optikelementen sind auch auf den Werkstücken Materialablagerungen unerwünscht. Sie lassen sich aber kaum gänzlich vermeiden. Abhilfe kann das Bestreichen des Werkstücks mit einer kreideähnlichen Paste [86] als Antihafbelag schaffen. Wachs und Silikonfett können zum Zweck der Reduzierung von Graten auf

der Werkstückoberfläche eingesetzt werden, wozu auch Werkstücke mit zwei Schichten, von denen die obere nach der Laserstrahlbohrbearbeitung wieder zu entfernen ist, vorgeschlagen werden [49].

Anstriche auf der dem Laserstrahl zugewandten Werkstückseite werden aber auch zum Zwecke der Absorptionserhöhung angebracht: Insbesondere bei transparenten Materialien, wie Rubin, Saphir oder Diamant ist eine Schwärzung üblich [84].

Eine detaillierte Betrachtung über den Einfluß des zu bearbeitenden Werkstoffs würde hier den Rahmen sprengen. Es sei lediglich im Hinblick auf die für diese Arbeit wichtigen Edelmehle darauf hingewiesen, daß sich Chrom als Legierungselement in einem Eisenwerkstoff stark bemerkbar macht: Dieses Element führt zu einer Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit, was zum Beispiel beim Laserstrahlschneiden von Bedeutung für die Bearbeitungsergebnisse ist [98]. Zum anderen erhöht auch schon ein geringer Anteil  $\text{Cr}_3\text{O}_3$  die Viskosität von Eisenoxidschlacken beträchtlich und verschlechtert somit deren Fließfähigkeit [114]. Unter kontinuierlicher Zuführung von Laserstrahlenergie erfolgt außerdem eine bevorzugte Verbrennung von Chrom, was jedoch bei Pulsbetrieb von untergeordneter Bedeutung ist.

### 2.2.6 Relativbewegung zwischen Laserstrahlfokus und Werkstück

Beim Trepannieren von Löchern nach dem in Bild 3 dargestellten Prinzip ergibt sich, daß bei gegebener Fokussieroptik die gewollte seitliche Ablenkung des Strahlfokus zwangsläufig auch zu einer Schräglage der Strahlachse zur Werkstückoberfläche führt. Entspricht diese Schräglage nicht der angestrebten Bohrlochform, besteht auch keine Möglichkeit, diese zu korrigieren.

Angesichts dieses Nachteils kann es günstiger sein, eine Werkstückspannvorrichtung mit integrierter Kipp- und Drehmöglichkeit einzusetzen. Eine dementsprechende Ausführungsform zeigt Bild 6 schematisch: Eine Kippung um einen Winkel  $\alpha$  beeinflusst im wesentlichen die Konizität des Loches, ein Versatz in Richtung  $x$  dessen Durchmesser. Die jeweils optimale Fokussierlage wird durch die relative Lage zwischen Vorrichtung und Fokussieroptik, im Bild durch Achse  $z_M$ , eingestellt. Die eigentliche Trepannieroperation wird durch Drehen der Vorrichtung um die Achse  $\beta$  bewerkstelligt. Zufriedenstellende Bearbeitungsergebnisse lassen sich erst erzielen, wenn die Vorrichtungskinetik und der Laserbetrieb genau synchronisiert sind. Des weiteren

muß im Sinne gut wiederholbarer Bearbeitungsergebnisse konstruktiv dafür gesorgt sein, daß alle Bewegungsachsen spielarm ausgeführt sind und insbesondere die Achse  $\beta$  eine ausreichende Drehgeschwindigkeit aufweist. Bild 7 zeigt, wie sich die Lochform in einem Stahlblech von 0,5 mm Dicke durch den Kippwinkel  $\alpha$  beeinflussen läßt.

Gegenüber einer konstruktiven Lösung, bei der das Werkstück wie im Falle der eingangs dargestellten Trepanniertechnik unbewegt bleibt, weist eine

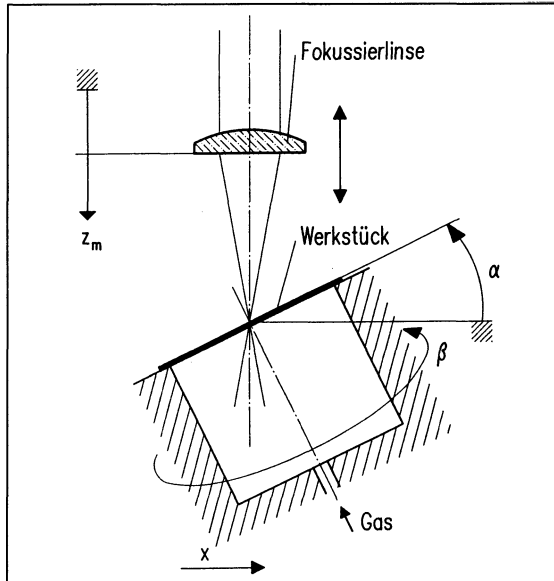


Bild 6: Schematische Darstellung einer Vorrichtung mit Kipp- und Drehachse sowie integrierter Prozeßgaskammer

Vorrichtung mit Kipp- und Drehachse eine erschwerte Automatisierbarkeit auf. Aus diesem Grunde gibt es Konstruktionen, bei denen durch eine aufwendige Kombination von Planplatten und Fokussierlinse der Laserstrahl derart ausgelenkt werden kann, daß innerhalb eines begrenzten Betriebsbereiches alle denkbaren Kombinationen von Laserstrahlwinkel und Trepannierdurchmesser einstellbar sind [115].

Der Laserstrahl kann aber auch durch Spiegelablenkung in die jeweils erforderliche Bearbeitungsposition gebracht werden. Es können dadurch sowohl eine Trepannierbahn als auch zum Beispiel die Orte verschiedener Einzellöcher abgefahren werden. Letzteres wird vorgeschlagen, wenn sich beim Perkussionsbohren ergibt, daß eine langsamere Laserstrahlpulsfrequenz als die vom Laseraggregat gelieferte für den Bearbeitungsprozeß von Vorteil wäre. In einem solchen Fall können die aufeinanderfolgenden Laserstrahlpulse durch schnelles Ablenken des Laserstrahls auf mehrere Bearbeitungsstellen, das heißt auf mehrere Einzellöcher verteilt werden [18].

Durch Einsatz eines eigens konzipierten Spiegelsystems läßt sich der Trepannier-

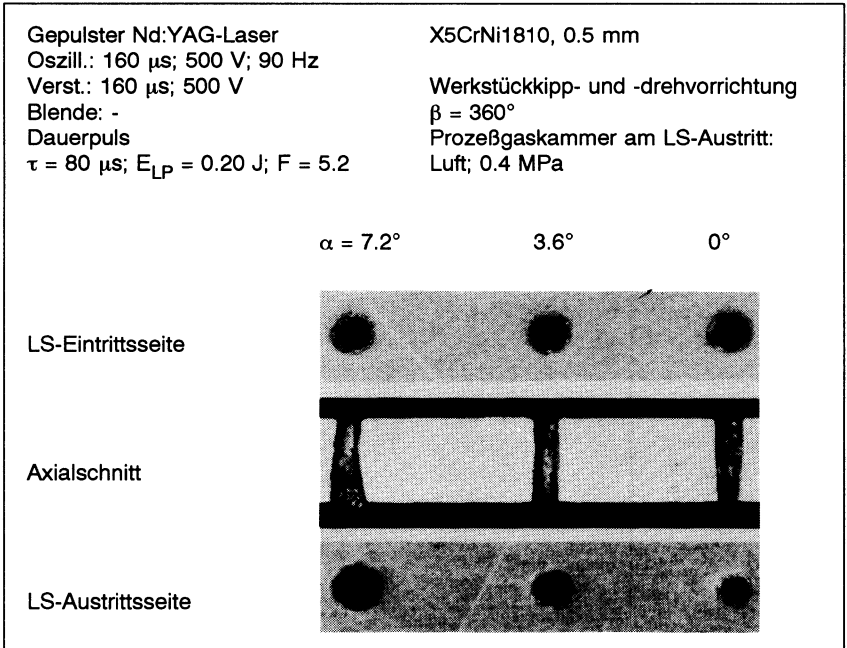


Bild 7: Bearbeitungsbeispiel für Vorrichtung mit Kipp- und Drehbewegung des Werkstücks und integrierter Prozeßgaskammer

durchmesser auch ohne Verstellung des Strahleinfallswinkels verändern [17]. Die verschiedenen Realisierungsvorschläge umfassen zwei bis maximal vier zusätzliche Umlenkspiegel im Laserstrahlengang, die zur Beeinflussung des Trepannierdurchmessers, bei Bedarf aber auch des Strahleinfallswinkels justiert werden müssen. In letzter Konsequenz sind sogar zweistufige trichter- oder fächerförmige Löcher herstellbar. Allen Vorschlägen ist gemein, daß sie mit großem Konstruktions- und Justieraufwand verbunden sind.

Zur Strahlführung können auch Galvanometer-Scanner eingesetzt werden, welche beliebige dynamische Auslenkungen des Strahls erlauben [92, 116-119]. Scanner kommen in vielen industriellen Applikationen zum Laserstrahlschweißen, -schneiden, -bohren, -ritzen, -wärmebehandeln und bei der Auslösung chemischer Reaktionen zum Einsatz [117]; sehr häufig sind sie auch beim Laserstrahltrimmen und -beschriften vorzufinden. Sie überzeugen dabei durch ihre Geschwindigkeit und Genauigkeit



sowie durch die Flexibilität, die aus der freien Programmierbarkeit ihrer Rechenersteuerung resultiert. Die Genauigkeit der Scan-Bewegung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, von denen der wichtigste das schwankende Gleitverhalten der Galvanometerlagerungen ist [120]. Bei Anwendungen, die hohe Beschleunigungen der Spiegel erfordern, ist den dynamischen Spiegelverformungen [121] wegen der durch sie verursachten Verzerrungen der örtlichen Leistungsverteilung über den Laserstrahlquerschnitt Beachtung zu schenken. Die Genauigkeit und Temperaturunempfindlichkeit handelsüblicher Spiegelgalvanometer kann mit einer speziellen Auswerte- und Ansteuerungselektronik gesteigert werden [122].

### 2.2.7 In-process-Beurteilung beziehungsweise -Steuerung der Lochgeometrie

Laserstrahlgebohrte Löcher lassen sich wegen der großen Maß- und Formabweichungen generell schlecht auf ihre Qualität hin beurteilen. Die Kühlluftbohrungen in Triebwerksschaufeln werden zum Beispiel mit manuell eingeführten Meßstäbchen geprüft [123], was zeitaufwendig und schlecht automatisierbar ist und eine für viele Anwendungen nur unzureichende Beschreibung der Lochgeometrie erlaubt. Zerstörende Prüfverfahren, wie das Aufschleifen des Werkstücks entlang der Lochachse, ermöglichen zwar eine bessere Erfassung der Geometrie, sind aber ihrer Natur wegen kostenintensiv und nicht in 100%-Prüfung anzuwenden. Bei Feststellung einer Maßabweichung ergibt sich zudem die Schwierigkeit, daß die Löcher in der Regel nicht wiederholbar in der Bearbeitungseinrichtung plaziert werden können, so daß eine Nacharbeit unmöglich ist. Demzufolge ist es aus technischen und wirtschaftlichen Erwägungen wünschenswert, ohne Lösen der Aufspannung, das heißt in situ eine Qualitätsbeurteilung der Löcher vorzunehmen. Hierzu finden sich in der Literatur einige konkrete Vorschläge.

Die meisten der diesbezüglichen Lösungsansätze nehmen den Weg über die Prozeßdiagnostik:

So kann der Durchstechzeitpunkt unmittelbar über die Erfassung der Laserstrahlung auf der Rückseite des Werkstücks detektiert werden [124]. Mittelbar kann dieser Zeitpunkt über die Durchleuchtung einer teiltransparenten Unterlage, zum Beispiel aus Keramik, durch einen HeNe-Hilfslaserstrahl [105] oder mittels der Reflexion der Laserstrahlung in einem thixotropischen Medium mit reflexionsfördernden Zusatzpartikeln [106] erfaßt werden. Auch die vom Werkstück emittierte Wärmestrahlung kann in ihrem zeitlichen Verlauf während der Bohrbearbeitung detektiert und zu

Diagnosezwecken herangezogen werden [124]. Eine optische und akustische Rückmeldung aus der Bearbeitungsstelle kann zum Beispiel zur Detektion der Durchdringung der verschiedenen Schichten einer zu bohrenden Leiterplatte herangezogen werden [125]. In einigen Fällen läßt sich, die geschickte Anwendung der Diagnosegeräte vorausgesetzt, das gewonnene Signal mit Größe und Form der Löcher korrelieren. Das akustische Signal, das vom Auftreffen des Gasstrahls auf die Bearbeitungszone erzeugt wird, kann auch beim Bohren zu Diagnosezwecken verwendet werden: Besonders die Tiefe von Sacklöchern läßt sich damit erfolgreich messen [126]. Genauere Angaben bezüglich Größe und Form eines Loches lassen sich mit einer rechnergestützten Bildverarbeitung der Bearbeitungsstelle gewinnen [123, 127], wobei aufgrund der Helligkeitsänderung auch der Durchstechzeitpunkt festgestellt werden kann.

In einigen Fällen werden die Meßgrößen nicht nur zu Diagnosezwecken, sondern auch zur gezielten Steuerung beziehungsweise Regelung des Bearbeitungsvorgangs herangezogen:

Eine Möglichkeit dazu bietet die Beobachtung des Plasmaleuchtens während des Bohrvorgangs [128]. Durch Unterlegen des Werkstücks mit einem "Backer" ist es möglich, den Durchbruchzeitpunkt durch die Spektrumsveränderung im Plasmaleuchten festzustellen und den Prozeß dadurch zumindest in seiner Zeitdauer zu steuern. Dabei läßt sich eine Reduzierung der Durchmesserstreuung von ursprünglich 15 % auf 5 bis 10 % erreichen [129]. In einem anderen Fall wird während eines Einstechvorgangs beim Schneiden mit einem CO<sub>2</sub>-Laser die infrarote Rückstrahlung mit einer Photodiode aufgenommen. Neben der Detektion des Durchstechzeitpunkts ist es damit auch möglich, die Laserstrahlparameter so genau zu steuern, daß die exotherme Reaktion mit dem eingesetzten Prozeßgas Sauerstoff sicher unterbunden werden kann [130]. Die diagnostizierte Größe wird in einem geschlossenen Regelkreis und in-process zur jeweiligen Optimierung der Laserstrahlparameter herangezogen. Zum Bohren an Turbinenschaufeln wird von einem Laseranlagenhersteller eine Einrichtung zur Messung und Kompensation der Lochdurchmesser empfohlen: Optoelektronisch wird die Größe des zuletzt gebohrten Lochs erfaßt und eine eventuelle Abweichung vom Sollwert beim darauffolgenden Loch durch Anpassung der Lasereinstellparameter kompensiert [88]. Das System besitzt eine optische Auflösung von 0,025 mm und ist für Lochdurchmesser zwischen 0,25 und 1,3 mm geeignet, für welche Toleranzen von circa  $\pm 10\%$  gehalten werden können.

### 2.2.8 Fazit

Für viele Anwendungen im industriellen Maßstab ist das Laserstrahlbohren eingeführt: Als Beispiel seien hier Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken aufgeführt. Lediglich dort, wo hohe Qualitätsforderungen hinsichtlich des Erscheinungsbildes, der geometrischen Form und/oder der geometrischen Reproduzierbarkeit der Löcher bestehen, kann sich das Werkzeug Laserstrahl bislang nicht durchsetzen. Die Durchmesserstreuungen laserstrahlgebohrter Löcher liegen trotz aller qualitätsfördernder Maßnahmen bei der Bearbeitung bislang nicht unter  $\pm 5\%$ .

### **3 Zielsetzung der Arbeit**

Vom im vorangegangenen Kapitel dargestellten Stand der Technik für das Laserstrahlbohren läßt sich ableiten, daß die erreichbaren Lochqualitäten bei weitem nicht die engen Formtoleranzen aufweisen, die bei Bauteilen mit durchflußbestimmender Funktion zu erfüllen sind. Auch die technologischen Ansätze, die, in der Regel mit Hilfe einer optoelektronischen Auswertung, auf eine in-process-Erfassung der Lochgröße abzielen, führen nicht zur geforderten Toleranzeinengung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der verfahrenstechnischen Weiterentwicklung des Laserstrahlbohrens von Durchgangslöchern, um insbesondere die geometrische Reproduzierbarkeit durchflußbestimmender Löcher beziehungsweise Mehrlochbilder zu verbessern. Impliziert ist ferner die Forderung, daß die Laserstrahlbearbeitung zu Löchern in Fertigqualität führen soll, das heißt daß keine Nachbearbeitung erforderlich sein darf.

Diese Zielsetzung läßt sich nur mittels eines neuartigen fertigungstechnischen Verfahrensansatzes verwirklichen. Ein solcher Ansatz wird in verschiedenen Varianten vorgeschlagen und die dazu speziell konzipierte Laserstrahlbearbeitungsanlage vorgestellt.

Voraussetzung für die Herstellbarkeit qualitativ hochwertiger, insbesondere aber auch kleiner Löcher ist ein Laser mit an die Bearbeitungsaufgabe optimal angepaßten Strahleigenschaften. Technologische Wege zur Realisierung werden aufgezeigt. Die eingesetzte Laseranlage besteht neben dem Laser aus Werkstückhandhabungseinrichtung und Anlagensteuerung, die beide ebenfalls zweckoptimiert sind.

Die Wirksamkeit des vorgeschlagenen Bearbeitungsverfahrens wird anhand verschiedener Bearbeitungsbeispiele an Stahlblechen unterschiedlicher Dicken nachgewiesen. Dabei werden verschiedene Bearbeitungsstrategien mit variablen Lochgeometrien und -anordnungen untersucht.

---

Abschließend werden Hinweise für eine wirtschaftliche industrielle Umsetzung des Bearbeitungsverfahrens vermittelt.

## **4 Konzept und Ausführung einer Laserstrahlbohrereinrichtung mit Durchflußregelung**

Das technische Konzept für das neue Bearbeitungsverfahren zur Reduzierung der Durchflußstreuung laserstrahlgebohrter Löcher basiert auf einer in-process-Messung der Lochgeometrie und einer dem jeweiligen Meßwert entsprechenden Regelung des Laserstrahlbohrvorgangs [131]. Als Meßgröße wird der Prozeßgasdurchfluß durch das in Arbeit befindliche Loch herangezogen. Der gewonnene Durchflußwert wird dann dazu genutzt, den Bohrprozeß so zu steuern, daß eine schrittweise Annäherung an einen vorgegebenen Solldurchfluß erfolgt.

In diesem Kapitel wird die hard- und softwareseitige Realisierung dieses Konzeptes vorgestellt. Eine detaillierte Betrachtung der eingesetzten Laserstrahlquelle findet sich in Kapitel 5.

### **4.1 Gesamtaufbau zur Durchflußmessung und Regelung des Bohrprozesses**

Den Aufbau zur Realisierung der Regelung zeigt in schematischer Form Bild 8. Das zu bearbeitende Werkstück ist auf einer Vorrichtung mit integrierter Prozeßgaskammer aufgespannt. In der Zuleitung für das Prozeßgas befindet sich das Durchflußmeßgerät. Dessen Meßsignal wird in einen Rechner gespeist, in dem aufgrund eines Soll-Ist-Vergleichs die jeweiligen Stellwerte für die Laseranlage errechnet werden. Die Laseranlage besteht aus dem eigentlichen Laseraggregat, der Positioniereinheit sowie einem zweiten Rechner, der die Ansteuerung von Laseraggregat und Positioniereinheit wahrnimmt. Nach jeder Neueinstellung der Laseranlage wird ein Bearbeitungsschritt in Gestalt der vorgesehenen Laserstrahlbearbeitung am Werkstück ausgeführt, wonach sich (in der Regel) ein neuer Durchflußwert ergibt. Die dargestellte Abfolge Laseranlageneinstellung - Laserstrahlbearbeitung - Durchflußmessung wird solange wiederholt, bis der Solldurchfluß erreicht ist.

Im gesamten Leitungssystem für das Prozeßgas, das aus der eigentlichen Zuleitung mit dem Durchflußsensor, der Prozeßgaskammer und dem Werkstück mit dem Loch

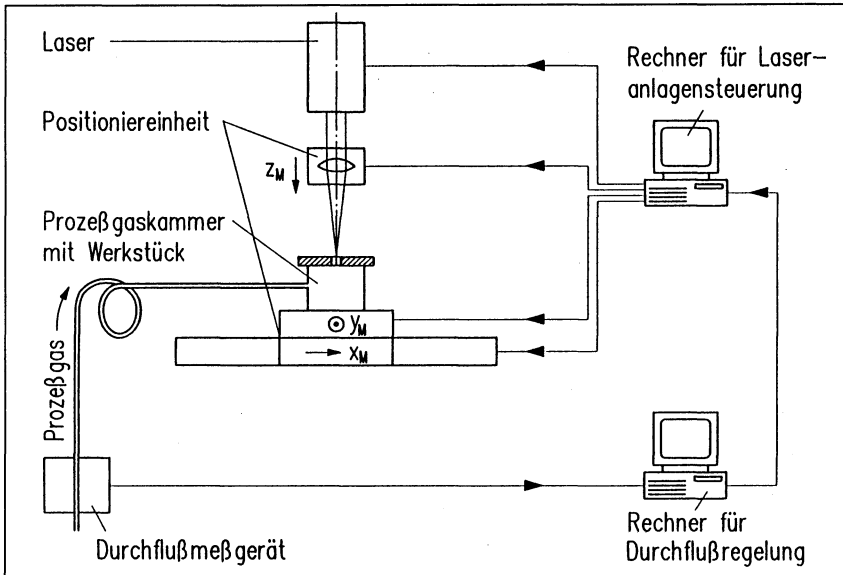


Bild 8: Aufbau für das durchflußgeregelt Laserstrahlbohren

besteht, stellt letzteres die durchflußbestimmende Drosselstelle dar. Demzufolge wird mit dem Durchflußwert strenggenommen die Drosselwirkung des Lochs, in welche neben den Abmessungen dessen engster Stelle viele andere geometrische Eigenschaften desselben sowie die gegebenen Gaszusammensetzung und -druck eingehen, beurteilt. Das Bearbeitungsverfahren ist aufgrund der verwendeten Meßgröße besonders gut zur Anfertigung von Löchern mit durchflußbestimmender Funktion geeignet.

#### 4.2 Werkstückspannvorrichtung mit integrierter Prozeßgaskammer

Die Versuche werden entsprechend ihrem grundlegenden Charakter immer an ebenen Blechen durchgeführt. Es gilt, diese besonders in ihrer Lage entlang der Laserstrahlachse  $z$  wiederholbar einspannen zu können. Des weiteren muß das Werkstück zumindest auf einer Seite in eine gasdichte Verbindung zur Prozeßgasleitung gebracht werden, was zweckmäßigerweise mit einer Prozeßgaskammer realisiert werden kann. Bild 9 zeigt schematisch die in den Versuchen eingesetzten Ausführun-

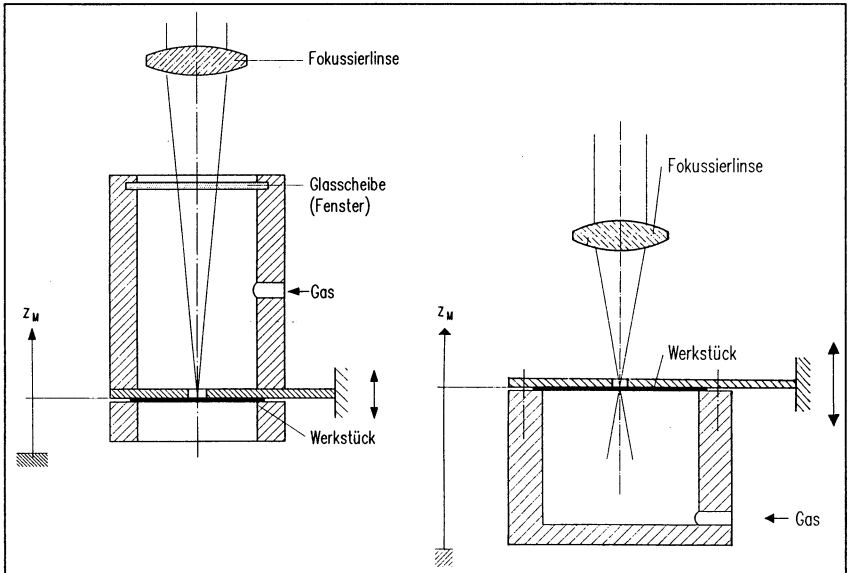


Bild 9: Prozeßgaskammern für die Laserstrahleintritts- und -austrittsseite des Werkstücks

gen von Werkstückspannvorrichtungen mit Prozeßgaskammern. Letztere können wahlweise auf der Laserstrahleintritts- beziehungsweise auf der -austrittsseite des Werkstücks oder aber in Kombination miteinander angeordnet werden. Die Zuführung des Gases geschieht demzufolge nicht über eine Düse, wie es zum Beispiel beim Laserstrahlschneiden generell oder auch teilweise beim Laserstrahlbohren, zum Beispiel von Turbinenschaukeln, praktiziert wird.

Von besonderem Vorteil sind Spannvorrichtungen, Bild 9, in denen das Werkstück auf seiner Laserstrahleintrittsseite aufgespannt wird. Damit ergibt sich eine von der Werkstückdicke unabhängige Zuordnung zwischen der Maschinenkoordinate  $z_M$  und der auf die Werkstückoberfläche bezogenen Fokuslage  $z_F$ . (Diese feste Zuordnung gilt nur bei unveränderten Lasereinstellparametern; eine Veränderung letzterer führte wegen der in Kapitel 5 dargelegten Laserstrahltaillenverschiebung zu einer neuen Zuordnung  $z_M$  zu  $z_F$ .)

Die Prozeßgaskammer für die Werkstückoberseite, Bild 9 links, ist mit einem Glasfenster von 1,6 mm Dicke und einem lichten Durchmesser von etwa 48 mm ausgestattet.



Die freie Höhe zwischen der Werkstückoberseite und dem Glas ist mit 84 mm konstruktiv möglichst groß gehalten, um der Verschmutzung durch aus der Bearbeitungszone herausgeschleuderte Partikel vorzubeugen. Das Glas ist beidseitig für die Wellenlänge 1064 nm der Laserstrahlung antireflexbeschichtet.

Wegen der begrenzten Festigkeit des Fensters muß der Prozeßgasdruck in dieser Kammer limitiert werden; für die untere Prozeßgaskammer gibt es diesbezüglich keine Einschränkung. Beide Kammern sind gasdicht gebaut und, neben den Zuleitungen für das jeweilige Prozeßgas, mit Anschlüssen für ein zusätzliches Manometer und für ein Ablaufventil versehen. Letzteres dient der Entgasung (Entlüftung) der Kammer, da sie sich bei anstehendem Gasdruck schlecht öffnen und somit das Werkstück kaum lösen läßt. Des weiteren wird gegebenenfalls durch eine Spülung der Kammer über das Ablaufventil sichergestellt, daß sie nicht mit der Umgebungsluft, sondern mit dem gewünschten Gas befüllt ist. Mit dem zusätzlichen Manometer wird überwacht, ob der Gasdruck in der Kammer demjenigen an der Gasarmatur beziehungsweise am Durchflußmeßgerät entspricht. Dies ist besonders dann von Wichtigkeit, wenn große Lochquerschnitte beim Laserstrahlbohren hergestellt werden und sich dadurch ein erheblicher Gasstrom durch die Kammer aufbaut, der, dem Bernoullischen Gesetz [132] folgend, prinzipiell zu einem Druckabfall führt.

Im Versuchsbetrieb ist es erforderlich, das Werkstück in seiner Aufnahme in mindestens zwei Richtungen zu verfahren: einerseits in Richtung des Laserstrahls, Achse  $z_M$ , zwecks Verstellung der Fokusslage, andererseits in einer dazu senkrechten Ebene ( $x_M, y_M$ ), um ohne Umspannen des Werkstücks dieses an verschiedenen Orten bearbeiten zu können. Aus diesen Aufgaben resultieren weder an die Genauigkeit noch an das dynamische Verhalten einer Positioniereinheit hohe Ansprüche, und es ist möglich, einfache und damit kostengünstige Einrichtungen einzusetzen.

#### **4.3 Durchflußmeßgerät**

Im folgenden werden Kriterien für Auswahl sowie Betriebseigenschaften des eingesetzten Durchflußmeßgerätes dargestellt.

Für die Auswahl eines geeigneten Gerätes wird in Anlehnung an die von Pahl [133] vorgeschlagene Methodik der Anforderungskatalog gemäß Tabelle 1 aufgestellt.

Tabelle 1: Auswahlkriterien für Durchflußmeßsensoren

1. Zu messende Medien: alle in Frage kommenden Prozeßgase, wie Luft, Sauerstoff, Stickstoff, weitere inerte Gase
2. Volumenströme bis maximal 5000 cm<sup>3</sup>/min
3. Statischer Prozeßgasdruck bis 1,0 MPa, mindestens jedoch bis 0,4 MPa
4. An die maximal zulässige Bearbeitungssteuerung angepaßte Meßgenauigkeit und -reproduzierbarkeit
5. Größtmögliche Meßgeschwindigkeit, das heißt kurze Anstiegs- beziehungsweise Einschwingzeiten bei sprunghafter Veränderung des Durchflusses
6. Möglichst geringe Abhängigkeit des Meßwertes von (geringfügigen) Schwankungen des statischen Drucks beziehungsweise der Temperatur des Prozeßgases
7. Elektrische, dem Durchflußwert proportionale Signalausgabe mit der Möglichkeit zur rechnergestützten Weiterverarbeitung
8. Gute konstruktive Integrierbarkeit des Meßsensors in den Gesamtaufbau der Bearbeitungsanlage
9. Preisgünstigkeit

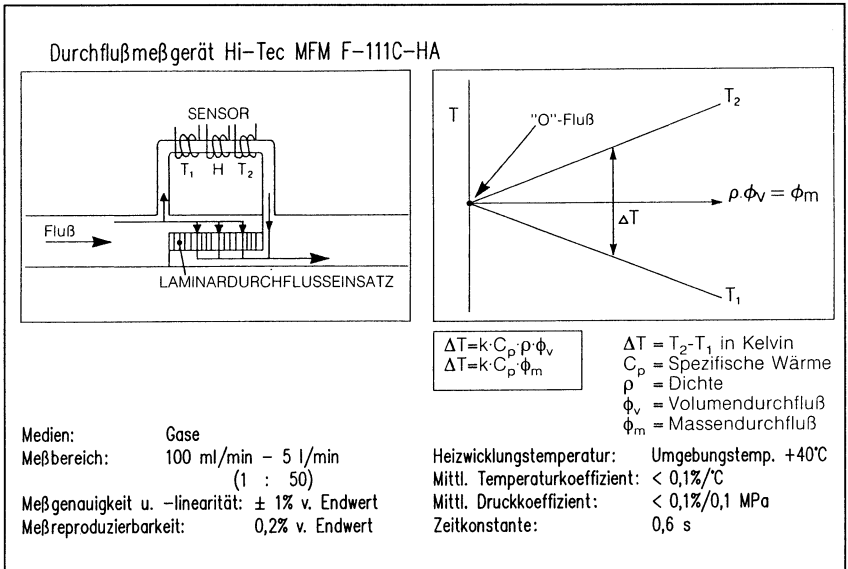


Bild 10: Meßprinzip und technische Daten des thermischen Massendurchflußmessers [134]

Nach eingehender Marktrecherche und einer technischen Bewertung unter Berücksichtigung des Anforderungskatalogs wird als Durchflußmeßsensor ein thermischer Massenstrommesser Hi-Tec MFM F-111C-HA [134] ausgewählt. Im Sensor wird ein Teil der Gasströmung gemäß Bild 10 von einer Heizspirale erwärmt und die Temperaturdifferenz an zwei der Heizspirale benachbarten Sensorspulen erfaßt. Diese Temperaturdifferenz ( $T_2 - T_1$ ) ist dem Massenstrom  $q_m$  gemäß der Beziehung

$$q_m \approx (T_2 - T_1) / c_p \tag{6},$$

mit  $c_p$  = spezifische Wärme, proportional.

### 4.4 Regelkreis

Der Signalflußplan nach Bild 11 verdeutlicht die Zusammenhänge bei der Bohrprozessregelung. Der Regelkreis besteht aus Regeleinrichtung und Regelstrecke, wobei sich erstere noch in den Regler und das Stellglied unterteilen läßt. Diese Bestandteile des Regelkreises, deren signalmäßige Verknüpfung und die auftretenden Störgrößen werden im folgenden näher erläutert.

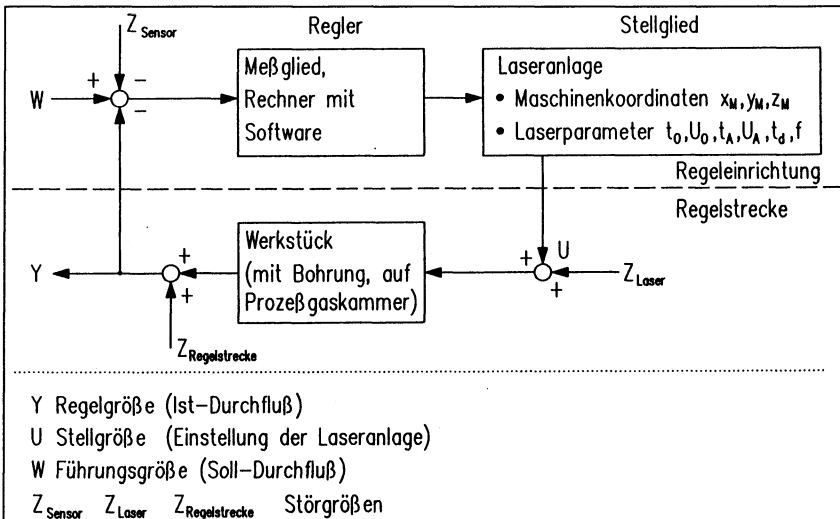


Bild 11: Signalflußplan für das durchflußgeregelt Laserstrahlbohren

Der Regler setzt sich zusammen aus dem Meßglied und dem Rechner mit entsprechender Software. Als Meßglied zur Istwerterfassung des Durchflusses wird der bereits beschriebene thermische Massendurchflußmesser eingesetzt. Zum Einlesen des Sensorsignals von 0 bis 5 V in den Rechner, einem marktüblichen IBM-kompatiblen Personal Computer, ist dieser mit einer Meßkarte PCL 812 PG [135] ausgestattet. Zur Reduzierung des Einflusses von im folgenden noch näher benannten Störgrößen wird ein Meßwert softwareseitig als Mittelwert aus 50 einzelnen und aufeinanderfolgenden Meßwerten gebildet. Der Durchfluß-Sollwert wird vom Bediener über die Tastatur eingegeben. Aus dem Vergleich der Soll- und Istgröße werden mit Hilfe der Software die Parameter für die Steuerung des Stellgliedes errechnet. Der Rechner kommuniziert in seiner Reglerfunktion über die serielle Schnittstelle mit dem zweiten Rechner, der die Steuerung der Laseranlage wahrnimmt, Bild 8.

Die realisierte Regler-Software ist gekennzeichnet durch Anwenderfreundlichkeit und, auch durch den modularen Aufbau bedingt, bei Bedarf erweiterbar. Die Bedienoberfläche ist selbsterklärend; fehlerhafte Eingaben werden ignoriert. Die Software übernimmt auch die Versuchsdokumentation, indem während der Versuchsdurchführung alle wichtigen Größen, beispielsweise Lasereinstelldaten oder Koordinaten der Positioniereinheit, in eigens angelegten Rechnerdateien abgespeichert werden. Zur Vermeidung von Endlosbearbeitungen, die zum Beispiel bei bestimmten Betriebsstörungen oder bei ungünstiger Vorwahl der Bearbeitungsparameter eintreten könnten, ist der Schleifenzähler in der Versuchs-Software auf den Maximalwert 40 begrenzt. In einer Ausbaustufe wäre es denkbar, in die Software eine Gut/Schlecht-Entscheidungsroutine zu integrieren, die schlechte Teile, das heißt solche mit außer Toleranz liegendem Durchflußwert, einer gesonderten Handhabung zuführen könnte.

Als Stellglied wirkt die bereits beschriebene Laseranlage. Die veränderlichen Einstellparameter derselben sind die Pulsdauer  $t$  und die Ladespannung  $U$  jeweils des Laseroszillators und des -verstärkers sowie die gemeinsame Pulsfrequenz  $f$ , gegebenenfalls eine Verzögerungszeit  $t_d$  zwischen den Blitzlampenpulsen der beiden Kavitäten sowie die Maschinenkoordinaten  $x_M$ ,  $y_M$  und  $z_M$  der Positioniereinheit. Die Festlegung, welche dieser Parameter als Stellgrößen bei der Regelung zum Einsatz kommen, ergibt sich mit der Auswahl der Regelstrategie, wie unter Abschnitt 4.5.2 beschrieben. Die Kommandos für Parametereinstellung und Laserstrahlpulsauslösung werden über die serielle Schnittstelle in den Laseranlagen-Steuerrechner eingelesen.

Zur Regelstrecke gehören das Werkstück und die Bohrvorrichtung mit der integrierten Prozeßgaskammer. Regelungstechnisch kann die Regelstrecke als Übertragungsglied mit der Stellgröße  $U$  (Laseranlagen-Einstellparameter) als Eingangsgröße und der Regelgröße  $Y$ , dem Durchfluß durch das Bohrloch, als Ausgangsgröße aufgefaßt werden.

Wie in Bild 11 des weiteren dargestellt, wirken Störgrößen auf das Meßglied,  $Z_{\text{Sensor}}$  auf die Laseranlage,  $Z_{\text{Laser}}$ , und auf die Regelstrecke,  $Z_{\text{Regelstrecke}}$ . Zu den Störgrößen am Sensor zählen die Ungenauigkeiten bei der Durchflußmessung, die von Herstellerseite in Bild 10 angegeben sind, Schwankungen der Versorgungsspannung, Alterungs- und Verschmutzungserscheinungen sowie Störungen durch elektromagnetische Felder, die durch die im Laser geschalteten elektrischen Ströme oder durch sonstige Umgebungseinflüsse bedingt sein können. Laseranlageseitig können sowohl Positionierfehler der Maschinenachsen als auch Schwankungen aller Laserstrahleigenschaften, zum Beispiel den zeitlichen Leistungsverlauf, die örtliche Energieverteilung oder die Lagestabilität betreffend, als Störgrößen auftreten. Schließlich kann die Regelstrecke Störgrößen in Gestalt von Leckagen oder Gasdruck- und -temperaturschwankungen aufweisen.

## 4.5 Regelstrategien

Die beim Laserstrahlbohren erzielte Bohrlochgröße hängt von den Laserstrahlparametern sowie von der relativen Lage des Laserstrahlfokus zum Werkstück ab. Jeder Regelstrategie muß also eine Variation mindestens einer dieser Größen zugrundeliegen. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Regelstrategien vorgeschlagen und hinsichtlich ihrer Erfolgsaussichten diskutiert.

### 4.5.1 Geregelter Bohrvorgang über eine Variation der Laserstrahlpulsenergie

Die Energie eines Laserstrahlpulses hängt ab von den Lasereinstellparametern Pulsdauer  $t$ , Ladespannung  $U$  sowie Pulsfrequenz  $f$  für den Laseroszillator und den Verstärker. Diese Größen sind variabel und bieten sich somit als Grundlage einer Regelstrategie an. Eine zufriedenstellende Arbeitsweise des Lasers ist nur in ganz bestimmten Leistungsbereichen möglich. Dies bedeutet, daß für jede Kombination von Pulsdauer und Ladespannung eine bestimmte, optimale Pulsfrequenz mit anzuwählen wäre. Dies

wiederum würde voraussetzen, daß im die Regelstrategie verwaltenden Rechner ein Kennfeld für die Pulsfrequenz in Abhängigkeit von den anderen Einstellgrößen des Lasers abgelegt sein müßte. Des weiteren müßte die Software Entscheidungsstrategien beinhalten, wie die Laseranlage bei einem bestimmten Befund bezüglich Bohrlochdurchfluß zu reagieren hätte. Zur Entschärfung dieser Problematik ist es darüber hinaus denkbar, daß sich der Rechner interaktiv mit einer Selbstdiagnoseeinrichtung des Lasers (beispielsweise "Leistungsgrenze überschritten") oder mit zusätzlichen Meßeinrichtungen (Strahldiagnose oder -leistungsmessung) die erforderlichen neuen Lasereinstellparameter suchte. Voraussetzung könnte hierbei ein auf dem Rechner implementiertes Expertensystem sein.

#### 4.5.2 Geregelter Bohrvorgang über eine Variation der relativen Lage des Laserstrahlfokus zum Werkstück

Mit deutlich geringerem Aufwand kann hingegen ein geregelter Bohrvorgang mittels Variation der relativen Lage des Laserstrahlfokus bezüglich der Werkstückoberfläche als Stellgröße realisiert werden. Der Laser kann dabei mit festen, vorab optimierten Parametern betrieben werden. Möglich erscheinen primär zwei Vorgehensweisen: Bohren beziehungsweise Aufbohren des Loches durch

- Bewegung des Werkstücks in der  $(x_M, y_M)$ -Ebene und
- Veränderung der  $z_M$ -Lage, das heißt der Fokusbahn  $z_F$ .

Bei den anschließend vorgestellten Regelstrategien wird der Regelvorgang nach dem Erreichen beziehungsweise Überschreiten des Durchflußsollwertes abgebrochen. Der Sollwert stellt also eine Abschaltswelle dar.

##### 4.5.2.1 Regelstrategie "Spiralbahn"

Diese Regelstrategie basiert darauf, bei feststehender Fokusbahn zunächst ein Loch zu bohren und dieses dann bis zur Sollgröße aufzubohren. Um ein geometrisch annähernd rundes Loch zu erhalten, bietet es sich an, beim Aufbohren eine Archimedische Spirale abzufahren: Nach jedem Laserstrahl-Einzelpuls wird das Werkstück in der  $(x_M, y_M)$ -Ebene auf der Spiralbahn um eine fest vorgewählte Distanz fortbewegt. Dann erfolgt der nächste Laserstrahl-Einzelpuls. Dieser Ablauf wird so lange wie-

derholt, bis der Solldurchfluß erreicht ist. Das implementierte Programm arbeitet mit dem Spirallinienabstand  $a$  und der Bogenlänge  $b$  als frei definierbaren Parametern.

Für das Laserstrahlschneiden mit gepulsten Lasersystemen wird der Überlappgrad

$$\ddot{U} = 1 - v_s / (b_s f_L) \quad (7),$$

mit  $v_s$  = Schneidgeschwindigkeit und  $b_s$  = Schnittspaltweite definiert. In übertragenem Sinne läßt sich hier für die Vorschubrichtung auf der Spiralbahn

$$\ddot{U}_b = 1 - b / d \doteq 1 - b / d_i \quad (8)$$

schreiben. Für die Zustellrichtung der Bearbeitung, senkrecht zur Spirallinie, wird analog

$$\ddot{U}_a = 1 - a / d \doteq 1 - a / d_i \quad (9)$$

definiert. Beide Überlappgrade können schließlich zu einem Gesamtüberlappgrad

$$\ddot{U}_t = \ddot{U}_a \ddot{U}_b \quad (10)$$

zusammengefaßt werden.

#### 4.5.2.2 Regelstrategie "Fokuslagenverschiebung"

Einen zweiten Ansatz einer Regelstrategie für das geregelte Laserstrahlbohren bietet die sogenannte "Fokuslagenverschiebung". Mit einem ersten Laserstrahl-Einzelpuls oder einem -Pulszug wird ein Ausgangsloch gebohrt. Daraufhin wird die Fokusslage angehoben, und es ergibt sich die jeweilige neue Maschinenkoordinate zu:

$$z_{M\ i+1} = z_{M\ i} + \Delta z_{M\ i}, \text{ mit } i = 0, 1, \dots, n \quad (11).$$

Für die Fokusslage resultiert dementsprechend

$$z_{F\ i+1} = z_{F\ i} + \Delta z_{F\ i} \quad (12).$$

Unter Berücksichtigung der gegenläufigen Orientierung der Maschinenachse  $z_M$  und der Fokuslagenachse  $z_F$  im eingesetzten Aufbau der Positioniereinheit ergibt sich die Beziehung

$$\Delta z_{M i} = - \Delta z_{F i} \quad (13).$$

Für den Betrieb der Anlage bedeutet dies, daß eine Anhebung der Fokuslage  $z_F$  mit einer Reduzierung der Maschinenkoordinate  $z_M$  einhergeht. Des weiteren ist für die eingesetzten Positioniereinheiten herstellerseitig der kleinste Verfahrensweg mit 0,01 mm vorgegeben, woraus die Einschränkung

$$|\Delta z_M| = |\Delta z_F| = n \cdot 0,01 \text{ mm} , n \in \mathbb{N} \quad (14)$$

erwächst.

Mit der beschriebenen Anhebung der Fokuslage streift der Laserstrahl nun den in aller Regel engeren Bereich des Loches auf der Laserstrahlaustrittsseite. Es resultieren vergleichsweise ungünstige Einkoppelverhältnisse für die Laserstrahlung, weil letztere die Lochwandung mit ihren schwächeren Randbereichen unter einem sehr flachen Winkel (Einfallswinkel  $\rightarrow 90^\circ$ ) auf großer Fläche erreicht. Die im folgenden präsentierten Versuche weisen nach, daß erwartungsgemäß ein selektiver und nur geringfügiger Abtrag an besagtem Laserstrahlaustrittsbereich des Loches erfolgt. Der geschilderte Nacharbeitsvorgang wird solange wiederholt, bis der Ist-Durchfluß durch das Loch nach dem n-ten Bearbeitungsschritt den gewünschten und vorab in den Rechner eingegebenen Soll- beziehungsweise Abschaltdurchfluß erreicht:

$$q_n \geq q_{\text{Soll}} \quad (15).$$

Es ergibt sich letztlich eine nicht mehr beeinflussbare Regelabweichung von

$$\Delta q_n = q_n - q_{\text{Soll}} , \Delta q_n \geq 0 \quad (16).$$

Im folgenden werden zwei Varianten dieser Regelstrategie vorgestellt.



Regelstrategie "Konstante Fokuslagenverschiebung"

Bei dieser Vorgehensweise wird die Fokuslage  $z_F$  von Bearbeitungsschritt zu Bearbeitungsschritt um einen vorab festgelegten, konstanten Betrag  $\Delta z_F$  verschoben:

$$\Delta z_{F i} = \Delta z_F = \text{const} \quad (17).$$

Regelstrategie "Adaptive Fokuslagenverschiebung"

Im Gegensatz zur "konstanten Fokuslagenverschiebung" wird hierbei der jeweilige Verschiebungsbetrag für die Fokuslage entsprechend der festgestellten Durchflußabweichung, sozusagen dem Fehlbetrag an Durchfluß durch das Loch, berechnet. Für diese durchflußadaptive Regelstrategie gilt erläuterungsgemäß:

$$\Delta z_{F i} = c \Delta q_i = c (q_{\text{Soll}} - q_i), \text{ mit } c = \text{const} \quad (18).$$

Aus der Versuchspraxis ergibt sich mit dem eingesetzten Hi-Tec-Durchflußsensor, bei dem ein Signal in mV als Durchflußäquivalent gewonnen wird, für den Faktor  $c$  ein brauchbarer Wertebereich von

$$1/2500 \text{ mm/mV} \leq c \leq 1/20000 \text{ mm/mV} \quad (0,00040 \text{ mm/mV} \leq c \leq 0,00005 \text{ mm/mV}) \quad (19).$$

## 5 Eingesetzte Lasieranlage und deren Betriebsverhalten

In diesem Kapitel wird die für die vorliegende Arbeit verwendete Lasieranlage einschließlich ihres Betriebsverhaltens vorgestellt. Letzteres wird aufgrund sowohl von Herstellerangaben als auch eigener Experimente dargestellt.

### 5.1 Laserstrahlquelle

Die Versuche werden mit dem in Tabelle 2 spezifizierten und in Bild 12 gezeigten Laser durchgeführt. Als besondere Merkmale dieses Prototyps sind seine vergleichsweise hohe Laserstrahlpulsenergie  $E_{LP}$ , die durch die Konfiguration mit Laseroszillator und -verstärker ermöglicht wird, das für einen Nd:YAG-Laser relativ kleine Strahlparameterprodukt  $q^*$  sowie die kurzen einstellbaren Pulsdauern  $t$  hervorzuheben.

Tabelle 2: Technische Daten des Nd:YAG-Lasers [Herstellerangaben]

Lasertyp:	gepulster Nd:YAG-Laser
Konfiguration:	2 Laserkavitäten: Oszillator und Verstärker
Pumpleistung (je Kavität)	$P_{Pm} = 3,5 \text{ kW}$
Laserstrahlparameter:	
Wellenlänge	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
transversale Mode	Multimode
Strahlparameterprodukt	$q^* \leq 5,6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
mittlere Leistung	$P_L \leq 140 \text{ W}$
mittlere Pulsleistung	$P_{LPm} \leq 10 \text{ kW}$
Pulsenergie	$E_{LP} \leq 20 \text{ J}$
Pulsdauer	$t = 50 \dots 2000 \mu\text{s}$
Pulsfrequenz	$f \leq 350 \text{ Hz}$

5.1.1 Aufbau und Betriebsweise

Die Laserstrahlquelle besteht im wesentlichen aus dem Laseroszillator und dem Laserverstärker, Bild 13.

Den Resonator des Laseroszillators bilden ein konvexer, hochreflektierender Endspiegel und ein planer, teildurchlässiger Auskoppelspiegel; sie liegen in einem Abstand

von circa 800 mm voneinander. Zwischen diesen Spiegeln ist die Laserkavität platziert, die aus einem mittig angeordneten Nd:YAG-Stab mit einem Durchmesser von  $\frac{1}{4}'' = 6,4 \text{ mm}$  und circa 100 mm Länge, zwei parallel dazu gelegenen Blitzlampen und einem doppelelliptischen, goldbeschichteten Reflektor besteht. Der Laserstab und die Blitzlampen sind wegen der für einen Nd:YAG-Laser typischerweise hohen Wärmeverluste wassergekühlt.

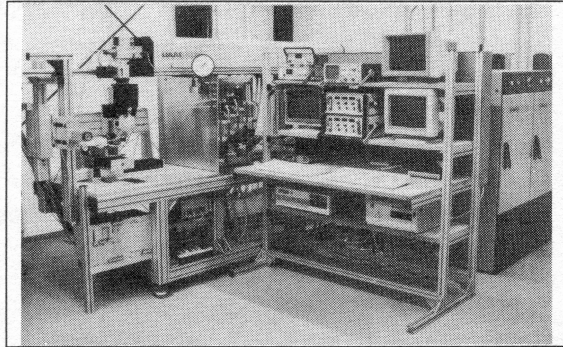


Bild 12: Eingesetzte Laserstrahlbohranlage mit gepulstem Nd:YAG-Laser

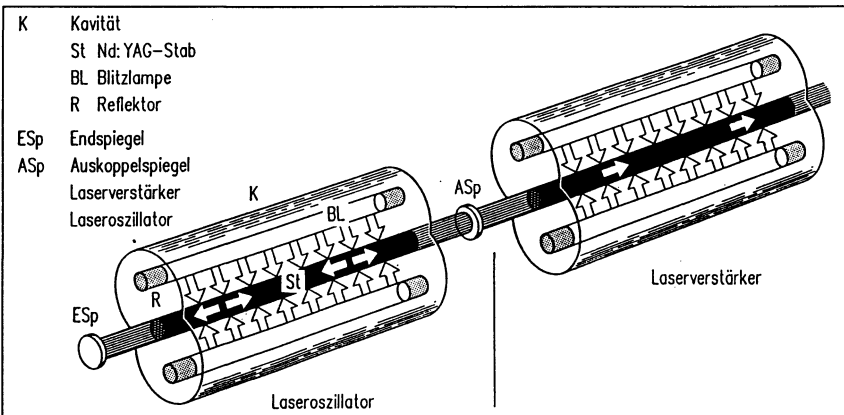


Bild 13: Aufbau der Laserstrahlquelle

In Laserstrahlausbreitungsrichtung folgt auf den beschriebenen Laseroszillator der Laserverstärker, welcher von einer zweiten Kavität wie die beschriebene verkörpert wird. Im weiteren Strahlengang sind dann zwei Verschlüsse angeordnet: zum einen der Sicherheitsverschluß mit reinen Noteigenschaften, zum anderen der schnelle sogenannte Arbeits-Shutter.

Jede der Laserkavitäten wird von einem eigenen Netzteil versorgt. Für die Netzteile lassen sich die Betriebsparameter entweder manuell an den jeweiligen Bedientafeln oder über die eigenentwickelte, in Anhang A.1 näher beschriebene Rechnersteuerung für die gesamte Laseranlage anwählen. Diese Parameter sind die Pulsdauer mit dem Bereich  $50 \mu\text{s} \leq t \leq 2000 \mu\text{s}$ , die Ladespannung mit  $350 \text{ V} \leq U \leq 700 \text{ V}$  und die Pulsfrequenz mit  $f \leq 350 \text{ Hz}$ . Der Laser kann dabei entweder ohne oder auch mit Laserverstärker betrieben werden. Im letztgenannten Fall werden die Blitzlampen beider Kavitäten prinzipiell gleichzeitig gepulst. Besonders bei kurzen Pulsdauern ( $t \rightarrow 50 \mu\text{s}$ ) macht sich der unvermeidliche und schlecht wiederholbare "Jitter" von  $\pm 5 \mu\text{s}$  zwischen den Ansteuerungen beider Kavitäten bemerkbar, so daß wegen der wechselnden zeitlichen Verschiebung zwischen den Blitzlampenpulsen in beiden Kavitäten starke Schwankungen bezüglich Laserstrahlpulsform und -energie von Puls zu Puls auftreten können.

### 5.1.2 Betriebsverhalten

Das Betriebsverhalten eines Festkörperlaser wird in starkem Maße von der eingestellten Pumpleistung beeinflusst [64]. Davon betroffen sind nicht nur die Laserstrahlleistung und der damit zusammenhängende Wirkungsgrad des Lasers, sondern auch der Strahltaillendurchmesser  $d_{L0}$ , die Strahldivergenz  $\Theta$  und die Lage der Strahltaille  $z_{L0}$ . Die Pumpleistung wirkt sich unmittelbar über die Anregung von  $\text{Nd}^{+3}$ -Ionen im Laserkristall aus. Sie beeinflusst aber auch durch die Wärmeabstrahlung der Blitzlampen die thermische Linse im Laserkristall, die wiederum in komplexer Weise Einfluß auf die Strahlbildung im Laserresonator und damit auf die genannten Strahlkenngrößen nimmt.

Anschaulich wird das Betriebsverhalten bezüglich des (örtlichen) Laserstrahlverlaufs anhand von Bild 14. Am linken Rand der Abbildung ist sinnbildlich der Endspiegel des Laserresonators dargestellt, auf den entlang der gedachten Laserstrahlachse von links nach rechts der Nd:YAG-Stab des Laseroszillators, dann der Auskoppelspiegel des

Laserresonators und zuletzt der Nd:YAG-Stab des Laserverstärkers folgen. Die Abbildung wird am rechten Ende mit dem Ausgang der Strahlquelle abgeschlossen. Wird zunächst die Strahlausbildung im Laseroszillator betrachtet, läßt sich feststellen, daß sich am Auskoppelspiegel ein in etwa paralleles Strahlenbündel 1 ausbildet. Dies trifft in erster Näherung für beliebige Pumpleistungseinstellungen zu. Bleibt der Laserverstärker ausgeschaltet, so breitet sich Strahl 1 quasi unverändert in Richtung des Strahlquellen-

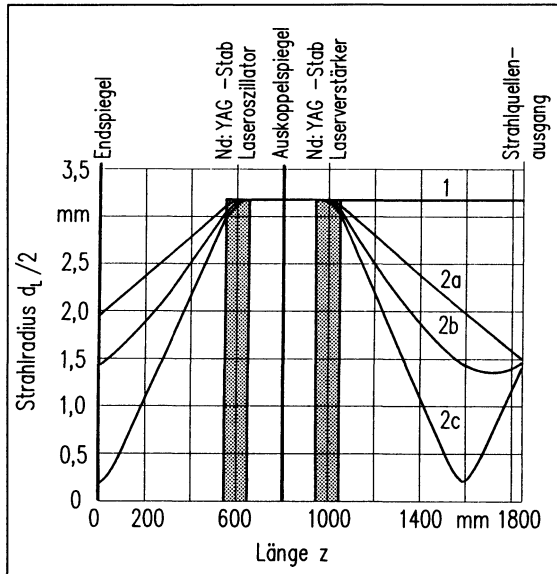


Bild 14: Örtlicher Laserstrahlverlauf bei unterschiedlichen Pumpleistungen [Herstellerangaben]

lenausgangs aus. Wird hingegen der Laserverstärker zugeschaltet, so ergeben sich wegen der dort wirksam werdenden thermischen Linse mit steigender Pumpleistung die Strahlverläufe von 2a über 2b bis 2c. Strahlverlauf 2a entspricht in etwa einer Pumpleistung von  $P_{Pm} = 1,4 \text{ kW}$ , 2b  $P_{Pm} = 2,5 \text{ kW}$  und 2c der maximalen Pumpleistung  $\max P_{Pm} = 3,5 \text{ kW}$ . Am Ausgang der Strahlquelle besitzt der Laserstrahl bei Betrieb mit Laserverstärker einen von der Pumpleistung nahezu unabhängigen Durchmesser von  $d_L = 3,0 \text{ mm}$ .

Die Lage der Strahlteile  $z_{L0}$  verändert sich hingegen stark: Während sie bei Strahlverlauf 2a weit außerhalb der Strahlquelle liegt, befindet sie sich im Falle 2c innerhalb derselben. Dieses Verhalten ist in Abhängigkeit von der Pumpleistung in Bild 15 dokumentiert. Die Längenkoordinate  $z_{L0}$  hat ihren Ursprung in diesem Falle am Ausgang der Laserstrahlquelle und weist mit ihrer positiven Richtung in Strahlausbreitungsrichtung.

Die Strahlagestabilität [2] genügt in der eingesetzten Laseranlage nur mäßigen

Anforderungen. Bild 16, das einer zweistufigen Bohrbearbeitung nach Tabelle 8, Matrixfeld C1 entspricht, steht exemplarisch für einen Extremfall voneinander abweichender Mittelachsen der beiden Abschnitte eines Lochs. Als wirksame Abhilfemaßnahme kann hier die Verringerung des Abstands Laseroszillator - Bearbeitungsstelle, der bei der gegebenen Konfiguration circa 2 m ausmacht, vorgeschlagen werden. Durch Verzicht auf den für

die hier angestrebten Bearbeitungen in der Regel nicht erforderlichen Laserverstärker sowie einen kompakteren Aufbau der Laserstrahlführung bis zur Bearbeitungsstelle ließe sich besagter Abstand ohne weiteres halbieren.

Der Laser kann wahlweise ohne beziehungsweise mit Laserverstärker betrieben werden. Bild 17 zeigt, daß sich bei Einstellung eines vergleichbaren zeitlichen Pulsverlaufs (Laserstrahlpulsenergie  $E_{LP}$ , -dauer  $\tau$ ) zum einen ohne, zum anderen mit Laserverstärker unterschiedliche Strahlverläufe ergeben, die sich auf die an einem Werkstück erzielten Lochdurchmesser auswirken. Dies wird insbesondere bei Betrachtung der Kurvenverläufe mit den hellen Punkten, die für die Lochdurchmesser auf der Laserstrahleintrittsseite des Werkstücks stehen, deutlich. Mit Variation der Maschinenkoordinate  $z_M$ , was einer Verschiebung der Strahlfokusslage  $z_F$  entspricht, verändert sich der Lochdurch-

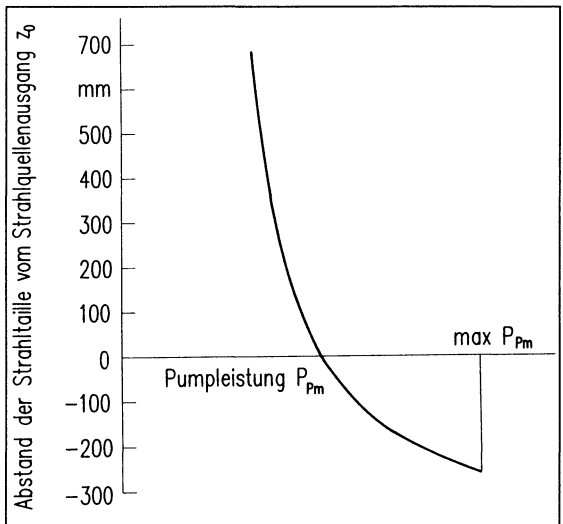


Bild 15: Lage der Strahlteile in Abhängigkeit von der Pumpleistung [Herstellerangaben]

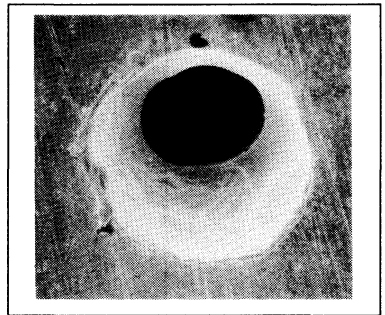


Bild 16: Beispiel für Strahlageinstabilität bei einer Bohrbearbeitung nach Tabelle 8, Matrixfeld C1

messer bei Betrieb mit Laserverstärker langsamer als ohne Laserverstärker. Die Begründung liegt im bereits ausgeführten Sachverhalt, daß sich beim Zuschalten des Laserverstärkers hier eine thermische Linse ausbildet, die den aus dem Laser austretenden Strahl im Durchmesser verkleinert. Somit resultiert auf der Fokussierlinse ein kleinerer Strahldurchmesser  $d_{L \text{ lens}}$ , und die weitere Strahlausbreitung nach der Fokussierlinse ist gemäß Gleichung (5) mit einem kleineren Fokussierwinkel  $\Theta_F$  behaftet, was den flacheren Verlauf der Kurve im Bild erklärt.

Das Strahlparameterprodukt  $q^*$ , Maß für die Strahlqualität, ist im wesentlichen abhängig von den Betriebsbedingungen im Laseroszillator, das heißt von den Gegebenheiten bei der Laserstrahlentstehung. Bild 18 zeigt oben die Abhängigkeit des Strahlparameterprodukts von der Pumpleistung  $P_{Pm}$  im Laseroszillator. Der Kurvenverlauf ist durch eine ausgeprägtes Maximum gekennzeichnet, dessen Wert mit  $\max q^* = 5,6 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  angegeben ist. Im Vergleich zu vielen kommerziellen Festkörperlasern, bei denen die  $q^*$ -Kurve über den gesamten Bereich der Pumpleistung einen nahezu konstanten Wert aufweist, reagiert dieser Laser sehr sensitiv auf eine Veränderung

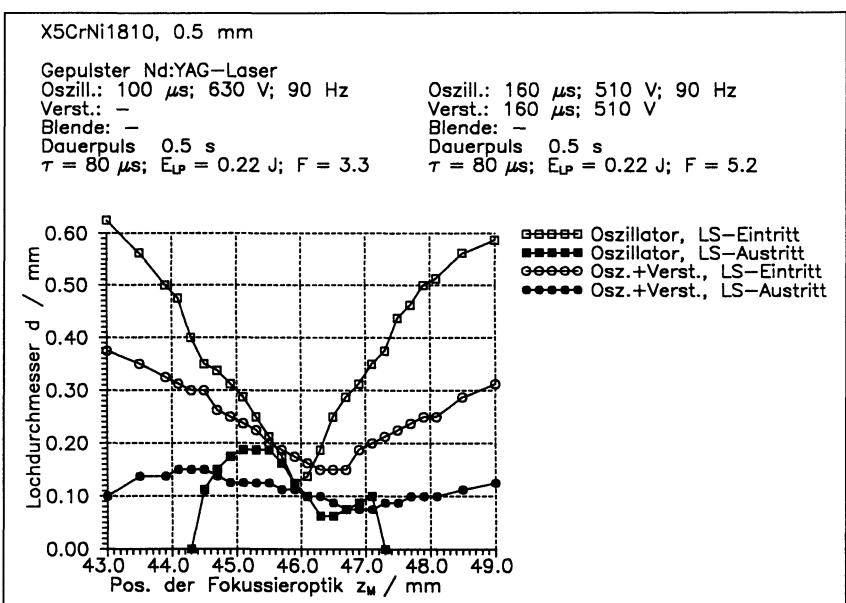


Bild 17: Lochdurchmesser bei Betrieb ohne beziehungsweise mit Laserverstärker

der Pumpleistung. Der Laserverstärker hat dagegen in erster Näherung keinen Einfluß auf das Strahlparameterprodukt; er verhält sich lediglich entsprechend seiner thermischen Linsenwirkung wie eine "konventionelle" Sammellinse im Strahlengang [64].

In der Praxis zeigt sich jedoch, daß sich die Leistungsverteilung über den Laserstrahlquerschnitt bei Betrieb mit Verstärker verschlechtert. Dies liegt darin begründet, daß eine inhomogene Ausleuchtung des Laserstabes zu unterschiedlicher Verstärkung einzelner Strahlmoden und die inhomogene Erwärmung zu einem ungleichmäßigen Brechkraftverlauf über Laserstablänge und -querschnitt führen [64].

Unter Einsatz des in Anhang A.2 vorgestellten Laserstrahl diagnosesystems mit einer CCD-Kamera ist es möglich, auch die örtliche Verteilung der Laserstrahlpulsenenergie über den Strahlquerschnitt zu ermitteln. Bild 19 zeigt solche Verteilungen in Grauwertdarstellung. Dabei wird für die einzelnen Bilderreihen jeweils ein Lasereinstellparameter variiert und der Laser damit schrittweise näher an seine Leistungsgrenze gebracht, was zu den Energieverteilungen von links nach rechts im Bild führt. Die Leistungsgrenze ist jeweils gegeben, wenn die Versorgungsgeräte die vorgegebene Kondensatorladespannung  $U$  bei den eingestellten Werten für die Pulsdauer  $t$  und die Puls-

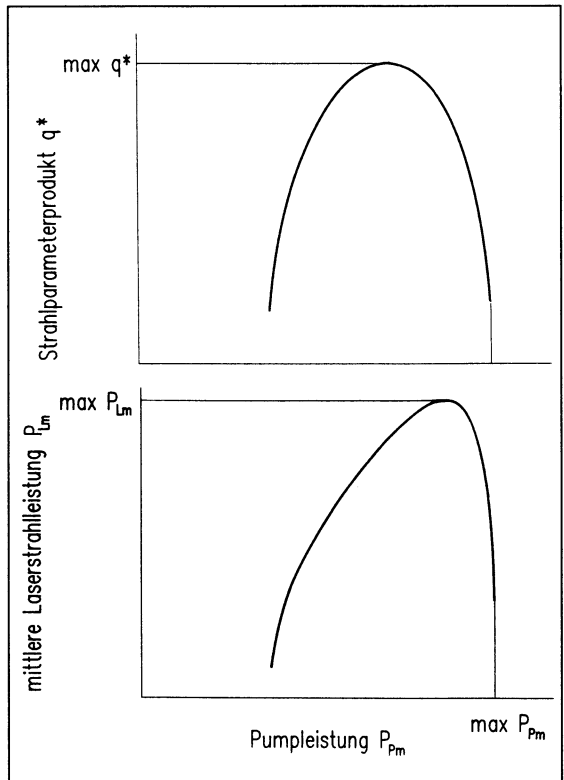


Bild 18: Laserstrahlparameterprodukt und mittlere Laserstrahlleistung in Abhängigkeit von der Pumpleistung [Herstellerangaben]



frequenz  $f$  nicht mehr aufrechterhalten können. Es zeigt sich an den Aufnahmen, daß der Laser in der Nähe der jeweiligen Leistungsgrenze den günstigsten Betriebszustand mit der besten Leistungsverteilung über den Laserstrahlquerschnitt erreicht.

Die zunehmende Wiederholbarkeit der Laserstrahlpulse im oberen Leistungsbereich, das heißt bei höherer Pumpleistung, erklärt sich dadurch, daß der Laser weiter entfernt von der Laseraktivitätsschwelle arbeitet. Abweichungen in der Pumpleistung von Puls zu Puls, aber auch innerhalb eines Pulses wirken sich also nicht so aus, daß die Laseraktivitätsschwelle stochastisch einmal über-, dann wieder unterschritten wird; sie wird vielmehr immer deutlich überschritten. Mit der höheren Pumpleistung ergibt sich ferner für den gegebenen Laserresonator, daß die thermische Linse den konstruktiv vorgesehenen Sollbereich erreicht und damit nach den Diagrammen in Bild 18 ohnehin das günstigste Laserverhalten zu erwarten ist.

Das angesprochene Schwellverhalten des Lasers wird auch deutlich bei einem Vergleich des Strahlbildes unter Verwendung unterschiedlich verschlissener Blitzlampen in den Laserkavitäten, Bild 20. Im Falle stark gealterter Lampen verschlechtert

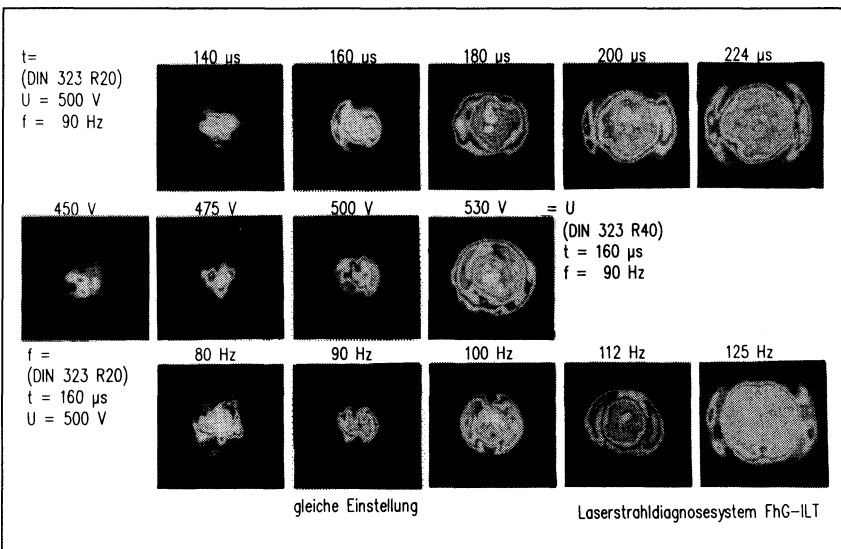


Bild 19: Örtliche Verteilung der Laserstrahlpulseenergie in Abhängigkeit von den Lasereinstellparametern

sich bei sonst unveränderten Betriebsparametern nicht nur der Betrag der Laserstrahlleistung, sondern auch qualitativ deren Verteilung über den Strahlquerschnitt. Letzteres geschieht umso stärker, je unterschiedlicher der Verschleißprozeß der zwei Blitzlampen einer Kavität ausgefallen ist.

Die mittlere Laserstrahlleistung verhält sich erwartungsgemäß auch stark anfällig gegenüber der Pumpleistung, Bild 18 unten. Erst bei einer relativ hohen Pumpleistung beginnt der Laser, Strahlung abzugeben. Ist diese Schwelle überschritten, erfolgt ein steiler Anstieg der Laserstrahlleistung mit der Pumpleistung. Bei etwa 90 % der maximalen Pumpleistung,  $0,9 (\max P_{Pm})$ , wird die maximale Laserstrahlleistung  $\max P_{Lm}$  erreicht; ein weiteres Ansteigen der Pumpleistung führt dann aber zu einem rapiden Abfall der Laserstrahlleistung. Der Laser sollte demzufolge nur innerhalb eines schmalen, hoch angesiedelten Pumpleistungsbereichs betrieben werden.

Werden in Bild 18 die Kurvenverläufe für die mittlere Laserstrahlleistung  $P_{Lm}$  und das Strahlparameterprodukt  $q^*$  in Relation zueinander gesetzt, so wird ersichtlich, daß die maximale mittlere Laserstrahlleistung  $\max P_{Lm}$  günstigerweise bei einem vergleichsweise geringen Wert für das Strahlparameterprodukt erreicht wird.

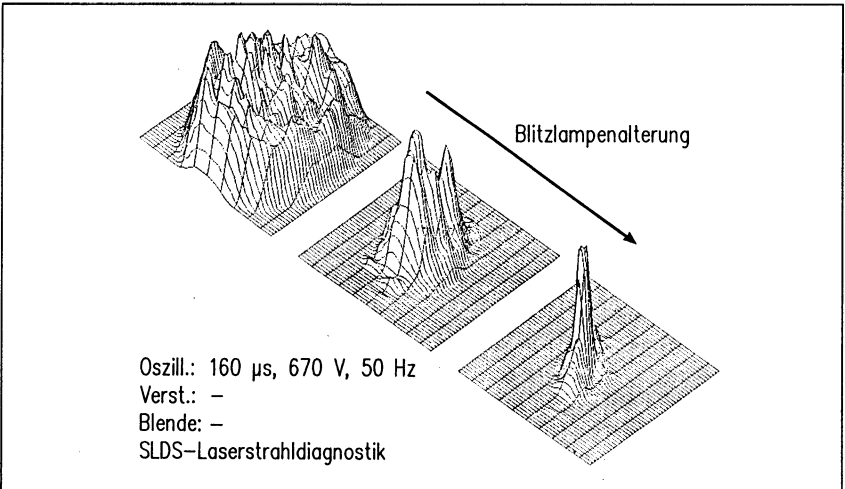


Bild 20: Einfluß der Blitzlampenalterung auf die Energieverteilung über den Laserstrahlquerschnitt

Die starke Abhängigkeit der Laserstrahlleistung von der Pumpleistung, Bild 18 unten, findet sich auch in den Kurven für die Laserstrahlleistung über der Pulsfrequenz, Bild 21, wieder. Unter festen Lasereinstellparametern Pulsdauer  $t$  und Ladespannung  $U$  wird hier über die Pulsfrequenz  $f$  die Pumpleistung  $P_{Pm}$  variiert. Das Schwellverhalten für das Auftreten von Laserstrahlung ist besonders an den Kurven bei kleinen Ladespannungen (400 und 500 V) zu erkennen. Die abfallenden Kurvenflanken, in denen alle Kurvenverläufe nach ihrem jeweiligen Maximum enden, korrespondieren mit den gleichen in Bild 18 unten.

Bild 22 zeigt oben ein ausgewähltes Beispiel, wie sich der zeitliche Laserstrahlpulsverlauf in Abhängigkeit von den Lasereinstellparametern verändert. Für das Bild werden die Laserstrahlpulsformen mit dem in Anhang A.2 beschriebenen Meßaufbau mit der Photodiode und einem schnellen Digitaloszilloskop aufgenommen.

Unten im Bild sind das Verhalten der Pulsdauer  $\tau$ , nach der einschlägigen DIN-Norm [2] am Laserstrahl gemessen und auf die eingestellte

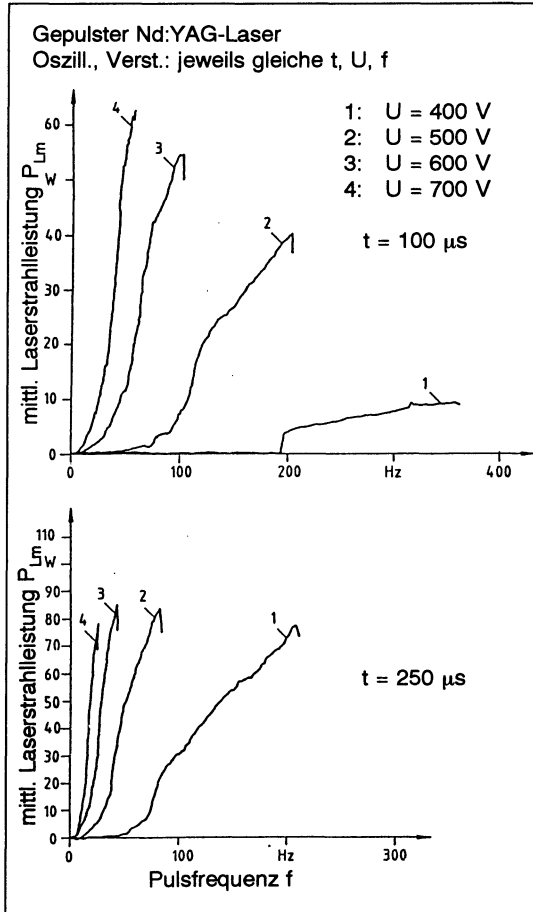


Bild 21: Mittlere Laserstrahlleistung in Abhängigkeit von der Pulsfrequenz [Herstellerangaben]

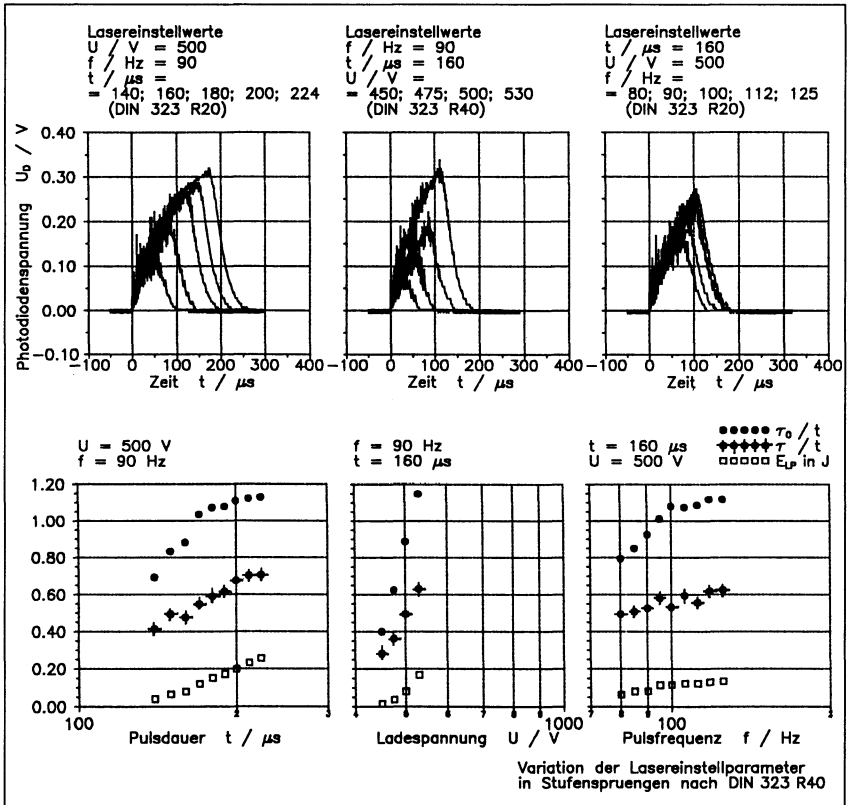


Bild 22: Zeitlicher Laserstrahlpulsverlauf in Abhängigkeit von den Lasereinstellwerten

Pulsdauer  $t$  normiert, sowie die Laserstrahlpulsenergie  $E_{LP}$  festgehalten. Zwecks besserer Vergleichbarkeit werden die drei Einstellgrößen  $t$ ,  $U$  und  $f$  jeweils in gleichen Stufensprünge nach R40 [136] variiert. Ein Vergleich der drei Graphen macht deutlich, daß eine Veränderung der Ladespannung den stärksten Einfluß auf den zeitlichen Laserstrahlpulsverlauf ausübt.

Die Polarisation des Laserstrahls läßt sich mit einem Strahlanalysator untersuchen. Dieses Bauteil besteht im vorliegenden Fall im wesentlichen aus zwei unter dem Brewster-Winkel zur Laserstrahlachse angeordneten optischen Planplatten (vgl. [64]) und muß zur Ermittlung der Polarisationsrichtung um die Laserstrahlachse gedreht werden. Die dabei durch den Analysator durchtretende Laserstrahlpulsenergie bezie-

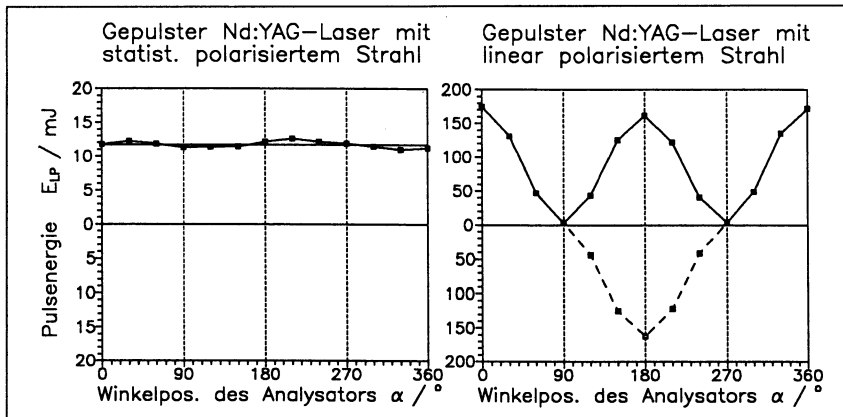


Bild 23: Laserstrahlpulsenergie in Abhängigkeit von der Winkellage des Strahlanalysators

hungsweise -leistung wird mit einem geeigneten Meßgerät (vgl. Anhang A.2) aufgenommen. Für den eingesetzten Laser ergibt sich gemäß Bild 23 links keine nennenswerte Veränderung der Laserstrahlpulsenergie  $E_{LP}$  in Abhängigkeit von der Winkellage  $\alpha$  des Analysators. Dies bedeutet, daß der Laserstrahl statistisch polarisiert ist.

Das letztgenannte Bild zeigt rechts das Ergebnis einer Vergleichsmessung an einer Laseranlage mit linear polarisiertem Strahl. Dies wird durch einen Polarisator im Laseroszillator [64] bewerkstelligt. Wird der erwähnte Analysator in diesen Laserstrahl gehalten, ergibt sich die mit der gestrichelten Kurve angedeutete, annähernd sinusförmige Abhängigkeit der Laserstrahlpulsenergie  $E_{LP}$  von der Winkelposition  $\alpha$ . Damit wird die Eignung des eingesetzten Analysators zur Ermittlung des Polarisationszustands eines Laserstrahls nachgewiesen.

Aus dem Dargelegten läßt sich folgern, daß die Strahleigenschaften des eingesetzten Laseraggregats bei Betrieb nur des Oszillators am durchschaubarsten sind. Nach Möglichkeit sollte auf einen Betrieb mit Laserverstärker, insbesondere unter ständig veränderten Einstellparametern, verzichtet werden. Der Laser sollte außerdem nahe seiner Leistungsgrenze betrieben werden, da er dabei eine hohe Laserstrahlleistung bei guter Strahlqualität erbringt.

## 5.2 Laserstrahlquelle mit Modenblende

In einigen Bohranwendungen zeigt sich, daß eine weitere Verbesserung der (ohnehin guten) Strahlqualität des Lasers wünschenswert ist. Dies entspricht einer Reduzierung des Strahlparameterprodukts  $q^*$  und trifft insbesondere dann zu, wenn der Laseranwender bestrebt ist, besonders kleine Löcher zu bohren. In diesem Sinne wurde der Laserresonator mit eigenentwickelten, wechselbaren Modenblenden nachgerüstet.

Der Aufbau der Modenblendenhalterung ist in Bild 24 schematisch dargestellt. Für ein einwandfreies Funktionieren des Resonators nach dem Einbau einer Modenblende, das heißt zur Optimierung der Leistungsverteilung über den Laserstrahlquerschnitt und zur Maximierung der Laserstrahlleistung, muß für die auswechselbaren Moden-

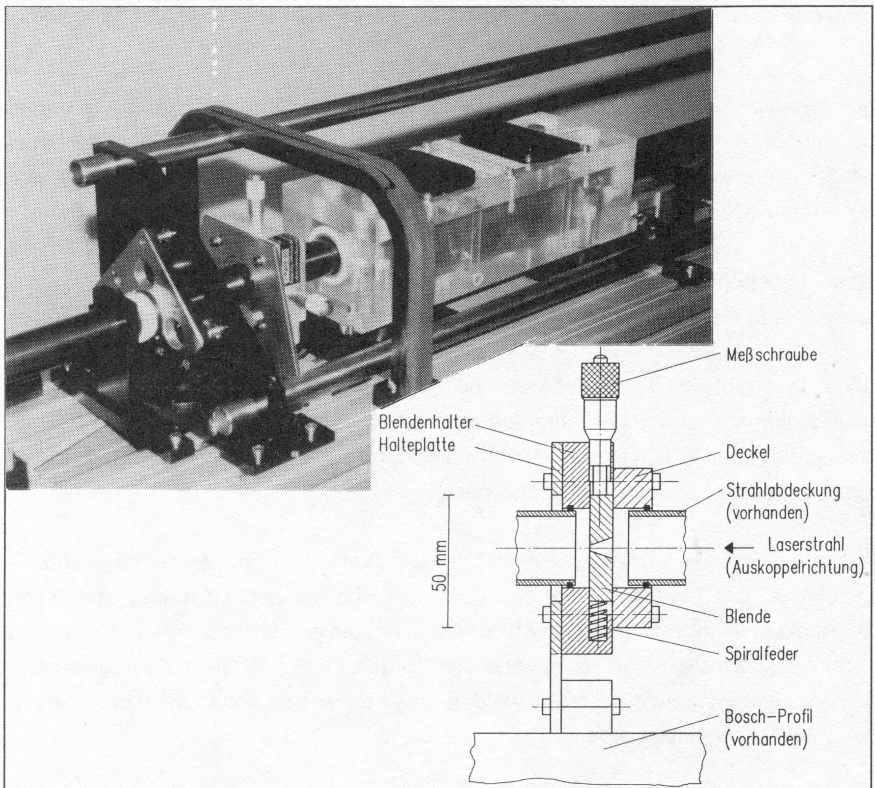


Bild 24: Modenblende mit Haltevorrichtung

blenden eine Justiermöglichkeit in der zum Laserstrahl rechtwinkligen Ebene vorgesehen werden. Diesem Zweck dient die im Bild dargestellte Meßschraube, die gegen eine Spiralfeder arbeitet. Eine zweite, rechtwinklig zu der ersten angebrachte Meßschraube übernimmt die Verstellung in die verbleibende Richtung quer zum Laserstrahl. Die Modenblendenhalterung ist in etwa mittig zwischen dem Ausgang der Laseroszillatorkavität und dem Auskoppelspiegel angeordnet.

Die eigentlichen Modenblenden sind mit konischen Bohrungen mit einem Kegelspitzenwinkel von circa  $40^\circ$  versehen. Dieser Konus hat die Aufgabe, Rückreflexe von Laserstrahlung in den Laseroszillator zu vermeiden. Die Blenden bestehen aus Kupfer, da dieses Metall wegen seines hohen Reflexionskoeffizienten und der guten Wärmeleitfähigkeit eine zusätzliche Zwangskühlung der Blenden überflüssig macht. Es wurden Blenden mit einem Lochdurchmesser  $d_{Ap} = 1,9; 2,5; 3,4; 4,4$  und  $5,1$  mm angefertigt. Mit ihnen und dem Laserstabdurchmesser ergibt sich eine geometrisch nach R10 [136] gestufte Aperturenreihe zwischen 1,9 und 6,4 mm Durchmesser.

Bild 25 zeigt, wie sich die Meßschraubenpositionen  $x_{Ap}$  und  $y_{Ap}$  auf die erzeugte Laserstrahlleistung  $P_{Lm}$  auswirken. Eine optimale Justage ist erreicht, wenn für beide Richtungen das Maximum an Laserstrahlleistung aus dem Laseroszillator gewonnen

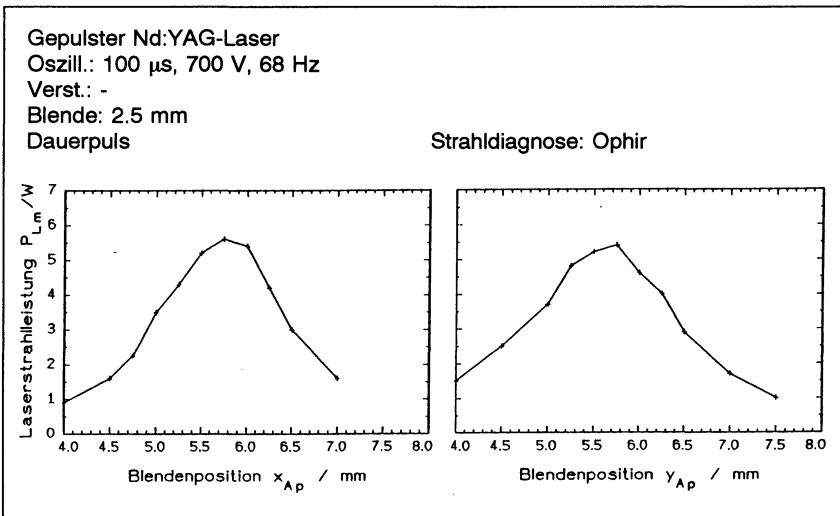


Bild 25: Laserstrahlleistung in Abhängigkeit von der Modenblendenlage

wird.

Bei Einsatz von Modenblenden mit verschiedenen Durchmessern  $d_{Ap}$  erhält man in der jeweils optimalen Lage  $(x_{Ap}, y_{Ap})$  Energieverteilungen über den Laserstrahlquerschnitt gemäß Bild 26. Es zeigt sich, daß der Durchmesser des Laserstrahls monoton mit dem Blendendurchmesser abfällt. Zum anderen wirkt sich eine Verkleinerung des Blendendurchmessers aber auch qualitativ auf die Verteilung der Energie aus: Während sich bei Verzicht auf eine Blende ein stark unebenes Strahlprofil einstellt, wird dieses mit Abnahme des Blendendurchmessers homogener und der glatte Anteil der Flanke des Strahlprofils gewinnt relativ an Bedeutung. Im Falle des kleinsten Blendendurchmessers von 1,9 mm stellt sich dann das charakteristische Strahlprofil eines Grundmodes ein. Des weiteren ist bemerkenswert, daß die Leistungsdichte, das heißt bildlich gesehen die Höhe der dreidimensionalen Profile im Bild, bei Abnahme des Blendendurchmessers ansteigt. Dieser Anstieg ist stetig bei Aperturdurchmessern von 6,4 bis 2,5 mm; bei Aperturdurchmesser 1,9 mm sinkt die Höhe jedoch wieder. Diese Erscheinung läßt sich dadurch erklären, daß die gespeicherte Energie der im Laser-

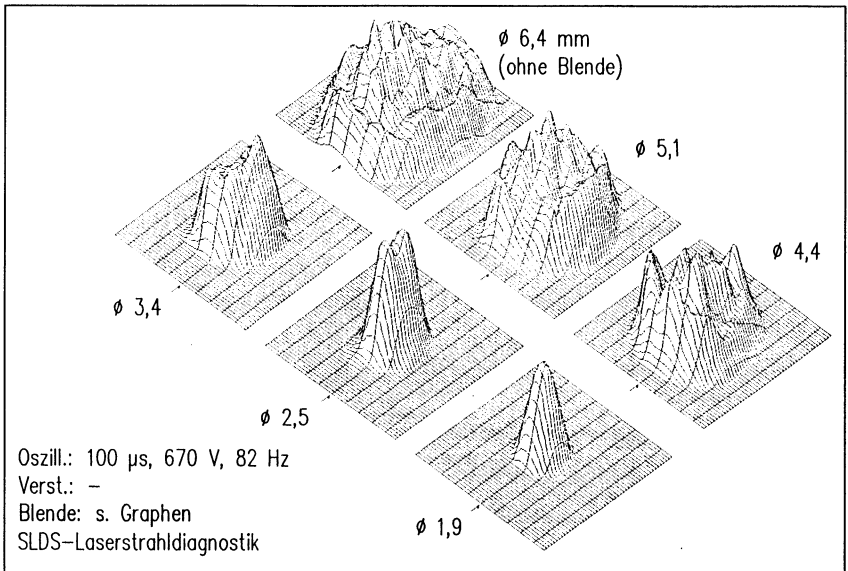


Bild 26: Einfluß des Modenblendendurchmessers auf die Energieverteilung über den Laserstrahlquerschnitt



kristall angeregten  $\text{Nd}^{+3}$ -Ionen bei einer Abnahme des Blendendurchmessers von einer geringeren Anzahl Schwingungsmoden abgeräumt wird. Die Blende mit dem Durchmesser 1,9 mm ist jedoch so klein, daß sie den bereits reinen Grundmodestrahls in seinem Durchmesser und somit auch in seiner Pulsenergie drosselt. In Tabelle 3 sind für das Beispiel in Bild 26 zunächst die Einstelldaten  $t$ ,  $U$ ,  $f$  und  $d_{Ap}$  für den Laseroszillator, des weiteren die gemessenen Werte für  $\tau$ ,  $E_{LP}$  und  $d_{L90}$  sowie die berechneten Werte für die mittlere Pulsleistung  $P_{LPm}$  und eine über den Laserstrahlquerschnitt gemittelte Leistungsdichte  $I_{LP}$  zusammengetragen. Die aufgeführten Werte bestätigen die qualitativen Beobachtungen aus dem angesprochenen Bild.

Tabelle 3: Parameter zu Bild 26, Variation des Modenblendendurchmessers  $d_{Ap}$

$t$ $\mu\text{s}$	$U$ $\text{V}$	$f$ $\text{Hz}$	$d_{Ap}$ $\text{mm}$	$\tau$ $\mu\text{s}$	$E_{LP}$ $\text{J}$	$d_{L90}$ $\text{mm}$	$P_{LPm}$ $\text{kW}$	$I_{LP}$ $\text{W/mm}^2$
100	670	82	6,4	88	0,43	9,5	4,9	69
"	"	"	5,1	"	0,28	7,1	3,2	80
"	"	"	4,4	"	0,25	6,7	2,8	80
"	"	"	3,4	"	0,19	4,9	2,2	115
"	"	"	2,5	"	0,12	3,7	1,4	127
"	"	"	1,9	"	0,05	2,9	0,6	86

Für eine zweite gängige Kombination von Lasereinstellparametern finden sich in Bild 27 sowohl der Laserstrahldurchmesser  $d_L$  als auch die -leistung  $P_{Lm}$  über dem Blendendurchmesser  $d_{Ap}$  aufgetragen. Die Aussagen aus den vorangegangenen Absätzen werden bestätigt.

Der Modenblendendurchmesser beeinflusst nicht nur, wie gezeigt, den Strahldurchmesser, sondern auch die Strahldivergenz und die -modenordnung. Dies hat zur Folge, daß sich die Strahlqualität, ausgedrückt in Form des Strahlparameterprodukts  $q^*$ , in etwa invers proportional zum Quadrat des Modenblendendurchmessers verhalten muß. Der Fokusedurchmesser  $d_{LF}$  reduziert sich demzufolge bei Einsatz einer Modenblende erheblich.

Analog Bild 21 zeigt Bild 28 oben, daß die Pumpleistung  $P_{Pm}$  bei sonst unveränderten Lasereinstellparametern erwartungsgemäß linear mit der Pulsfrequenz  $f$  steigt. Die

Diagramme darunter stehen für den Laserstrahldurchmesser  $d_L$  und die -leistung  $P_{Lm}$  in Abhängigkeit von derselben Frequenz. Wird in diesen Diagrammen die Pulsfrequenz durch die entsprechende Pumpleistung ersetzt, so entstehen die beiden Diagramme rechts im Bild. Sie zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung mit Bild 18. Zur Herstellung des Vergleichs sei bezüglich der letztgenannten Bilder daran erinnert, daß  $\max P_{Pm} = 3,5 \text{ kW}$  und somit  $P_{Pm} = 1,8 \text{ kW}$  in Bild 28 in etwa  $\frac{1}{2} \max P_{Pm}$  entspricht. Es bestätigt sich also im praktischen Betrieb, daß der Laser eine starke Abhängigkeit zwischen seinem Betriebszustand, gemessen an den Strahlenkenngrößen, und den gewählten Einstellparametern zeitigt. Des weiteren ist bemerkenswert, daß bei den für Bohroperationen typischen Pulsdauern  $t$  im Bereich von etwa  $100 \mu\text{s}$  die oben angegebene Pumpleistung  $\max P_{Pm}$  bei weitem nicht erreicht werden kann, der tatsächliche Maximalwert dagegen bei circa  $P_{Pm} = 2 \text{ kW}$  liegt.

Gepulster Nd:YAG-Laser  
 Oszill.:  $100 \mu\text{s}$ ,  $700 \text{ V}$ ,  $68 \text{ Hz}$   
 Verst.: -  
 Blende: s. Abszissen  
 Dauerpuls  
 Strahlidiagnose: SLDS, Ophir

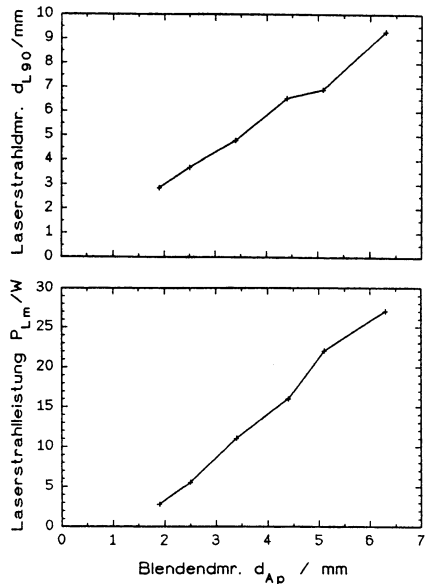


Bild 27: Laserstrahldurchmesser und -leistung in Abhängigkeit vom Modenblendendurchmesser

Die durch eine Modenblende verursachten Veränderungen können nicht ohne Auswirkung auf die Ergebnisse einer Bohrbearbeitung bleiben:

Bild 29 zeigt, wie sich die Lochdurchmesser, gemessen an beiden Werkstückoberflächen, mit Abnahme des Blendendurchmessers ausbilden. Im Falle des Graphen links, das heißt ohne Modenblende und somit unter Nutzung der vollen Apertur des Nd:YAG-Stabes von  $d_{Ap} = 6,4 \text{ mm}$ , wird mit den gewählten Lasereinstellparametern ein minimaler Lochdurchmesser von circa  $\min d_l = 90 \mu\text{m}$  erreicht. Dieser reduziert

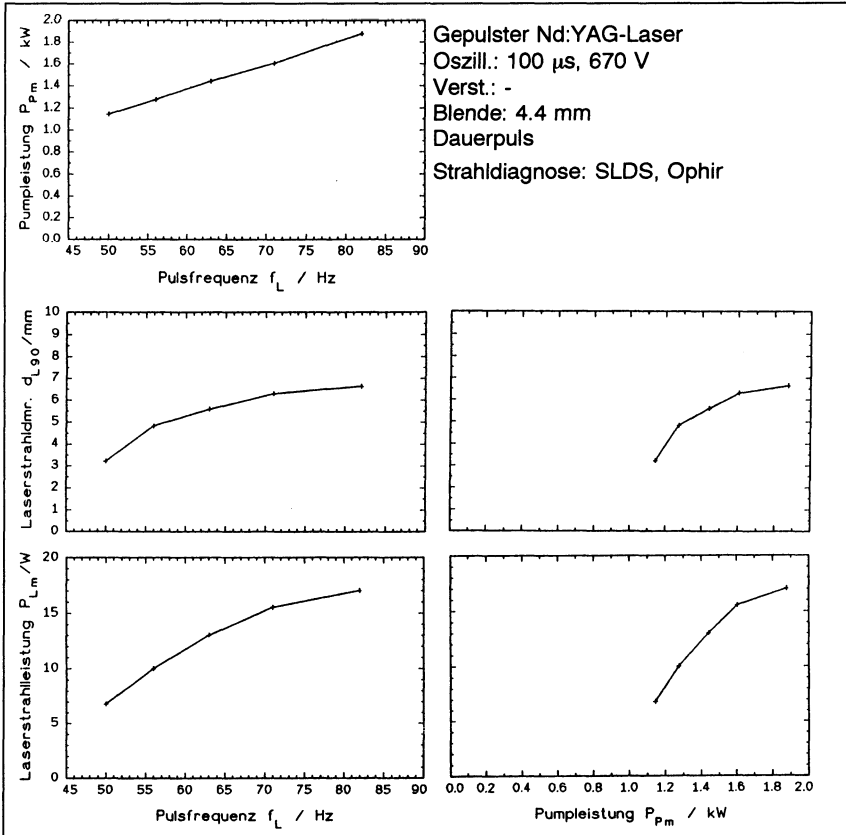


Bild 28: Laserstrahldurchmesser und -leistung in Abhängigkeit von Pulsfrequenz beziehungsweise Pumpleistung

sich mit einer Blende mit 4,4 mm Durchmesser auf 60  $\mu$ m, um bei Einsatz der Blende mit 2,5 mm nur noch 40  $\mu$ m zu erreichen. Es ergibt sich damit für alle Blendendurchmesser ein in etwa konstanter Quotient Lochdurchmesser/Blendendurchmesser von 15  $\mu$ m/mm. Dieser Wert gilt für die dem Bild zugrundeliegenden Lasereinstellungen.

Mit abnehmendem Modenblendendurchmesser reduziert sich in erster Näherung in gleichem Maße der Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse, was wiederum zu kleineren Fokussierwinkeln  $\Theta_F$  führt. Die Strahldivergenz  $\Theta$  wird ebenfalls verkleinert, was dem Fokusbereich  $d_{LF}$  in vollem Umfang zugutekommt. Wird ferner noch

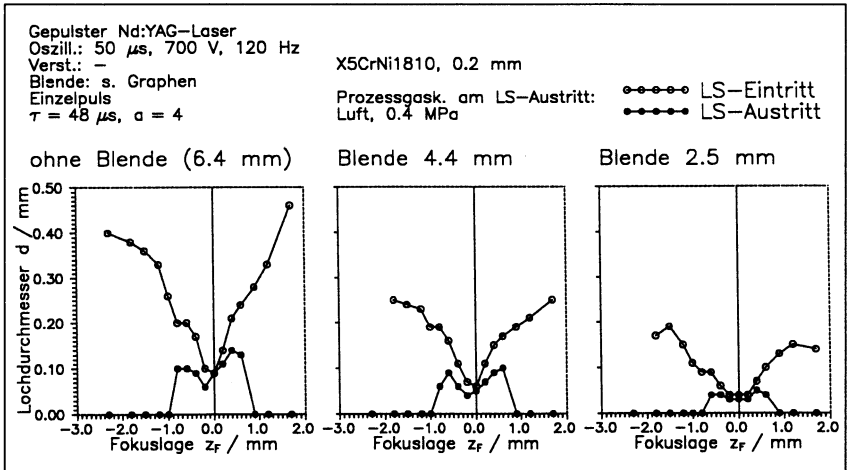


Bild 29: Lochdurchmesser in Abhängigkeit vom Modenblendendurchmesser

der Faktor für die Modenordnung ( $m + 1$ ) berücksichtigt, der mit kleinerer Modenblende ebenfalls abnimmt, so ergibt sich eine weitere Reduzierung des Fokusbereichs.

Des Weiteren ist bemerkenswert, daß die Schärfentiefe im Bereich des Strahlfokus trotz der unterschiedlichen Modenblendendurchmesser in etwa unverändert bleibt.

Tabelle 4: Bearbeitungsparameter zu Bild 29, Variation des Modenblendendurchmessers  $d_{Ap}$ 

t	U	f	$d_{Ap}$	$\tau$	$E_{LP}$	min $d_i$	$P_{LPm}$	$I_{LPi}$
$\mu\text{s}$	V	Hz	mm	$\mu\text{s}$	J	mm	kW	$\text{MW}/\text{mm}^2$
50	700	120	6,4	48	0,22	0,09	4,6	0,72
"	"	"	4,4	"	0,12	0,06	2,5	0,88
"	"	"	2,5	"	0,05	0,04	1,0	0,83

Ergänzend zu den im Bild festgehaltenen Versuchsdaten liefert Tabelle 4 die gemessenen Pulsenergien  $E_{LP}$  sowie die daraus und dem Lochdurchmesser min  $d_i$  errechneten

neten Strahlintensitäten  $I_{LPi}$ . Letztere betragen im Mittel  $0,8 \text{ MW/mm}^2$  und sind in erster Näherung unabhängig vom Blendendurchmesser  $d_{Ap}$ .

Die günstige Auswirkung der Modenblende auf Strahlqualität und damit Intensität des Laserstrahls wird an folgendem Beispiel aus der Versuchspraxis deutlich: Mit der Blende  $d_{Ap} = 4,4 \text{ mm}$  und der Laseroszillatoreinstellung  $160 \mu\text{s}$ ,  $700 \text{ V}$ ,  $43 \text{ Hz}$  erbringt der Laserstrahl eine Pulsenergie von  $E_{LP} = 0,53 \text{ J}$ . Unter diesen Bedingungen ist es möglich, ein X5CrNi1810-Blech von  $1,0 \text{ mm}$  Dicke über einen Fokusbereich von immerhin  $\Delta z_F = 0,8 \text{ mm}$  ( $\Delta z_M = (46,9 - 46,1) \text{ mm}$ ) zu durchbohren. Entnimmt man nun zum Vergleich die Modenblende aus dem Laserresonator, so ergibt sich bei sonst unveränderten Versuchsparametern  $E_{LP} = 0,92 \text{ J}$ . Trotz dieser erheblichen Steigerung der Pulsenergie gelingt bei keiner Fokusbereich mehr der Durchbruch durch das Blech.

### 5.3 Standardmäßige Strahlführung und -formung

Die Versuche werden mit der im folgenden beschriebenen und in Bild 12 gezeigten Laserstrahlführung und -formung durchgeführt.

In Laserstrahlrichtung unmittelbar nach der Laserstrahlquelle befindet sich ein Leistungsaufnahmebaustein, in dem durch eine Strahlteilerplatte ein kleiner Anteil der Strahlung auf eine Photodiode abgelenkt wird (vgl. [74]). Die Photodiode ist elektrisch vorgespannt, und ihre Anstiegszeiten liegen deutlich unter den typischen Singularitäten im zeitlichen Laserstrahlleistungsverlauf (Spikes) während eines Laserstrahlpulses.

An den Leistungsmeßbaustein ist eine elektromotorisch betriebene Strahlweiche angeflanscht, die in ihren zwei Betriebslagen die Strahlung entweder unbeeinflusst passieren läßt oder um  $90^\circ$  ablenkt. Die erste Möglichkeit wird dazu genutzt, den Laserstrahl über eine Einkoppeloptik in eine Lichtleitfaser einzuspeisen. Wegen der großen Justageempfindlichkeit einer solchen Einkopplung wird sie bevorzugt im nicht von der Weiche beeinflussten Strahlweg vorgenommen, da sich hier eventuelle Positionsungenauigkeiten der Weiche nicht auswirken können. Deutlich weniger anfällig ist in dieser Beziehung eine Linsenoptik, so daß diese im vorliegenden Fall mit in den Strahlweg gefahrener Weiche betrieben wird. In der Strahlweiche befindet sich ein für die Nd:YAG-Wellenlänge hochreflektierender Spiegel.

Nach der Strahlweiche erreicht die Laserstrahlung einen Aufweitungsbaustein, der im wesentlichen aus einer Aufweitungs- und einer Kollimationsoptik besteht. Es stehen zwei Aufweitungs-linsen zur Verfügung, die wahlweise über einen Schieber in den Strahlengang gesetzt werden können. Die damit zusammenhängenden Aufweitungs-faktoren für die Strahldurchmesser betragen  $a = 4$  beziehungsweise 5. Die Kollimieroptik wird von einem hochwertigen Achromaten verkörpert. Dieser kann bei Bedarf über eine dazu vorgesehene Meßschraube (Mikrometer-Schraube) axial im Strahlengang bewegt werden, um zunächst die Divergenz des austretenden Laserstrahls, damit den Strahldurchmesser auf der Fokussieroptik und letztendlich die Fokuslage und -größe am Ort der Materialbearbeitung zu beeinflussen.

Der Laserstrahl trifft sodann auf die Fokussiereinheit, die einen Achromaten mit der Brennweite  $f = 100$  mm besitzt. An dieser Fokussiereinheit befinden sich zusätzlich eine Beobachtungsoptik mit einem Mikroskopokular sowie die Halterung für ein Schutzglas und die Bearbeitungsdüse. Die Fokussiereinheit ist auf einem NC-gesteuerten Schlitten befestigt, mit dem sie in Richtung der Strahlachse  $z$  verfahren werden kann. Auf diese Weise läßt sich die Lage des Strahlfokus  $z_f$  relativ zur Werkstückoberfläche variieren.

Bild 30 veranschaulicht anhand eines praktischen Beispiels den Einfluß der Aufweitung auf die erreichbaren Lochdurchmesser, und zwar für eine Bearbeitung mit zu-

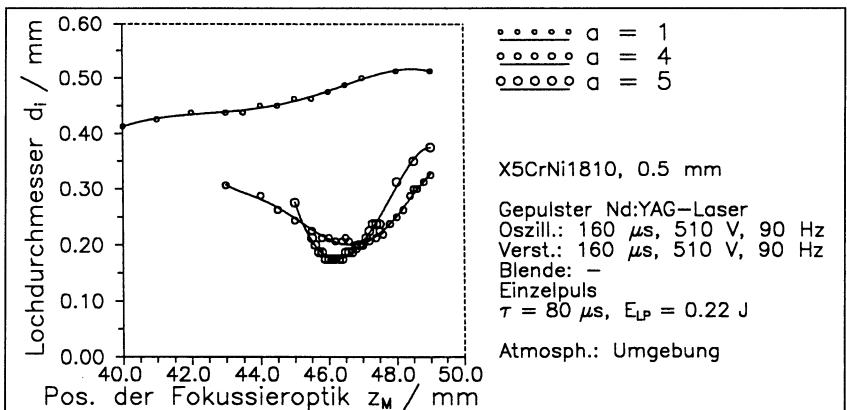


Bild 30: Lochdurchmesser in Abhängigkeit vom Aufweitungsfaktor in der Laserstrahlführung

geschaltetem Laserverstärker. Bei größter Aufweitung,  $a = 5$ , ist der minimal mögliche Lochdurchmesser erzielbar; die durch den größeren Fokussierwinkel  $\Theta_F$  bedingte geringere Schärfentiefe macht jedoch erforderlich, daß die Fokusslage  $z_F$  beziehungsweise die dazugehörige Maschinenkoordinate  $z_M$  sehr genau justiert wird. Diese genaue Justierung ist für den Fall einer Bearbeitung ohne Laserverstärker und ebenfalls größter Aufweitung noch wichtiger, da wegen des größeren Strahldurchmessers, vgl. Strahlengang 1 in Bild 14, der Fokussierwinkel  $\Theta_F$  zunimmt und damit die Schärfentiefe kleiner wird. Die meisten Versuche dieser Arbeit werden mit dem Aufweitungsfaktor  $a = 4$  durchgeführt.

### 5.4 Optikschutz

Bild 31 zeigt praktisch erprobte Optikschutzvarianten. Dabei bewährt sich besonders die Lösung mit der Kunststoffscheibe als Verschleißteil, Bildmitte, die auch im allgemeinen für die Versuche zur vorliegenden Arbeit eingesetzt wird. Als Ausnahme sind Versuche mit Prozeßgaskammern auf der Laserstrahleintrittsseite des Werkstücks zu sehen, in welche, wie in Kapitel 4 gezeigt, ein Fenster wegen der geforderten Dichtigkeit fest eingebaut sein muß. Eine solche Ausführung entspricht der Darstellung rechts im genannten Bild.

In der Praxis zeigt sich, daß ein kontinuierliches Drehen der Kunststoffscheibe gün-

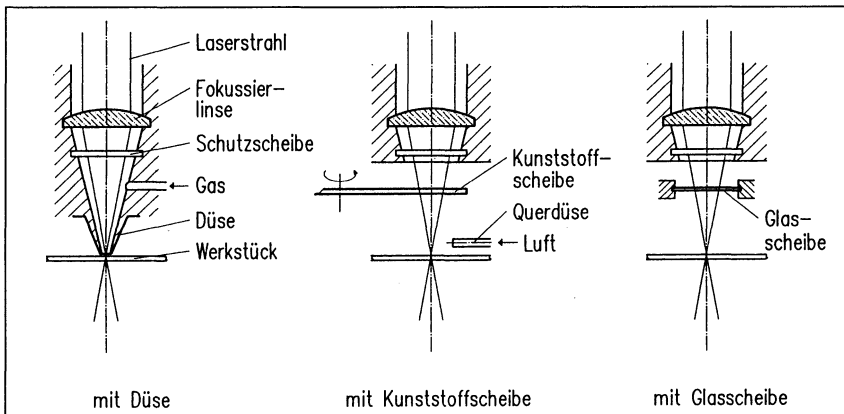


Bild 31: Optikschrutzu-Varianten

stiger ist als das schrittweise Weiterdrehen nach vordefinierten Bearbeitungszyklen. Ersteres ist zum einen besser überwachbar; es bedarf zum anderen keiner speziellen Bedienung entweder von Hand oder von einem NC-Programm aus. Die Kunststoffscheibe hält den Laserstrahl (Pulsenergie, Pulsleistung, mittlere Leistung), wie sie hier eingesetzt werden, ohne weiteres stand. Eine Beeinträchtigung von Bearbeitungsergebnissen wegen der unter Umständen schlechteren optischen Qualität der Kunststoffscheiben gegenüber Glasscheiben ist nicht feststellbar. Auch der durch die nicht antireflexbeschichteten Grenzflächen der Kunststoffscheiben verursachte Verlust an Laserstrahlleistung stellt keine Schwierigkeit dar, da er problemlos durch eine Anpassung der Lasereinstellparameter kompensiert werden kann. Bei Benutzung der Kunststoffscheiben muß darauf geachtet werden, daß der Wechselzyklus den Bearbeitungsparametern angepaßt wird, da letztere starken Einfluß auf die (zeitliche) Verschmutzungsrate haben.



## 6 Untersuchungen zum durchflußgeregelten Laserstrahlbohren

In diesem Kapitel werden experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahlbohren dargestellt. Zunächst wird der Umfang der dargestellten Experimente abgegrenzt. Als Vergleichsbasis für die mit Regelung erzielbaren Bearbeitungsergebnisse wird als erstes untersucht, welche Durchflußstreuungen sich beim Einzelpulsbohren ohne Regelung ergeben. Sodann wird überprüft, ob beziehungsweise um wieviel sich die Durchflußstreuungen mit Mehrlochbohrbildern anstelle von Einzellöchern reduzieren lassen. Hauptziel der dann folgenden Untersuchungen ist es, die Wirksamkeit der Regelung nachzuweisen und gegebenenfalls eine Optimierung derselben im Hinblick auf die Durchflußstreuung und das Erscheinungsbild der bearbeiteten Löcher zu betreiben.

### 6.1 Eingrenzung der Untersuchungen

Die Versuchseinrichtung eröffnet unzählige Variationsmöglichkeiten für die Durchführung der Untersuchungen. Exemplarisch und ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier folgende Versuchsvariablen aufgezählt:

- Werkstück:  
Werkstoff, Geometrie;
- Prozeßgas:  
Anordnung der Kammer, Gaszusammensetzung, -druck  $p$ ;
- Laserstrahlerzeugung:  
Pulsdauer  $t$ , Ladespannung  $U$ , letztere gegebenenfalls unabhängig voneinander für Laseroszillator und -verstärker, Pulsfrequenz  $f$ , Pulsanzahl  $N$ , Modenblendendurchmesser  $d_{Ap}$ ;
- Laserstrahlführung und -formung, Werkstückhandhabung:  
Strahlaufweitungsfaktor  $a$ , Brennweite der Fokussiereinheit  $f_{lens}$ , Fokusslage  $z_F$ , Bearbeitungskoodinaten  $x, y$ ;
- Regelung:  
Regelstrategie, Parameter derselben.

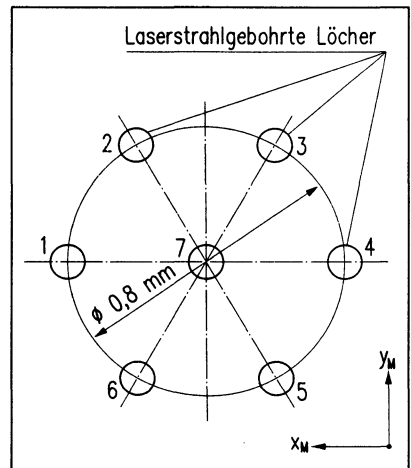
Die aufgezeigte Vielzahl möglicher Versuchsvariablen wird im folgenden im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit eingeschränkt.

Die Untersuchungen werden im wesentlichen an Blechen aus dem Edelstahl X5CrNi1810 durchgeführt, da er für durchflußbestimmende Einsatzfälle von übertragender Bedeutung ist. Vergleichsversuche mit anderen Stählen sollen zeigen, daß die an Edelstahl erzielten Ergebnisse also auf eine breite Palette an Stählen übertragbar sind.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist es ferner erforderlich, die Versuche an Werkstücken mit bestmöglich reproduzierbarer Geometrie durchzuführen. In dieser Hinsicht am eindeutigsten sind Flachteile, weswegen ausschließlich Feinbleche eingesetzt werden. Die Dicke wird auf maximal 1,0 mm beschränkt. Die Oberflächenbeschaffenheit der kaltgewalzten Bleche, die eine gewisse Rolle im Hinblick auf das Einkoppelverhalten der Laserstrahlung spielt, wird hier als ausreichend gut wiederholbar angenommen.

Als Laserstrahlquelle wird der in Kapitel 5 näher beschriebene gepulste Nd:YAG-Laser eingesetzt. In aller Regel, das heißt wenn nicht anders vermerkt, werden die Bearbeitungsversuche mit Laserstrahleinpulsen durchgeführt. Diese Einschränkung ist auch deswegen zweckmäßig, weil das Nacharbeiten eines Loches mittels Durchflußregelung meistens ebenfalls im Einzelpulsbetrieb geschieht.

Für durchflußbestimmende Erzeugnisse sind allein Durchgangsbohrungen von Interesse. Sacklöcher werden lediglich in einem Fall, bei dem sie Teil einer Durchgangsbohrung sind, eingesetzt. Die angestrebten Lochdurchmesser liegen im Bereich von 0,1 bis 0,4 mm. Als größtes Schachtverhältnis wird demzufolge 10:1 (bei  $s = 1,0$  mm,  $d = 0,1$  mm) angesetzt. Die Löcher sollen im Prinzip zylindrisch sein, obwohl auch jede andere, zum Beispiel konische Form akzeptabel ist, sofern sie in engen Toleranzen wiederholbar ist. Es wird immer rechtwinklig zur Werkstückoberfläche gebohrt.



Für Versuche mit Mehrlochbildern wird einheitlich auf eine Anordnung gemäß Bild

Bild 32: Anordnung der Einzellocher im 7-Loch-Bohrbild

32 zurückgegriffen. Das ausgewählte 7-Loch-Bohrbild weist Äquidistanz zwischen den einzelnen Löchern auf, die einzelnen Löcher werden in der Reihenfolge der Numerierung hergestellt. Mit dem Meßbereich des Sensors aus Abschnitt 4.3, der ein maximales Ausgangssignal von 5000 mV ausmacht, ergibt sich ein maximales Durchflußsignal pro Loch von etwa 700 mV ( $\cong 5000/7$  mV).

Im Falle der Verwendung des Durchflußsensors wird als Prozeßgasdruck 0,4 MPa bevorzugt, da dies dem Kalibrierdruck des Sensors entspricht.

Die Geometrie der erstellten Löcher kann aufgrund folgender Qualitätsvorgaben beurteilt werden:

- Maß- und Formabweichungen kleinstmöglich,
- Oberflächengestalt im Loch bestmöglich,
- Gestalt des Lochein- sowie des -auslaufs (Rundung, Grat, Wulst) definiert,
- möglichst keine Mikrorisse (wegen Dauerfestigkeit),
- minimale Niederschläge und Schmelzeablagerungen sowohl im Loch als auch auf der Werkstückoberfläche,
- Wärmebeeinflussung (Wärmeeinflußzone) im Werkstoff gering.

In dieser Arbeit wird die Qualitätsbeurteilung zum einen mittels einer unter dem Meßmikroskop vorgenommenen, visuellen Kontrolle sowohl der Lochansichten an den beiden Blechoberflächen als auch von Loch-Längsschliffen, zum anderen durch die Messung des die Löcher passierenden Gasdurchflusses durchgeführt.

Jeder Lochdurchmesserwert in den nachfolgenden Diagrammen stellt den Mittelwert von mindestens 5 Löchern bei gleichen Versuchsparametern, gemessen unter dem Mikroskop, dar.

Als Maßstab für gute Bearbeitungsqualität seien hier die Löcher in Bild 33 aufgeführt. Sie sind beidseits durch absolut rückstandsfreie Werkstückoberflächen gekennzeichnet. Lediglich die markanten Ablagerungen an den Lochwandungen, die auf wiedererstartete Werkstoffschmelze zurückzuführen sind, lassen sich, wie umfangreiche Versuche zeigen, nicht vermeiden. Die Reproduzierbarkeit der Lochgeometrie ist für viele industrielle Anwendungsfälle mit durchflußbestimmender Funktion ausreichend.

Die Versuchsparameter werden meist nach zwei möglichen Strategien variiert: entweder linear, zum Beispiel die Fokusslage  $z_M$ , oder geometrisch nach DIN [136], wie beispielsweise die Lasereinstellparameter  $t$  und  $U$ . Letzteres bietet den Vorteil,

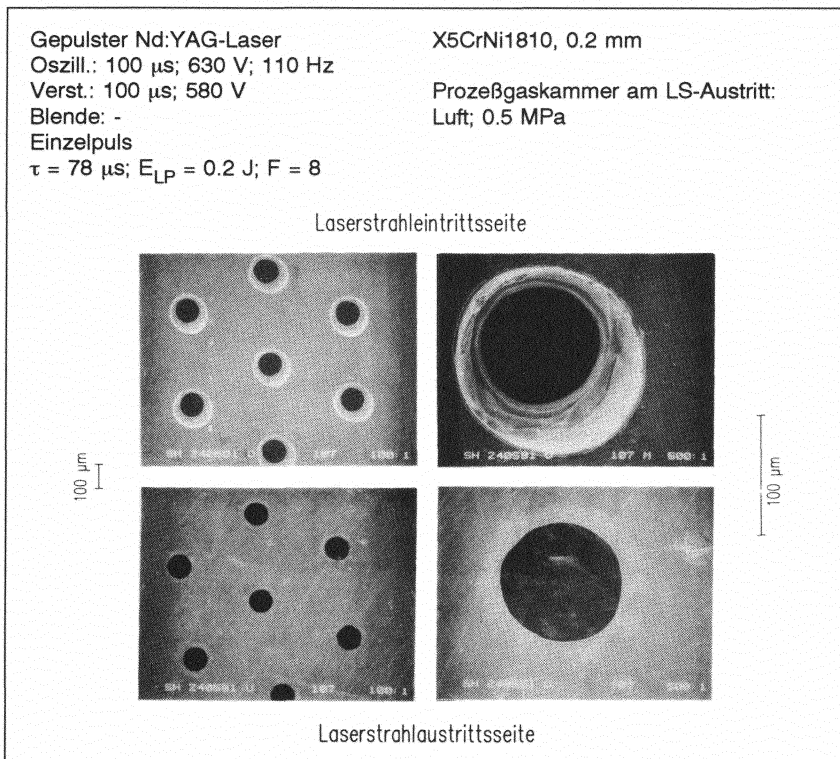


Bild 33: Beispiel für gute Bearbeitungsqualität beim Laserstrahlbohren

einen Sensitivitätsvergleich zwischen (auch sehr ungleichen) Parametern durchführen zu können.

## 6.2 Anordnung der Prozeßgaskammer

Aus Kapitel 4 geht hervor, daß die Prozeßgaskammern auf beiden Seiten des blechförmigen Werkstücks angeordnet werden können. Auch der gleichzeitige Einsatz von Kammern auf der Laserstrahleintritts- und der -austrittsseite ist konstruktionsseitig vorgesehen. Die praktische Erprobung der Kammern soll deren Anwendbarkeit zu beurteilen helfen.

### 6.2.1 Prozeßgaskammer auf der Laserstrahleintrittsseite

Bei Einsatz einer Prozeßgaskammer auf der Laserstrahleintrittsseite des Werkstücks ergibt sich der gravierende Nachteil, daß das für den Durchtritt der Laserstrahlung erforderliche Glasfenster sehr schnell verschmutzt. Die anhaftenden Partikel stammen aus dem entstehenden Bohrloch und werden dort mit hoher Geschwindigkeit und Temperatur ausgeschleudert. Die Dampfaustrittsgeschwindigkeit wird mittels einer Überschlagsrechnung auf 10.000 m/s geschätzt [49]. Nach wenigen, zum Beispiel schon 10, mit Einzelpulsen angefertigten Löchern ergibt sich eine mit bloßem Auge, aber auch taktil durch eine Rauheitszunahme wahrnehmbare Materialablagerung auf der Glasoberfläche. Auch eine baulich realisierte Vergrößerung des Abstandes zwischen Fenster und Bearbeitungsstelle von etwa 40 auf 80 mm bringt, zumindest bei den zum Bohren eingesetzten überdurchschnittlich hohen Laserstrahlpulsleistungen, keine nennenswerte Reduzierung der Verschmutzungsneigung. Das Fenster übernimmt unbeabsichtigterweise die Schutzfunktion für die dahinterliegende Fokussieroptik. Insofern sind die hier geschilderten Verschmutzungserscheinungen mit den in der Literatur [46, 83, 86, 101] beschriebenen Beeinträchtigungen der Optikschiefeinrichtungen vergleichbar.

Für die gegebenen Abmessungen und die Einspannungsweise des Fensters ist aus Festigkeitsgründen der Gasdruck in der Kammer auf 0,4 MPa beschränkt.

Die aufgeführten Probleme führen dazu, daß der Einsatz einer auf der Laserstrahleintrittsseite angeordneten Prozeßgaskammer für Versuchszwecke, besonders aber auch für eine industrielle Anwendung mit großen Lochanzahlen aussichtslos erscheint. Aus diesem Grunde wird für den Rest dieser Arbeit von einer Prozeßgaskammer auf der Laserstrahleintrittsseite Abstand genommen.

### 6.2.2 Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite

Bei Einsatz einer Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite, Bild 9, treten die für das Pendant auf der Laserstrahleintrittsseite geschilderten Probleme nicht auf. Auch die Rückreflexion von Laserstrahlung auf der Grundfläche der Kammer führt zu keiner feststellbaren Beeinträchtigung der Bearbeitungsergebnisse. Nur bei Einsatz einer nicht ausreichend tiefen Kammer würde eine derart starke Rückstrahlung auftreten, daß sich auf der Werkstückunterseite eine Oberflächenbeeinflussung

ergäbe. Im Grenzfall, nämlich mit einer nur schlitzhohen Kammer, läßt sich gemäß Kapitel 2 sogar eine Rundung der Lochaustrittskanten, das heißt eine Bearbeitung mit Materialumschmelzung beziehungsweise -abtrag erzielen.

Des weiteren zeigt sich bei einem Verzicht auf die Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite, daß dort Materialablagerungen in Form kleiner Tropfen oder Grate unvermeidlich sind. Sie ergeben sich daraus, daß Werkstoffschmelze an den noch kalten Randbereichen des Loches erstarrt. Unter Einsatz der Prozeßgaskammer gelingt es hingegen, bei geeigneter Wahl des Gasdrucks sowie der Lasereinstellparameter rückstandsfreie Werkstückunterseiten herzustellen. Modellhaft läßt sich dieses Verhalten dadurch erklären, daß der geschmolzene beziehungsweise verdampfte Werkstoff im Augenblick des Lochdurchbruchs durch den in der Prozeßgaskammer anstehenden Druck an einem Austreten gehindert und dafür in Richtung des einfallenden Laserstrahls beschleunigt wird.

Beispiele für Bearbeitungen mit der Prozeßgaskammer liefert Bild 34. Die Schlißbilder auf der linken Seite zeigen die Bearbeitungsergebnisse ohne Druckbeaufschlagung, die Aufnahmen rechts diejenigen bei 0,4 MPa Sauerstoff-Überdruck in der Prozeßgaskammer. Allgemein ist festzustellen, daß sich ohne Überdruck eine schlechtere Reproduzierbarkeit der Lochgeometrie einstellt. Insbesondere ergeben sich in diesem Fall große Streuungen im Bereich des Lochaustritts, wo teilweise starke Abrundungen der Lochkante zu beobachten sind.

Wie einschlägige Versuche zeigen, spielt die Zusammensetzung des Prozeßgases hinsichtlich Bearbeitungsablauf und -ergebnis keine nennenswerte Rolle. Dies ist wegen der kurzen Wechselwirkungszeiten zwischen Laserstrahlung und zu bearbeitender Materie, die sich aus der in der Regel eingesetzten Einzelpulsbearbeitung ergeben und die chemische Reaktion zwischen Werkstoff und Prozeßgas nicht zulassen, plausibel. Daraus ergibt sich für die vorliegende Arbeit, daß die Versuche im wesentlichen mit Luft als Prozeßgas durchgeführt werden.

Für die in-process-Durchflußmessung ist eine gasdicht mit dem Werkstück verbundene Kammer auf einer der beiden Werkstückseiten unerläßliche Voraussetzung. Nachdem sich der Einsatz einer solchen Kammer nur auf der Laserstrahlaustrittsseite als vorteilhaft erweist, werden alle weiteren Untersuchungen mit einer solchen Kammer durchgeführt.

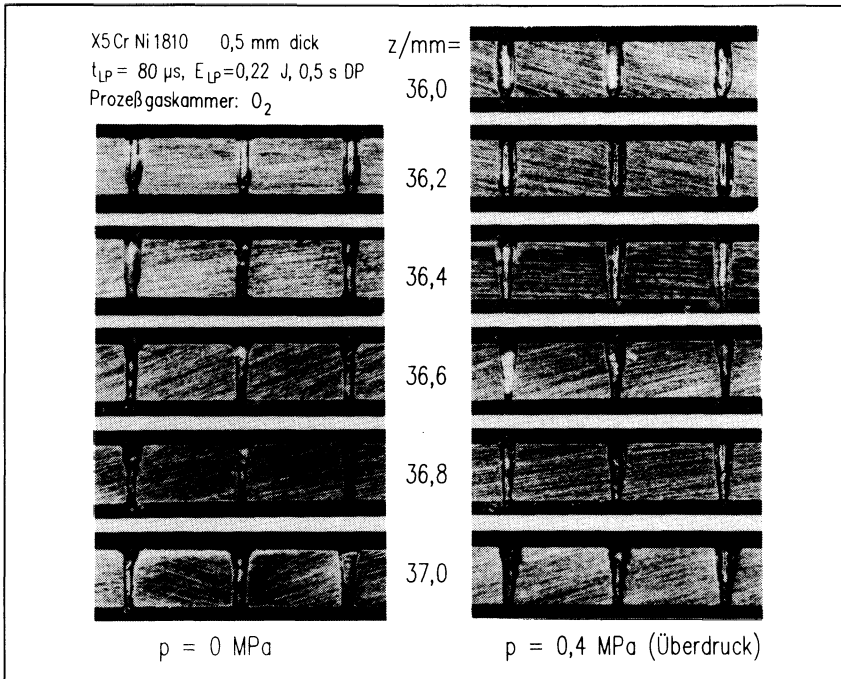


Bild 34: Bearbeitungsbeispiele für das Laserstrahlbohren mit Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite des Werkstücks

### 6.3 Durchflußstreuung von Einzellöchern und Mehrlochbohrbildern ohne Regelung des Laserstrahlbohrvorgangs

Wie eingangs des Kapitels erwähnt, soll hier zunächst untersucht werden, welche Beträge Durchflußmittelwert und -streuung annehmen, wenn ohne die in späteren Abschnitten eingesetzte Regelung laserstrahlgebohrt wird. Darauf basierend wird die Bestätigung für die theoretische Annahme gesucht, daß Mehrlochbohrbilder wegen der Mittelung über die mehreren Einzellöcher tatsächlich eine reduzierte Durchflußstreuung aufweisen.

Breit angelegte Vorversuche führen zu der in der Legende von Bild 35 angegebenen Laserstrahlparameterkombination, die eine befriedigende Qualität der Löcher und das gewünschte Durchflußäquivalent in der Größenordnung von 700 mV ergibt.

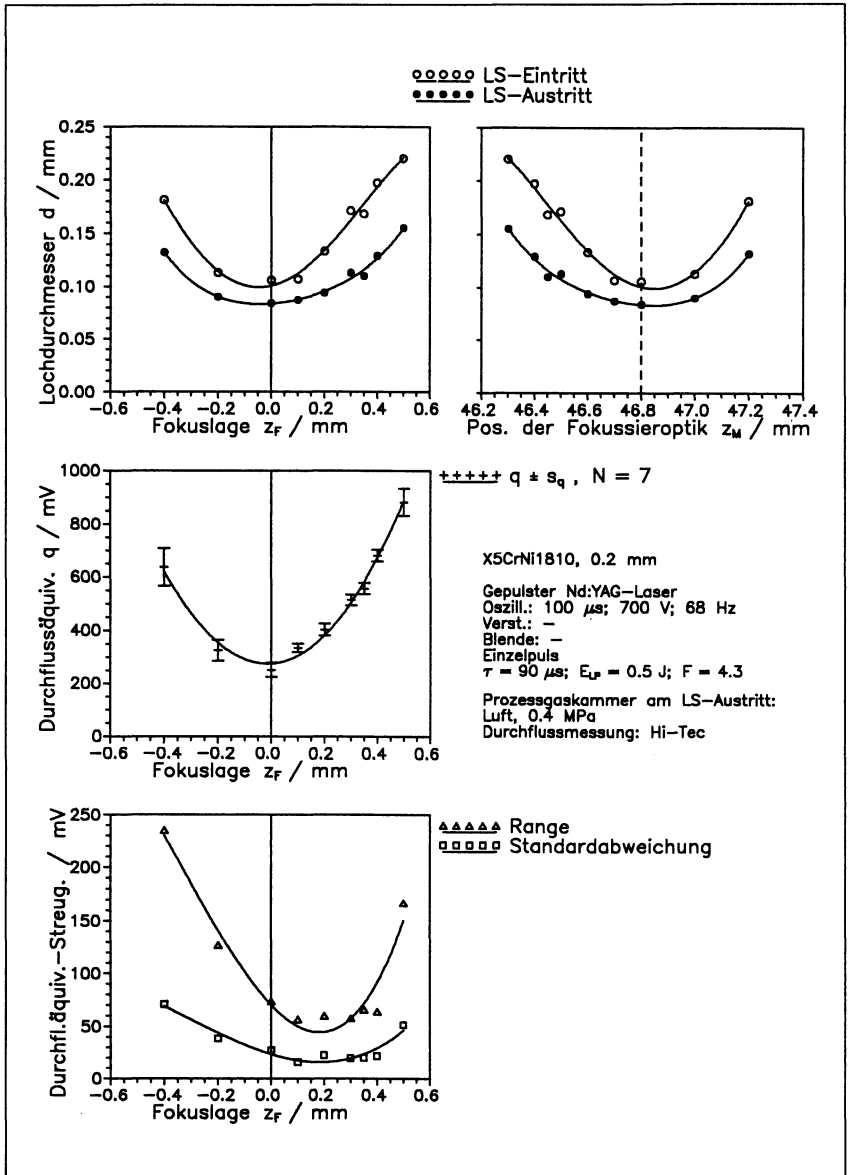


Bild 35: Laserstrahlbohren von Einzellöchern bei Variation der Fokusslage



### 6.3.1 Durchflußstreuung einzelner Löcher

Zeitlich nacheinander und räumlich nebeneinander werden 7 Löcher in ein 0,2 mm dickes Blech gebohrt. Nach jedem hinzugekommenen Loch wird die Einschwingzeit des Durchflußsensors abgewartet und der Durchflußwert abgelesen. Der Durchfluß durch jedes Loch wird dann rechnerisch ermittelt. Nach jeder Reihe von 7 Löchern wird die Fokusslage verändert und der Versuchsvorgang wiederholt.

Bild 35 zeigt in der Übersicht die Ergebnisse. Oben rechts ist zunächst der Verlauf der Lochdurchmesser  $d_i$ ,  $d_o$  mit der Position der Fokussieroptik  $z_M$  aufgetragen. Nach der in Anhang A.3 vorgestellten Ermittlungsweise für die Laserstrahlfokusslage werden die Maschinenkoordinaten  $z_M$  in die jeweiligen Fokusslagenwerte  $z_F$  umgerechnet, Diagramm oben links. In der Bildmitte ist der Durchfluß bei den verschiedenen Fokusslagen dargestellt. Die Durchflußmittelwerte ergeben einen in etwa symmetrischen Verlauf um die Fokusslage  $z_F = 0$ . Auffällig ist, daß die Löcher bei  $z_F > 0$  deutlich kleinere Streubreiten aufweisen als bei  $z_F < 0$ . Dies geht einher mit der Beobachtung, daß auch die Lochqualität, visuell an der Größe der Schmelzeablagerungen und der Grate beurteilt, deutlich besser ist. Als qualitativ beste Löcher werden diejenigen bei  $z_F = + 0,35$  mm bewertet. Bemerkenswert ist schließlich, daß mit dieser Fokusslage gefertigte Löcher eine relativ große Konizität aufweisen, die sich im Diagramm an der großen Differenz zwischen den Lochdurchmessern an Laserstrahl-eintritts-  $d_i$  und -austrittsseite  $d_o$  widerspiegeln.

Ergänzend ist in Bild 35 unten der Verlauf für die Streuungsgrößen Standardabweichung  $s$  und Streubreite  $R$  wiedergegeben. Beide Größen korrelieren erwartungsgemäß. Besonders deutlich wird der bereits erwähnte Sachverhalt, daß die Durchflußstreuung im Bereich höherliegender Fokusslagen vergleichsweise klein ist, das Minimum der Streuungskurve also zu  $z_F > 0$  verschoben ist.

Den Bearbeitungsbeispielen 2 und 3 in Abschnitten 6.4.1.2 und 6.4.1.3 sind weitere Versuchsergebnisse bezüglich der sich bei Einzellöchern vor Einsatz der Regelung des Laserstrahlbohrvorgangs ergebenden Durchflußstreuungen zu entnehmen.

6.3.2 Durchflußstreuung von zu Lochbildern zusammengefaßten Einzellöchern

Für die bei den gewählten Lasereinstellparametern als besonders günstig erkannte Fokusslage  $z_F = + 0,35$  mm wird ein Wiederholungsversuch mit 7 der beschriebenen Lochfolgen durchgeführt.

Tabelle 5: Aufzeichnung der Durchflußäquivalente bei der Herstellung von 7-Loch-Bohrbildern

Durchfluß / mV	Lochbild							Mittelw. mV	Std.abw. mV	Var.koeff. %
	1	2	3	4	5	6	7			
0 Anfang	59,4	60,4	63,5	62,2	60,2	59,8	61,2	61,0	1,3	2,2
1	700	659	704	667	647	678	690	678	19,8	2,9
2	1305	1257	1342	1318	1232	1293	1302	1293	34,4	2,7
3	1956	1930	1971	1976	1833	1910	1938	1931	45,3	2,3
Loch 4	2588	2528	2641	2657	2497	2513	2543	2567	58,5	2,3
5	3195	3170	3247	3298	3126	3097	3161	3185	64,1	2,0
6	3790	3740	3840	3910	3720	3658	3730	3770	77,9	2,1
7	4471	4416	4465	4576	4389	4338	4363	4431	74,7	1,7

Tabelle 5 gibt die Versuchsergebnisse wieder. Sie enthält in den Spalten für jeweils eines der Lochbilder den Anstieg des kumulierten Durchflußäquivalents mit steigender Anzahl hergestellter Löcher. Ausgehend von einem Anfangswert, der dem tatsächlichen Durchfluß 0 entspricht, enthalten die Zeilen in der Tabelle nebeneinander die kumulierten Durchflußäquivalente bis zum jeweils i-ten Loch für die verschiedenen 7-Loch-Bilder. So stehen beispielsweise in Zeile "Loch 4" die Summen der Durchflußäquivalente der Löcher 1, 2, 3 und 4 der 7 betrachteten Lochbilder. Dies kann wiederum derart interpretiert werden, daß der aufgeführte Wert des Durchflußäquivalents das i-Fache des Mittelwerts über die Einzel-Durchflußäquivalente der i ersthergestellten Löcher eines Lochbildes repräsentiert. Nach den Gesetzen der Statistik ist es deswegen plausibel, daß die Variationskoeffizienten  $v_q$  eine fallende Tendenz mit zunehmender Anzahl Löcher aufweisen.

Obige theoretische Annahme findet praktische Bestätigung: Gemäß Tabelle 5 reduziert sich der Variationskoeffizient von  $v_q = 2,9$  % für die Einzellöcher (Zeile "Loch 1") auf 1,7 % für die 7er Lochgruppen (Zeile "Loch 7"). Damit wird empirisch nachgewiesen, daß über den Ansatz, einen Solldurchfluß nicht über ein Einzellloch, sondern über

eine größere Anzahl Löcher zu realisieren, eine nicht zu vernachlässigende Reduzierung der Durchflußstreuung zu erzielen ist.

## **6.4 Reduzierung der Durchflußstreuung durch Regelung des Laserstrahlbohrvorgangs mit in-process-Durchflußmessung**

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob und gegebenenfalls wie sich die in Kapitel 4 vorgestellte Regelung des Laserstrahlbohrvorgangs auf die Bearbeitungsergebnisse auswirkt. Ziel ist dabei, eine Einengung der Durchflußstreuung der laserstrahlgebohrten Löcher bei ansonsten nicht verschlechterter Qualität gegenüber Löchern, bei denen die Regelung nicht zum Einsatz kommt, zu erreichen. Die verschiedenen vorgeschlagenen Regelstrategien werden gegenübergestellt.

### **6.4.1 Regelstrategie "adaptive Fokusalagenverschiebung"**

Als erste der vorgeschlagenen Regelstrategien wird diejenige mit durchflußadaptiver Fokusalagenverschiebung aufgegriffen. Im folgenden sollen Arbeitsweise und Wirksamkeit dieser Regelstrategie anhand von drei Bearbeitungsbeispielen mit unterschiedlichen Werkstückdicken demonstriert werden.

#### **6.4.1.1 Bearbeitungsbeispiel 1: 0,2 mm dickes Blech, Mehrlochbohrbild**

Das erste Beispiel darf als Fortsetzung der in Abschnitt 6.3.2 vorgestellten Versuche verstanden werden: Es werden Mehrlochbohrbilder in 0,2 mm dickem X5CrNi1810-Blech hergestellt.

#### **Nacharbeit des Mittelloches**

Im folgenden wird der Bearbeitungsfall vorgestellt, bei dem das 7te, das heißt letzte Loch bis zum Erreichen des Solldurchflusses nachgearbeitet wird. Die Vorgehensweise wird anhand von Bild 36 verdeutlicht. Die einzelnen Graphen zeigen: oben den Verlauf der Fokusalage  $z_F$  mit den einzelnen Bearbeitungsschritten, unten links die Entwicklung des Durchflußäquivalents  $q$  als Funktion derselben Bearbeitungsschritte und

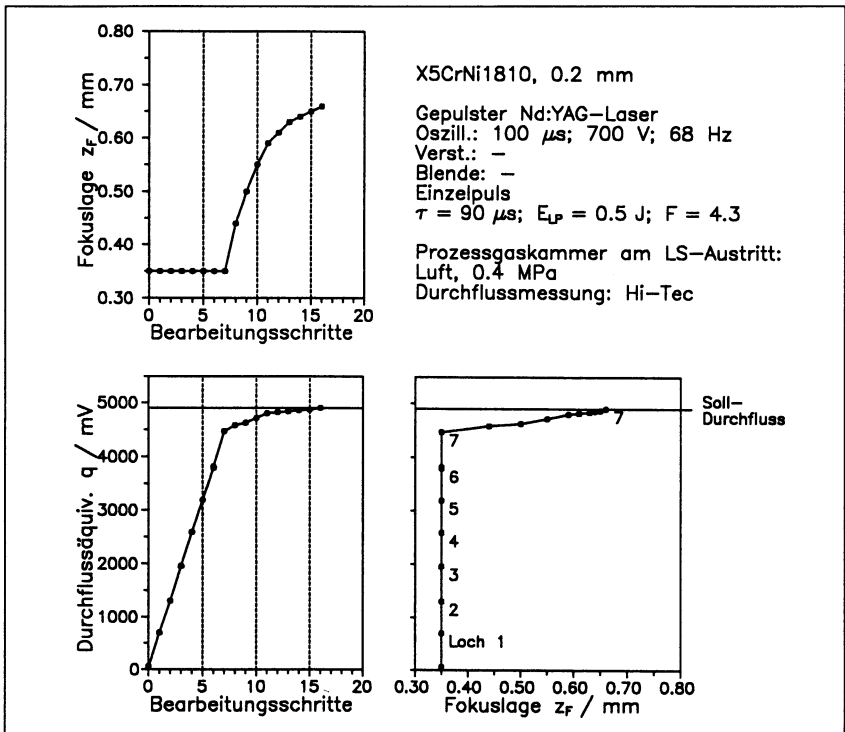


Bild 36: Durchflußgeregeltes Laserstrahlbohren mit Nacharbeit am Mittelloch eines 7-Loch-Bohrbilds

unten rechts den nach Eliminierung der Bearbeitungsschritte aus den vorgenannten zwei Graphen erhaltenen Verlauf des Durchflußäquivalents mit der Fokussage. Das Soll-Durchflußäquivalent für die Regelung wird auf 4900 mV festgelegt, so daß sich ein mittleres Durchflußäquivalent pro Loch von 700 mV ergibt. Die Lasereinstellparameter und die zunächst unveränderliche Fokussage  $z_F = + 0,35$  mm werden von den in Bild 35 präsentierten Vorversuchen abgeleitet, um qualitativ befriedigende und in etwa der Durchflußvorgabe für ein Einzelloch entsprechende Löcher zu erhalten.

Die Bearbeitung beginnt, Schritt 0, mit der Aufnahme des Durchflusses bei un bearbeitetem Werkstück und der nachfolgenden Erzeugung des ersten Lochs mit einem Einzelpuls des Lasers, Bearbeitungsschritt 1. Es muß dann solange gewartet werden, bis sich das Signal des Durchflußsensors wieder stabilisiert hat, wofür in der Ver-

suchspraxis mit dem thermischen Durchflußmeßgerät Zeitspannen von 15 s, fallweise aber auch darüber vonnöten sind. Die Nichteinhaltung dieser Wartezeit führt dazu, daß wegen des in Bild 59 exemplarisch demonstrierten Signalüberschwingers eine frühzeitige automatische Abschaltung des Bohrprozesses durch die Regelung erfolgen kann, weil der Soll-durchfluß vermeintlicherweise bereits überschritten ist. Nach Abschluß der Messung wird die Positioniereinheit in den Achsen  $x_M$  und  $y_M$  zum Ort des zweiten Loches verfahren und dieses dort mit einem zweiten Einzelpuls hergestellt. Dieser Vorgang wird sukzessive für die 7 Löcher des Bohrbildes wiederholt. Der sich mit Bearbeitungsschritt 7 einstellende Durchfluß weist noch eine Differenz zum Soll-durchfluß auf. Loch Nr. 7 wird dann nach der Strategie der adaptiven Fokusalagenverschiebung nachgearbeitet. Anhand einer weiteren Vorversuchsreihe wird der Faktor in der Berechnungsformel für diese Regelstrategie, Gl. (18), mit  $c = 1/5000$  mm/mV als geeignetstem Wert definiert. Bis zur Erreichung des Soll-Durchflußäquivalents sind im gezeigten Beispiel die Schritte Nr. 8 bis 16 erforderlich, das heißt zusätzliche 9 Bearbeitungsschritte. Es stellen sich 4902 mV als Endwert für das Lochbild-Durchflußäquivalent ein, das heißt eine nur geringfügige Abweichung vom Sollwert.

Tabelle 6: Aufzeichnung der Durchflußäquivalente bei der Herstellung von 7-Loch-Bohrbildern mit durchflußadaptiver Regelung des Bohrprozesses

Durchfluß / mV	Lochbild							Mittelw. mV	Std.abw. mV	Var.koeff. %
	1	2	3	4	5	6	7			
0 Anfang	59,4	60,4	63,5	62,2	60,2	59,8	61,2	61,0	1,3	2,2
1	700	659	704	667	647	678	690	678	19,8	2,9
2	1305	1257	1342	1318	1232	1293	1302	1293	34,4	2,7
3	1956	1930	1971	1976	1833	1910	1938	1931	45,3	2,3
Loch 4	2588	2528	2641	2657	2497	2513	2543	2567	58,5	2,3
5	3195	3170	3247	3298	3126	3097	3161	3185	64,1	2,0
6	3790	3740	3840	3910	3720	3658	3730	3770	77,9	2,1
7 Anfang	4471	4416	4465	4576	4389	4338	4363	4431	74,7	1,7
7 Ende	4902	4907	4907	4916	4909	4900	4900	4906	5,3	0,11
Bearb.schritte	16	17	17	16	17	17	18			

Das Ergebnis einer (willkürlichen) Auswahl einiger solcher 7-Loch-Bohrbilder zeigt Bild 37, und zwar oben mit vollständiger Abszisse und unten zwecks Detaillierung mit einem passenden Ausschnitt derselben. Es ergibt sich in allen Fällen, daß das Soll-

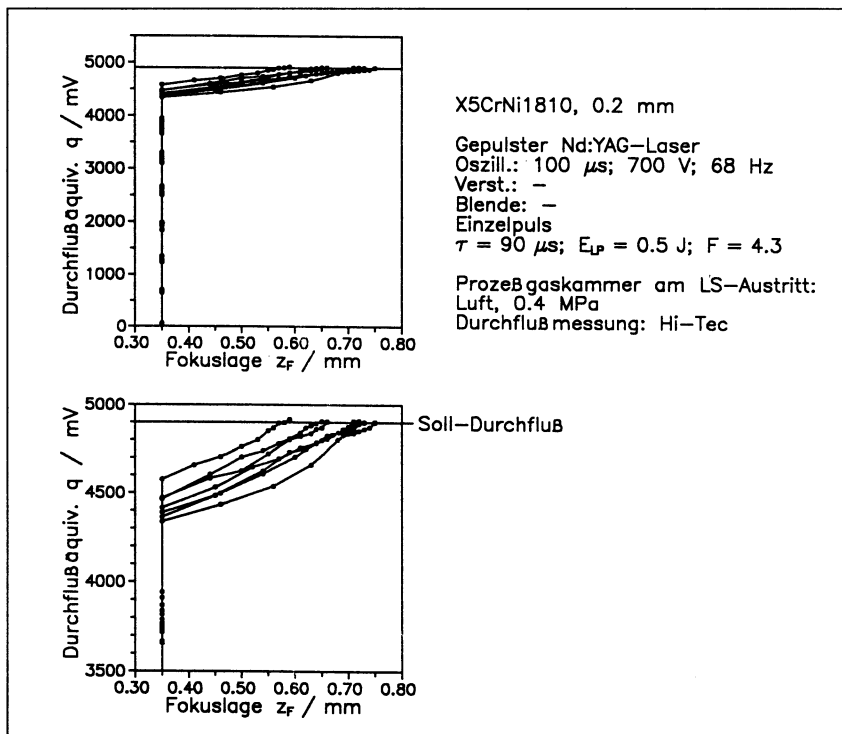


Bild 37: Durchflußgeregeltes Laserstrahlbohren mit Nacharbeit am Mittelloch von 7-Loch-Bohrbildern

Durchflußäquivalent am Schluß der jeweiligen Bearbeitung nur leicht verfehlt wird. Interessant ist ferner, daß das jeweilige 7te Loch mit recht unterschiedlichen Korrekturverläufen für die Fokuslagen nachgearbeitet wird. Dies ist eine gute Demonstration für die Adaptionfähigkeit der gewählten Regelstrategie an die bei einer jeden Bearbeitung auftretenden Bedingungen, das heißt an die jeweils gemessene Abweichung zwischen Ist- und Soll-Durchflußäquivalent.

Der Sachverhalt ist zahlenmäßig in Tabelle 6 wiedergegeben. Die Tabelle ist mit Tabelle 5 bis auf die hier ergänzten Zeilen "Loch 7 Ende" und "Bearbeitungsschritte" identisch. Die mit Regelung des Bearbeitungsprozesses hergestellten Lochbilder weisen gemäß Zeile "Loch 7 Ende" einen Variationskoeffizienten von nur  $v_q = 0,11$  % auf. Dieser Wert stellt im Vergleich zum bereits diskutierten Variationskoeffizient der

Bohrbilder, an denen die Regelung nicht eingesetzt wird ( $v_q = 1,7\%$ , Zeile "Loch 7 Anfang"), eine herausragende Verbesserung dar. Bei statistischer Betrachtung muß die Durchflußtoleranz  $T_q$  eines Loches oder Lochbildes  $T_q \geq \pm 4 v_q$  betragen, was im vorliegenden Fall den für eine Laserstrahlbohrbearbeitung sehr niedrigen Wert von  $T_q \approx 1\%$  ausmacht. Damit wird deutlich, daß die vorgestellte Regelung einen sehr effektiven Beitrag zur Reduzierung der Durchflußtoleranz laserstrahlgebohrter Löcher leistet.

Die letzte Zeile der Tabelle beinhaltet die Anzahl der zur Herstellung eines Lochbildes insgesamt benötigten Bearbeitungsschritte, die in diesem Fall identisch ist mit der Anzahl Laserstrahl-Einpulse. Sie dokumentiert, daß sich auch hier eine gewisse Schwankungsbreite einstellt.

Das Aussehen eines auf die beschriebene Weise hergestellten Lochbildes zeigt Bild 38 links. Während die 6 außenliegenden Löcher, die nicht nachgearbeitet sind, das übliche, schon in Bild 33 festgehaltene saubere Erscheinungsbild besitzen, ist das

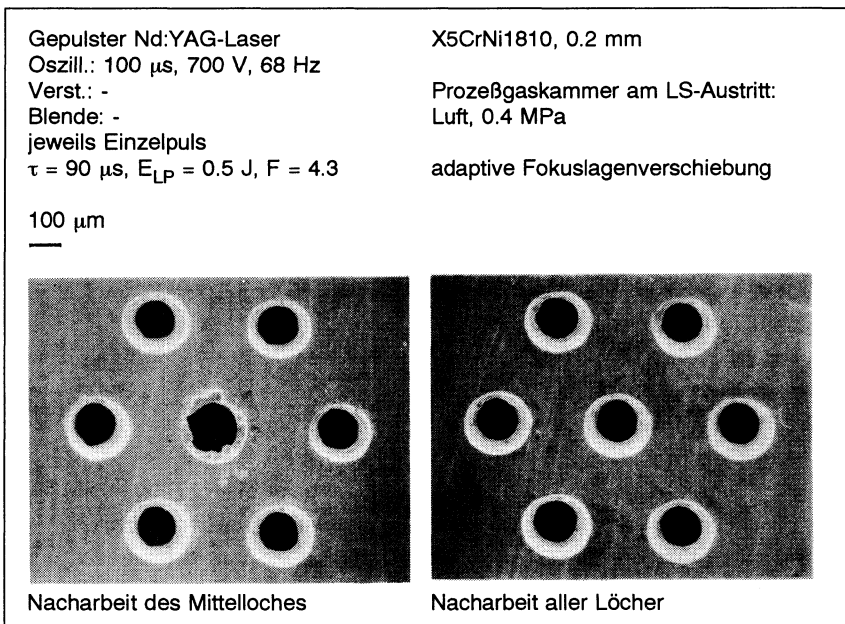


Bild 38: Aussehen nachgearbeiteter Mehrlochbilder

Mittelloch durch die an ihm erfolgte Nacharbeit verunstaltet. Damit wird ersichtlich, daß die Durchflußdifferenz, die durch die Nacharbeit zu überbrücken ist und deren Spannungsäquivalent nach Tabelle 6 im Mittel 475 mV (Mittelwerte "Loch 7 Ende" minus "Loch 7 Anfang") beträgt, zu hoch angesetzt ist. Die Bearbeitungsweise, die zwar einerseits durch die sehr enge erreichbare Durchflußtoleranz überzeugt, hat damit andererseits in der Bearbeitungsqualität Nachteile aufzuweisen.

### Nacharbeit aller Löcher

Als Abhilfe wird die Bearbeitungsstrategie dahingehend modifiziert, daß die Nacharbeit nunmehr an jedem der 7 Löcher durchgeführt wird, sie also auf alle Löcher verteilt wird. Wie bereits erwähnt, bedeutet ein Gesamt-Durchflußäquivalent von 4900 mV einen Beitrag pro Loch von 700 mV. Für die Regelung ergibt sich dementsprechend, daß für das erste Loch ein Soll-Durchflußäquivalent von 700 mV, für das zweite ein kumulierter Sollwert von 1400 mV und für die weiteren Löcher sukzessive Werte von 2100, 2800, 3500, 4200 und schließlich 4900 mV vorzugeben sind.

Das Aussehen der Löcher bessert sich merklich: Bild 38 illustriert dies rechts mit nur minimal gegenüber dem Zustand nach dem ersten Laserstrahlpuls (vgl. Bild links, außenliegende Löcher) verändertem Erscheinungsbild. Die 7 Löcher weisen große Gleichmäßigkeit untereinander auf und können von der Qualität her bedenkenlos mit solchen ohne Nachbearbeitung in Konkurrenz treten.

Das exemplarische Fertigungshistogramm in Bild 39 zeigt das Durchflußäquivalent  $q$  über der Position der Fokussieroptik  $z_M$ . Die Fokusslage  $z_F$  ist mit dem Eintrag " $z_F = 0,35$  mm" im Bild angedeutet und ist in der zu  $z_M$  entgegengesetzten Richtung orientiert, das heißt sie weist von rechts nach links im Graph steigende Werte auf. Es ist ferner zu beachten, daß die Abszisse in diesem Fall nur einen  $z_M$ -Bereich von 0,12 mm abdeckt, während dieser in Bild 37 immerhin 0,5 mm beträgt.

Der Graph läßt erkennen, daß die Einzellöcher sehr unterschiedlich bearbeitet werden. So treten Fälle auf, bei denen einzelne Löcher keiner Nacharbeit bedürfen, da der Durchfluß mit dem jeweils ersten Laserstrahlpuls die Sollmarke bereits überschreitet. Die Versuchspraxis zeigt andererseits aber auch, daß gelegentlich eine höhere Anzahl an Nachfolgepulsen zwecks Aufweitung des Loches vonnöten sein kann, vgl. Löcher Nr. 2 und 3 im Graph. An den kleinen  $z_M$ -Verfahrwegen, die immer



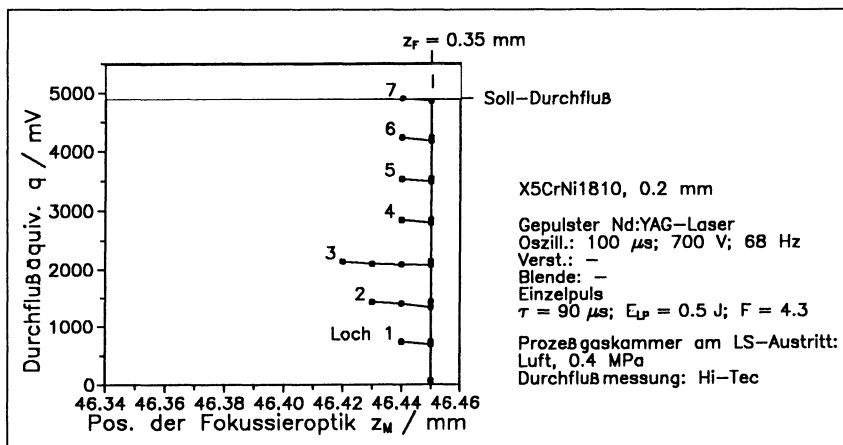


Bild 39: Exemplarisches Bohrhistogramm für Nacharbeit an allen Löchern eines 7-Loch-Bohrbildes

dem in der Software definierten Minimalwert von 0,01 mm entsprechen, kann indirekt ebenfalls abgelesen werden, daß die Abweichungen vom jeweiligen Sollwert vom Anbeginn der Nacharbeit an klein sein müssen. Eine detaillierte Untersuchung der (rechnerbasierten) Versuchsprotokolle ergibt, daß die anfänglichen Abweichungen der Durchflußäquivalente vom jeweiligen Sollwert zwischen 0 und 80 mV liegen. Beide Tatsachen, geringe Abweichungen und kleine Anzahl Bearbeitungsschritte, führen zu einer Überschreitung der Solldurchflußwerte um circa 0 bis 50 mV. Diese Überschreitungsbreite gilt auch für das 7te und letzte Loch, womit die Streuung des Gesamtdurchflusses durch das 7-Loch-Bohrbild wesentlich höher liegt als im vorher dargestellten Fall, bei dem nur das Mittelloch nachgearbeitet wurde.

Im Sinne einer Optimierung der beiden offensichtlich gegenläufigen Beurteilungskriterien Durchflußstreuung und Qualität wird ein weiterer Versuch unternommen, indem die Differenz zwischen Ist- und Soll-Durchflußäquivalent nach dem ersten Laserstrahlpuls im Vergleich zum letztgenannten Versuch vergrößert wird, um eine höhere Anzahl an Nachbearbeitungsschritten für jedes Loch zu erzwingen. Für besagte Differenzvergrößerung böten sich zwei gangbare Wege an: Änderung der Lasereinstellparameter, so daß sich kleinere Löcher ergäben, oder Anhebung des Soll-Durchflußäquivalents pro Loch. Im vorliegenden Fall wird letzteres von 700 mV in 800 mV geändert. Wegen des durch den Durchflußsensor auf 5000 mV begrenzten Maximalwerts wird die Anzahl der Löcher pro Bohr bild von 7 auf 6 reduziert. Die ku-

multierten Soll-Durchflußäquivalente betragen nunmehr 800, 1600, 2400, 3200, 4000 und schließlich 4800 mV.

Der Graph in Bild 40 veranschaulicht die neue Bearbeitungssituation: Für jedes Einzelloch, der um etwa 100 mV erhöhten Soll-Ist-Differenz des Durchflußäquivalents nach dem ersten Laserstrahlpuls entsprechend, sind mehrere Nachbearbeitungsschritte erforderlich. Die Endwerte des Durchflußäquivalents differieren nur noch um 0 bis maximal 25 mV vom jeweiligen Sollwert, was einer bemerkenswerten Verbesserung gegenüber dem Fall mit Soll-Durchflußäquivalent 700 mV pro Loch gleichkommt. Besonders hervorzuheben ist aber auch, daß die Qualität der Löcher nicht allzu stark unter der größeren Anzahl an Laserstrahlpulsen pro Loch leidet. Das Beispiel in Bild 41 dokumentiert mit Photos von der Laserstrahleintritts- und -austrittsseite des Werkstücks, daß sich nur geringfügig mehr Schmelzeablagerungen an den Lochwandungen bilden. Bei sehr kritischer Betrachtung läßt sich ferner feststellen, daß die Lochkante an der Laserstrahlaustrittsseite eine etwas stärkere Verrundung aufweist.

Die bisher dargestellten Beispiele zur Regelstrategie "adaptive Fokusslagenverschiebung" lassen die Schlußfolgerung zu, daß es für jede Aufgabenstellung ein Qualitätsoptimum gibt, daß sowohl einer engen Durchflußstreuung als auch den sonstigen

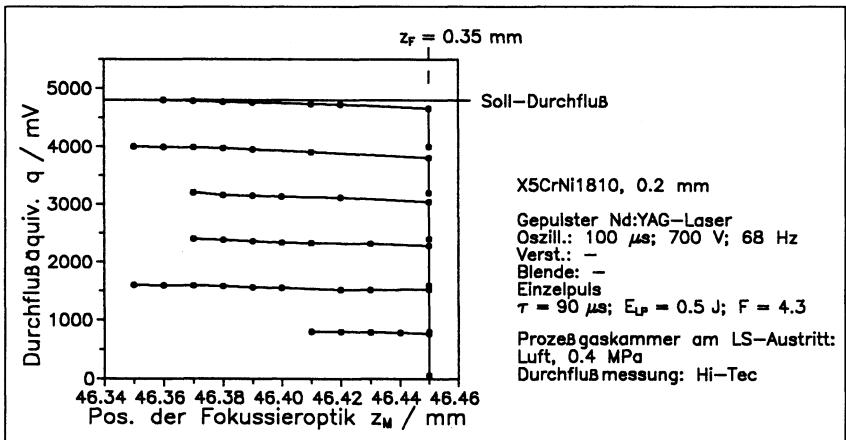


Bild 40: Exemplarisches Bohrhistogramm für Nacharbeit an allen Löchern eines 6-Loch-Bohrbildes

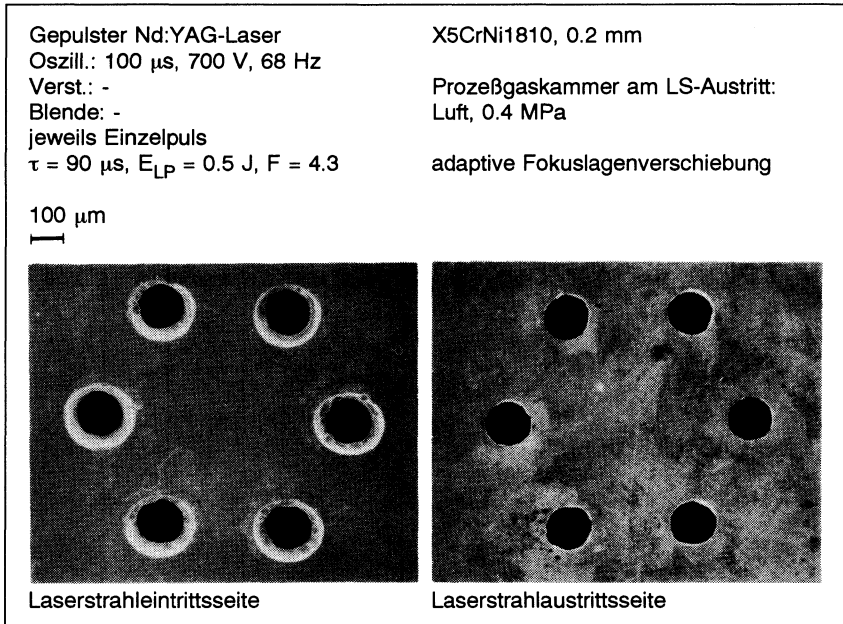


Bild 41: Aussehen des 6-Loch-Bohrbildes

angesetzten Qualitätskriterien Rechnung tragen kann. Der entsprechende Optimierungsprozeß kann, wegen der Vielzahl an beteiligten Parametern, nur empirisch erfolgen. Dazu ist eine von der menschlichen Intuition geleitete, iterative Herantastung unter Variation einiger der Parameter zu empfehlen, wofür die oben durchlaufene Vorgehensweise als Beispiel dienen mag.

#### 6.4.1.2 Bearbeitungsbeispiel 2: 0,5 mm dickes Blech, Simulation eines Mehrloch-bohrbildes

Im folgenden wird eine Versuchsreihe vorgestellt, die sich gegenüber dem bisher Dargestellten durch einige Besonderheiten auszeichnet: Es wird dickeres, und zwar 0,5 mm Blech bearbeitet. Die adaptive Fokusbahnenverschiebung zur Durchflußregelung findet erneut Anwendung, wobei der Berechnungsfaktor  $c$  für die Fokusbahnen-zustellung von  $1/8000$  über  $1/6300$  und  $1/5000$  bis  $1/4000$  mm/mV variiert wird. Des weiteren wird die Endbearbeitung eines Mehrlochbohrbildes in diesem Fall lediglich

Gepulster Nd:YAG-Laser  
 Oszill.: 100  $\mu$ s, 670 V, 88 Hz  
 Verst.: 100  $\mu$ s, 670 V  
 Blende: -  
 jeweils Einzelpuls  
 $\tau = 90 \mu$ s,  $E_{LP} = 0.8$  J,  $F = 5.6$

X5CrNi1810, 0.5 mm

Prozeßgaskammer am LS-Austritt:  
 Luft, 0.4 MPa  
 Durchflußmessung: Hi-Tec

Regelung:  
 $\Delta z_M = c \Delta q$ , Faktor  $c$  / mm/mV

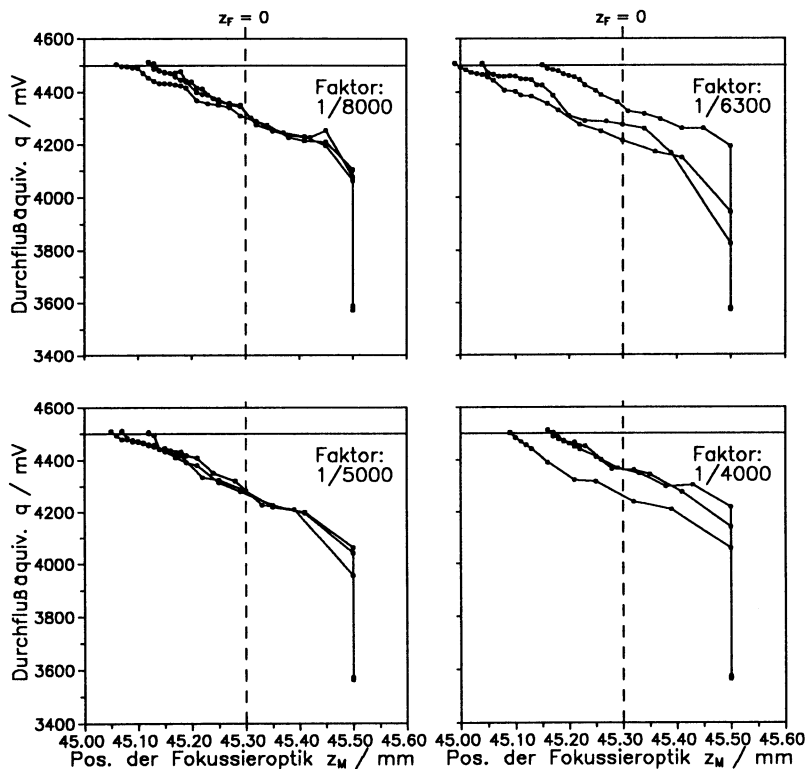


Bild 42: Bohrhistogramme zu Beispiel 2

simuliert, da auf das Anfertigen der ersten Löcher verzichtet und dafür ein by-pass über das Abflußventil der Prozeßgaskammer eingerichtet wird. Zweck des by-pass ist auch, den Durchflußsensor in seinem oberen Meßbereich betreiben zu können, wodurch sich die gemäß Bild 10 mit 0,2 % des Endwerts, das heißt 0,2 %

5000 mV = 10 mV, spezifizierte Meßreproduzierbarkeit, bezogen auf den größeren Betrag des Durchflußäquivalents, weniger stark bemerkbar macht. Der by-pass-Wert wird auf etwa 3500 mV, das Soll-Durchflußäquivalent mit 4500 mV definiert. In Bild 42 sind die Histogramme von je drei Bearbeitungen mit den vier oben genannten Faktoren festgehalten.

Die unterschiedlichen Berechnungsfaktoren beeinflussen weder den Ausgangswert, der einzig und allein dem unveränderlichen by-pass zuzurechnen ist, noch den Durchfluß nach dem ersten Laserstrahleinpuls. Eine Untersuchung der rechnergespeicherten Werte ergibt, daß der Durchflußäquivalent durch den by-pass im Mittel  $\bar{q} = 3573$  mV mit  $v_q = 0,20$  %, einem erwartungsgemäß kleinen Wert, ausmacht. Nach dem ersten Laserstrahlpuls ergeben sich diese Größen zu 4056 mV beziehungsweise 2,7 %. Beschönigend für den Variationskoeffizienten  $v_q$ , weil dessen absoluten Betrag reduzierend, wirkt sich hier der wegen der by-pass-Strömung erhöhte Gesamtdurchfluß aus. Dieser steht bekanntlich bei der Berechnung von  $v_q$  im Nenner.

Die Bohrregelung wird nun darauf angesetzt, das Soll-Durchflußäquivalent zu erreichen. Wie die Diagramme im Bild zeigen, geschieht das auch in diesem Fall mit großem Erfolg. Als Endergebnis stellt sich für die 12 Bearbeitungen  $\bar{q} = 4504$  mV bei  $v_q = 0,11$  % ein. Sowohl die Abweichung vom Soll-Durchflußäquivalent in Höhe von nur 4 mV als auch die geringe Streubreite sind als hervorragende Ergebnisse zu werten. Zur genannten Streubreite leistet der Versuch mit Faktor  $c = 1/4000$  mm/mV den größten Beitrag, da er sowohl den kleinsten (4501 mV) als auch den größten (4512 mV) Endwert beisteuert. Dies ist auf die sich aus dem vergleichsweise großen Faktor ergebende, relativ grobe Stufung der Fokuslagen zurückzuführen.

Der Faktor  $c$  zur Berechnung der Fokuslagenverschiebung wirkt sich auf die Anzahl der Bearbeitungsschritte bis zur Erreichung des Soll-Durchflußäquivalents aus, wie aus Tabelle 7 ersichtlich. Die Spalten "Bearbeitungsschritte" beziehen sich mit "min n" auf die Mindestanzahl, mit "max n" auf die Maximalanzahl sowie mit "med n" auf die mittlere Anzahl im Versuch vorgekommener Bearbeitungsschritte. Die Differenzen zwischen "max n" und "min n" zeigen auf, daß diese Anzahl doch erheblich schwankt, was aber offensichtlich keinen großen Einfluß auf die letztlich erzielte Streuung des Durchflußäquivalents hat. An der Spalte "med n" ist abzulesen, daß sich erwartungsgemäß ein in grober Näherung umgekehrt proportionales Verhalten der Anzahl Bearbeitungsschritte  $n$  mit dem Faktor  $c$  einstellt: Bei kleinem  $c$  ( $= 1/8000$  mm/mV),

was gemäß Gl. (18), (13) für kleine Zustellwege  $\Delta z_{M i}$  steht, ist die Schrittzahl groß, bei großem  $c$  ( $= 1/4000$  mm/mV) vergleichsweise klein.

Tabelle 7: Anzahl der Bearbeitungsschritte sowie End-Fokuslagen in Bearbeitungsbeispiel 2, Versuch nach Bild 42

Faktor $c$ / mm/mV	Bearbeitungsschritte			End-Fokuslagen		$\bar{z}_{M End}$ /mm	$\Delta z_{M End}$ /mm
	min $n$	max $n$	med $n$	$z_{M End}$ /mm	$z_{M End}$ /mm		
1/8000	19	25	21,7	45,05	45,12	45,09	0,07
1/6300	18	20	19,3	44,98	45,14	45,05	0,16
1/5000	13	18	16,0	45,04	45,11	45,07	0,07
1/4000	11	13	12,3	45,08	45,16	45,13	0,08

Der eindeutige Trend der Schrittzahl in Abhängigkeit vom Faktor  $c$  läßt sich erwartungsgemäß nicht für die am Ende der Bearbeitung erreichten Fokuslagen feststellen, wie in der Tabelle die Spalten "End-Fokuslagen" dokumentieren. Weder die jeweiligen Mittelwerte  $\bar{z}_{M End}$  noch deren Schwankungsbreite (Range)  $\Delta z_{M End}$  weisen einen erkennbaren Trend auf.

Aus den vorangegangenen Ausführungen geht hervor, daß der Unterschied zwischen dem Durchflußäquivalent nach dem ersten Laserstrahlpuls und dem Soll-Durchflußäquivalent im Mittel  $\Delta q = 444$  mV ( $= 4500$  mV -  $4056$  mV) ausmacht. Ein solch großer Differenzbetrag läßt nach den Erkenntnissen aus Bearbeitungsbeispiel 1 erwarten, daß das Erscheinungsbild der Löcher nicht gut sein kann. Dies wird von Bild 43 bedingt bestätigt: Das links gezeigte Ausgangsloch wird durch die Nacharbeit an seiner Mantelfläche mit dicken Schmelzeablagerungen überzogen, rechts im Bild. Die beidseitigen Werkstückoberflächen bleiben aber makellos sauber. Im übrigen wird durch die Anordnung der Schmelzeablagerungen eindeutig nachgewiesen, daß eine selektive Bearbeitung des Loches im Bereich der Laserstrahlaustrittskante erfolgt.

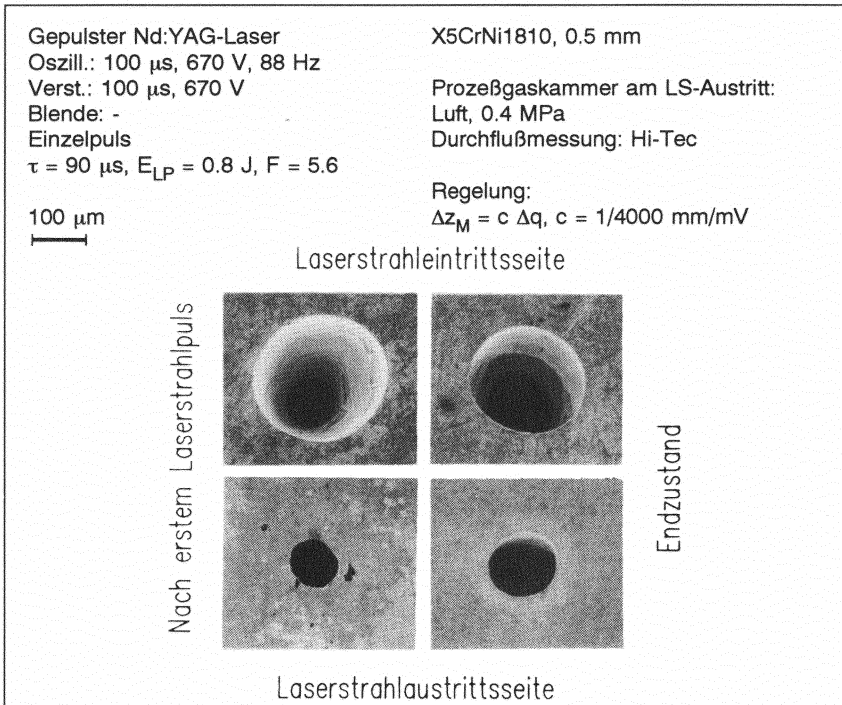


Bild 43: Aussehen der Löcher zu Bearbeitungsbeispiel 2

#### 6.4.1.3 Bearbeitungsbeispiel 3: 1,0 mm dickes Blech, zweistufige Einzellöcher

Bei einer Werkstoffdicke von 1,0 mm gelingt es nicht mehr ohne weiteres, die Regelstrategie der adaptiven Fokuslagenverschiebung erfolgreich einzusetzen. Die Begründung hierfür liegt im ungünstigen Schachtverhältnis der Löcher, das bei dieser Dicke und einem angenommenen Lochdurchmesser von 0,2 mm 5:1 betrage, aber auch ohne weiteres darüber liegen kann. Ein Erklärungsansatz ist, daß der Laserstrahl nicht ungehindert bis zum Austrittsbereich vordringen kann, sondern zum Teil an den Lochwandungen absorbiert und reflektiert wird. Es ergibt sich somit an der Nachbearbeitungsstelle des Loches ein Mix aus dem unveränderten Kernbereich und dem diffus reflektierten Randbereich des Laserstrahls, das nicht mehr die ursprüngliche Fokussierkaustik aufweist.

Als Abhilfe läßt sich unter den Annahmen, daß das zu fertigende Loch eine durch-

flußbestimmende Funktion wahrzunehmen hat, andererseits aber keinen allzu eng gefaßten Vorgaben für die Lochform unterliegt, eine Ausweichgeometrie nach Bild 44 vorschlagen. Ähnliche zweistufige Lochgeometrien finden an Spinddüsen [29], Ziehsteinen und Uhrenlagern Anwendung und sind auch im Zusammenhang mit dem Laserstrahlbohren bekannt [17, 137]. Wäre es zum Beispiel erforderlich, in ein Blech mit 1,0 mm Dicke ein Loch mit einem Minimaldurchmesser von 0,1 mm einzubringen, was der "Wunschkontur" im Bild entsprechen würde, so könnte diese durch die mit "tatsächliche Kontur" gekennzeichnete Form ersetzt werden. Die Laserstrahlbearbeitung müßte dann zweistufig erfolgen: Zunächst würde ein möglichst gut reproduzierbares Sackloch in das Werkstück eingebracht werden, das dann mit einem Durchgangsloch durch den Restquerschnitt vervollständigt zu werden hätte.

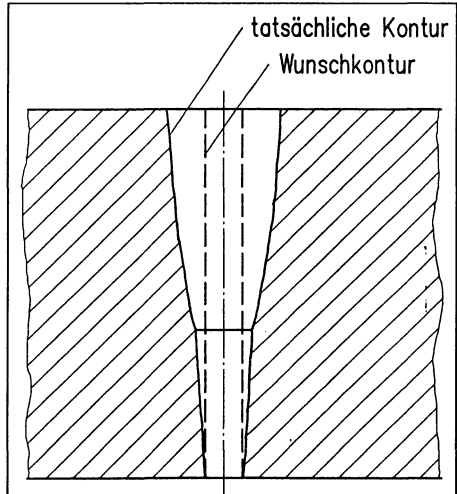


Bild 44: Prinzipskizze zum zweistufigen Laserstrahlbohren nach Bearbeitungsbeispiel 3

Die beschriebene Vorgehensweise wird probeweise und zunächst ohne Regelung realisiert. Die Parameter für die Vorbearbeitung, das ist die Herstellung des Sacklochs, werden aufgrund umfangreicher Vorversuche, bei denen mit unterschiedlichen Lasereinstellungen und Fokuslagen gebohrt und anschließend eine visuelle Begutachtung der Sacklöcher unter dem Mikroskop durchgeführt wird, festgelegt. Die wichtigsten Beurteilungskriterien sind zum einen eine gute Wiederholbarkeit der Geometrie, zum anderen ein sauberes, das heißt im wesentlichen gratfreies Erscheinungsbild auf der Werkstückoberfläche. Für die Löcher werden ein Durchmesser auf der Laserstrahleintrittsseite von grob 0,25 mm und eine Tiefe von im Mittel 0,5 mm angestrebt.

Analog wird für die Parameterauswahl für die Endbearbeitung, das heißt für die Herstellung des Durchgangslochs durch den Restquerschnitt, vorgegangen. Die Vorversuche werden hier konsequenterweise an einem Blech durchgeführt, das mit seiner Dicke von 0,5 mm dem angesprochenen Restquerschnitt in etwa entspricht.



Tabelle 8 zeigt die aus den Vorversuchen hervorgegangenen Lasereinstellenden sowohl für die Vor- als auch für die Endbearbeitung. Die Matrix in der Tabelle zeigt ferner, welche Kombinationen von Fokusalagen für beide Teilbearbeitungen ausprobiert werden. Die angegebenen Fokusalagen beziehen sich immer auf die Blechoberfläche; für die Endbearbeitung wird also keine neue Referenzfläche auf dem Grund des bei der Vorbearbeitung entstandenen Sackloches definiert.

Tabelle 8: Einfluß der Fokusalage der Teilbearbeitungsschritte auf den Durchfluß beim zweistufigen Bohren

X5CrNi1810, 1.0 mm

Prozeßgask. am LS-Austritt:  
Luft, 0.4 MPa  
Durchflußmessung: Hi-Tec

Gepulster Nd:YAG-Laser

Vorbearbeitung:

Oszill.: 160  $\mu$ s, 700 V, 43 Hz

Verst.: -

Blende: -

Einzel puls

$\tau = 150 \mu$ s,  $E_{LP} = 0.9$  J,  $F = 4.0$

Endbearbeitung:

Oszill.: 100  $\mu$ s, 700 V, 68 Hz

Verst.: -

Blende: -

Einzel puls

$\tau = 90 \mu$ s,  $E_{LP} = 0.5$  J,  $F = 4.3$

		Vorbearbeitung		
		$z_F$ / mm	0,40	0,65
End- bearb.	-0,10	A1 Sack- loch	A2 Sack- loch	A3 ----
	-0,35	B1 496 20,5	B2 314 27,7	B3 ----
	-0,60	C1 538 6,2	C2 497 12,0	C3 306 12,6

$= \bar{q}$  / mV

$= v_q$  / %

N = 7, bei C1 N = 14

Wird im gewählten Beispiel die Endbearbeitung mit  $z_F = -0,1$  mm durchgeführt, so läßt sich mit einem Laserstrahlpuls gemäß der ersten Zeile in der Matrix kein Durchgangsloch erzeugen. Wenn andererseits die Vorbearbeitung mit der relativ hoch angesetzten Fokusalage von  $z_F = +0,9$  mm erfolgt, ist das entstehende Sackloch so flach, daß sich nur bei einer Endbearbeitung mit  $z_F = -0,6$  mm, Matrixfeld C3, verwertbare Löcher ergeben. Diese sind aber vergleichsweise klein, wie der Mittelwert

des sich ergebenden Durchflußäquivalents beweist. Allein diese wenigen Feststellungen deuten an, wie schwierig sich die Optimierung der Bearbeitung wegen der Vielzahl an Freiheitsgraden gestaltet.

Die übrigen Ergebnisse in der Matrix seien hier auf die Feststellung zusammengefaßt, daß sich die beste Lochqualität mit der geringsten Streuung des Durchflußäquivalents von immerhin  $v_q = 6,2\%$  mit der Parameterkombination nach Matrixfeld C1 ergibt. Die Fokusslage  $z_F = +0,4$  mm für die Vorbearbeitung hat zur Folge, daß hierbei ein mit 0,6 mm vergleichsweise tiefes Sackloch geringen Durchmessers entsteht. Die darauffolgende Endbearbeitung wird mit der tiefliegenden Fokusslage von  $z_F = -0,6$  mm ausgeführt; der Strahlfokus befindet sich also, von der Tiefenschwankung der Vorbearbeitung abgesehen, auf dem Grund des Sackloches aus der Vorbearbeitung.

Bild 45 zeigt das zufriedenstellende Erscheinungsbild der nach Matrixfeld C1 hergestellten Löcher. Auch hier erweist sich, daß die beidseitigen Blechoberflächen frei von Werkstoffrückständen bleiben. Sowohl der Locheintritt als auch der Übergang zum zweiten Abschnitt können als rund bezeichnet werden, während der Lochaustritt dieses Attribut nicht mehr verdient.

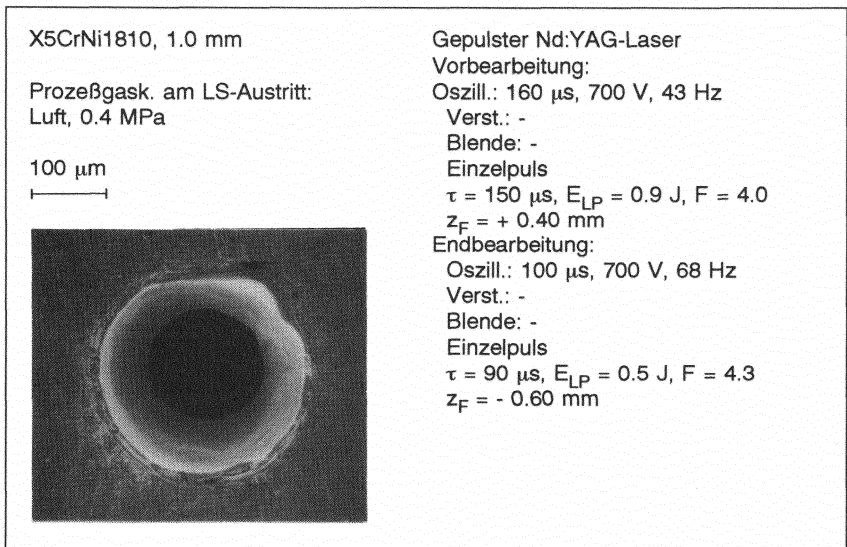


Bild 45: Aussehen eines Loches zu Bearbeitungsbeispiel 3

Im übrigen sei erwähnt, daß bei einer Bearbeitung mit zwei aufeinanderfolgenden Laserstrahlpulsen mit den Parametern gemäß der Vorbearbeitung C1 in Tabelle 8 aus den Sacklöchern gerade eben Durchgangslöcher werden, die einen Mittelwert des Durchflußäquivalents von nur 189 mV mit einem extrem hohen Variationskoeffizienten von circa 80 % aufweisen. Dies ist nicht verwunderlich, sind doch diese Parameter im Hinblick auf die Erzeugung eines hochwertigen Sackloches optimiert, weswegen die Fokusslage relativ hoch angesiedelt ist. Gelegentlich kann es sogar dazu kommen, daß ein Loch, wie Bild 46 zeigt, zwei Ausgänge besitzt. Steigt die Anzahl der Laserstrahlpulse auf 5, werden die Löcher erheblich in ihrem Durchmesser aufgeweitet und zeigen dann Durchflußäquivalente in der Größenordnung von 2250 mV.

Das zweistufige Bohren eignet sich auch für die Ermittlung des Werkstoffeinflusses auf die Bearbeitungsergebnisse: Zum einen stellt die eingesetzte Durchflußmessung gegenüber einer Durchmessermessung unter dem Mikroskop eine schärfere (bessere Auflösung) und objektivere (kein durch den Bediener verursachter Meßfehler) Beurteilungsmethode dar. Zum anderen wird der Werkstoffeinfluß besonders beim zweistufigen Bohren verstärkt: Schwankungen von Lochdurchmesser, -tiefe und insgesamt -form bei der Vorbearbeitung bedeuten unterschiedliche Ausgangszustände für die

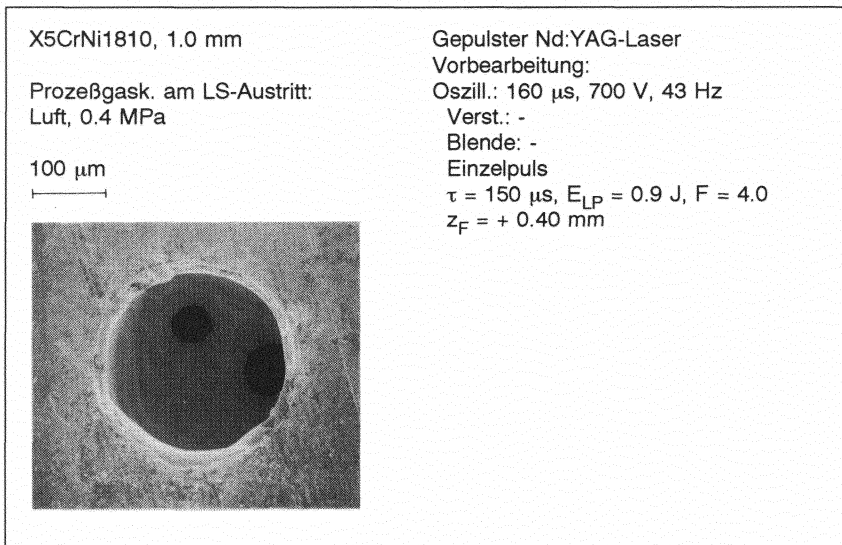


Bild 46: Loch mit zwei Ausgängen

Endbearbeitung. So geht beispielsweise eine stark unterschiedliche Lochtiefe aus der Vorbearbeitung sowohl unmittelbar auf die noch zu durchdringende Materialstärke als auch in die tatsächliche Laserstrahlfokuslage für die Endbearbeitung ein, so daß das Ergebnis letzterer deutlich verstärkten Schwankungen unterliegen müßte. Ein etwaiger Werkstoffeinfluß würde sich somit auf verstärkte Weise bemerkbar machen.

Die Untersuchung wird an 4 verschiedenen Stählen beziehungsweise Wärmebehandlungszuständen durchgeführt. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Die Durchflußmittelwerte liegen alle in etwa im jeweiligen Bereich von  $\bar{q} \pm s_q$ , die Unterschiede sind also nicht signifikant. Trotzdem gibt es Auffälligkeiten, die eine nähere Betrachtung verdienen: So steigt der Durchflußmittelwert  $\bar{q}$  tendenziell mit dem Anteil an Legierungselementen im Werkstoff, was im wesentlichen auf den Einfluß von Chrom auf Wärmeleitfähigkeit und Schmelzeviskosität eines Stahls zurückzuführen ist. Beim Vergleich der beiden Wärmebehandlungszustände des 16MnCr5-Stahls zeigt sich außerdem, daß die Oberflächenbeschaffenheit - beim unbehandelten Werkstoff das blankgeschliffene, beim wärmebehandelten das charakteristische schwarze Erscheinungsbild - einen Einfluß auf die Lochgeometrie hat. Der Erklärungsansatz liegt hier in den unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten: Die Einkopplung der Laserstrahlung wird im Falle des blanken Stahls gegenüber dem geschwärzten behindert.

Tabelle 9: Einfluß des Werkstoffs auf den Durchfluß beim zweistufigen Bohren

Werkstoff	Durchflußäquivalente-		-Var.koeff. $v_q / \%$	Proben- anzahl N / 1
	-Mittelwert $\bar{q} / \text{mV}$	-Stand.abw. $s_q / \text{mV}$		
X5CrNi1810	538	34	6,2	14
16MnCr5				
unbehandelt	481	41	8,6	7
aufgekocht, gehärtet	513	32	6,3	7
St1403	492	20	4,1	14

Bearbeitungsparameter nach Tabelle 8, Matrixfeld C1

Das Erscheinungsbild der Löcher wird höchstens in Nuancen vom Werkstoff beeinflusst. Bild 45 kann daher als stellvertretend für die 4 untersuchten Qualitäten gesehen werden.

Der Fall eines Bohrvorgangs mit Regelung wird an einem Bearbeitungsbeispiel, das auf den Einstellparametern aus Tabelle 8, Matrixfeld C1 basiert, demonstriert. Versuche erweisen, daß bei einem nur geringfügig über dem Durchflußäquivalent nach dem ersten Laserstrahlpuls liegenden Soll-Durchflußäquivalent dieses in ähnlich überzeugender Weise wie in Bearbeitungsbeispiel 1, Bild 40 erreicht werden kann. Für das im folgenden vorgestellte Bearbeitungsbeispiel wird das Soll-Durchflußäquivalent hingegen mit  $q_{\text{Soll}} = 1250 \text{ mV}$  verhältnismäßig hoch angesetzt, um die Einflüsse der variierten Versuchsparameter möglichst deutlich herausarbeiten zu können.

Bild 47 zeigt in der üblichen Darstellungsweise, wie sich das Regelverhalten in Abhängigkeit vom Berechnungsfaktor  $c$  verändert. Der Nenner von  $c$  nimmt dabei in einer geometrisch gestuften Reihe nach R10 [136] die Werte 10000, 8000, 6300, 5000, 4000, 3200, 2500, 2000, 1600 und 1250 mV/mm an. Details zu dem Versuch zeigt Bild 48. Die Anzahl an Bearbeitungsschritten  $n$  ist aus dem Diagramm oben zu ersehen. Mit  $1/c$  ergibt sich ein eindeutig ansteigender Trend für die notwendige Anzahl Bearbeitungsschritte, der aber durch eine sehr ausgeprägte Streubreite über-

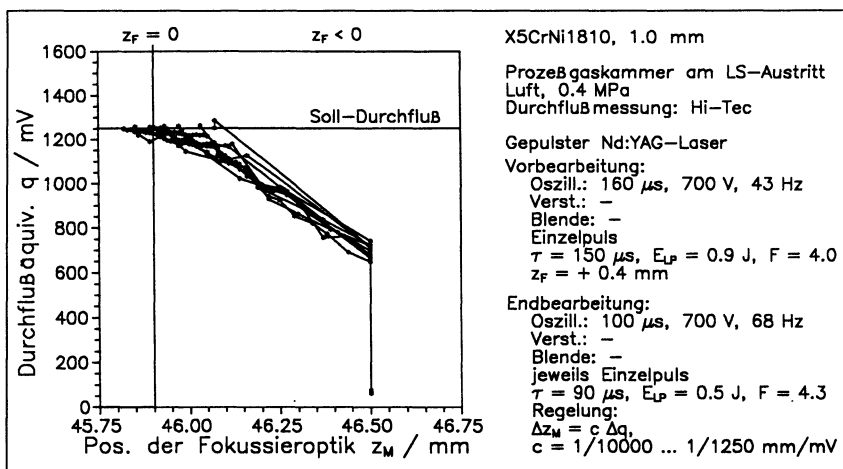


Bild 47: Bohrhistogramme zu Bearbeitungsbeispiel 3 unter Variation des Faktors  $c$

lagert ist. Besagter Trend entspricht den Erwartungen, da er sich aus der dieser Regelstrategie zugrundeliegenden Berechnungsformel für die Zustellwege ergibt: Ein großes  $1/c$  (kleines  $c$ ) resultiert in kleinen Zustellwegen  $\Delta z_M$ , wodurch insgesamt mehr Bearbeitungsschritte erforderlich werden, um das Durchflußziel zu erreichen. Die den Punkten im Diagramm bestangepaßte Kurve folgt einem logarithmischen Ansatz, der für die Anzahl Bearbeitungsschritte  $n$  in etwa ergibt:

$$n = 11,8 \ln c^{-1} - 79, \quad c \text{ in mm/mV.}$$

Für den Endwert  $q_{\text{End}}$  des Durchflußäquivalents, Diagramm in der Mitte, ergibt sich keine klare Abhängigkeit von  $1/c$ . Im Diagramm ist das Soll-Durchflußäquivalent von  $q_{\text{Soll}} = 1250 \text{ mV}$  mit einer durchgezogenen horizontalen Linie gesondert gekennzeichnet. Das eine Durchflußäquivalent, das kleiner ist als  $q_{\text{Soll}}$ , ist dadurch zu erklären, daß die Regel-Software nach Beendigung des Regelvorgangs noch eine Nachmessung des Durchflusses veranlaßt. Die Ver-

zögerungszeit zwischen den Laserstrahlpulsen und der jeweiligen Aufnahme des Meßwertes, die erforderlich ist zur Überbrückung der Einschwingzeit des Meßsensors auf den jeweils neuen Durchfluß, ist im Versuchsbetrieb kurz gewählt, so daß sich manchmal bei der Nachmessung ein geringfügig kleinerer Durchflußwert als derjenige, der zur Beendigung der Regelung geführt hat, ergibt.

Auch die Endposition der Maschinenachse  $z_{M \text{ End}}$  unten im Diagramm, zeigt keine

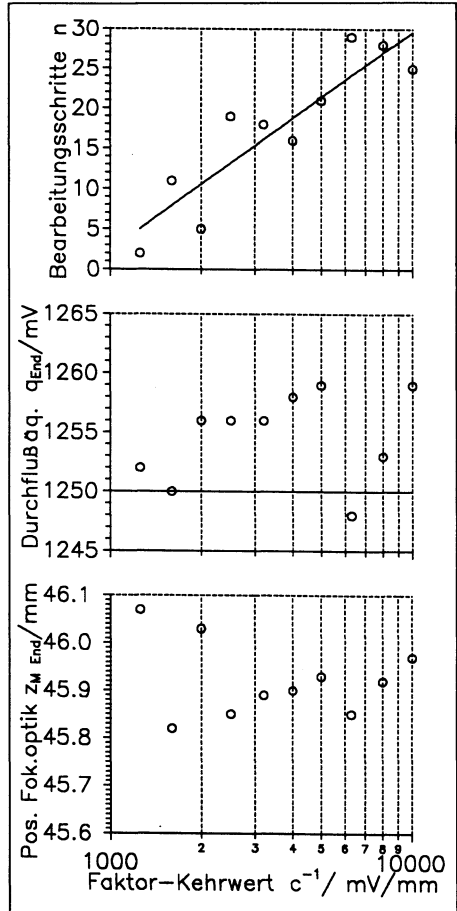


Bild 48: Detailauswertungen zu Bearbeitungsbeispiel 3

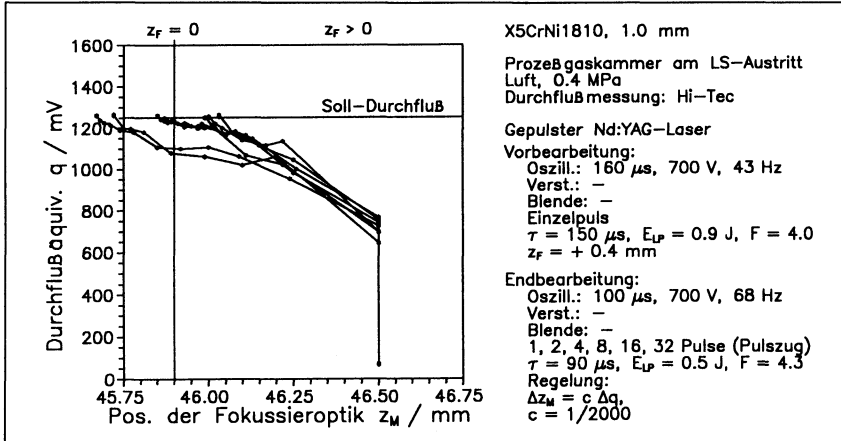


Bild 49: Bohrhistogramme zu Bearbeitungsbeispiel 3 unter Variation der Anzahl Laserstrahlpulse N für jeden Bearbeitungsschritt

eindeutige Abhängigkeit von  $1/c$ . Die Schwankungsbreite von  $z_{M\text{ End}}$  beträgt fast 0,3 mm; der mittlere Verfahrenweg  $\Delta z_M = (z_{M\text{ Anfang}} - z_{M\text{ End}})$  unter Berücksichtigung von  $z_{M\text{ Anfang}} = 46,5$  mm etwa 0,5 mm. Werden beide Werte in Relation zueinander gesehen, so ist die Schwankungsbreite beträchtlich.

Der Versuch nach Bild 49 beinhaltet die Variation der Anzahl Laserstrahlpulse N pro Bearbeitungsschritt. Es werden dabei entweder Einzelpulse oder Pulszüge mit 2, 4, 8, 16 beziehungsweise 32 Pulsen eingesetzt. Eine der weit nach links laufenden Kurven ist die für Pulszüge mit je 8 Pulsen. Dieser Verlauf stellt sich in der in Bild 50 festgehaltenen Wiederholungsreihe mit unveränderten Versuchsparametern als Ausreißer, das heißt als eher seltenes Ereignis dar.

In Ergänzung zu den beiden letztgenannten Bildern ist Bild 51 mit der Abhängigkeit verschiedener Bearbeitungskenngrößen von der Anzahl Laserstrahlpulse N aufschlußreich. Das Diagramm oben steht für die erforderliche Anzahl Bearbeitungsschritte n, die mit N leicht ansteigt. Die bestapproximierte Kurve ist diesmal linear:

$$n = 0,27 N + 7,0 .$$

Bezüglich der beiden folgenden Diagramme für das Durchflußäquivalent  $q_1$  nach dem ersten durchgängigen Laserstrahlpuls und das am Ende der Bearbeitung erreichte

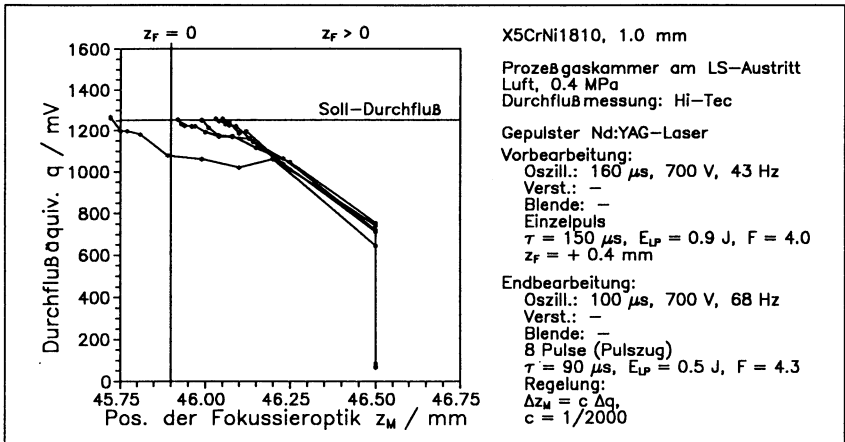


Bild 50: Wiederholbarkeit eines Bohrhistogramms zu Bearbeitungsbeispiel 3

Durchflußäquivalent  $q_{\text{End}}$  sei hervorgehoben, daß sich die Streubreite von circa 130 mV für  $q_1$  auf 20 mV für  $q_{\text{End}}$  reduziert. Dieser Erfolg ist der Regelung im Bohrvorgang zuzuschreiben. Eine statistische Betrachtung zu den Durchflußwerten folgt unten.

Die Endlage der Fokussieroptik, das heißt der Maschinenkoordinate  $z_{M \text{ End}}$  weist andeutungsweise einen Trend auf, der sich am besten durch einen logarithmischen Kurvenverlauf approximieren läßt:

$$z_{M \text{ End}} = - 0,0575 \ln N + 46,0 .$$

Unter Berücksichtigung der Anfangskoordinate  $z_{M \text{ Anfang}} = 46,5$  mm bedeutet das negative Vorzeichen des logarithmischen Terms in obigem Ausdruck, daß die Fokusslage ( $z_F$ ) umso stärker angehoben werden muß, je größer die Anzahl Laserstrahlpulse pro Bearbeitungsschritt  $N$  ist. Dies steht mit der obigen Beobachtung in Einklang, daß mit  $N$  die benötigte Anzahl Bearbeitungsschritte  $n$  ansteigt.

Über die in den Bildern 47 bis 51 dargestellten Versuche ergibt sich nach dem jeweiligen ersten Laserstrahlpulszug der Endbearbeitung ein gemittelttes Durchflußäquivalent von  $\bar{q}_1 = 707$  mV mit  $s_{q_1} = 34$  mV und  $v_{q_1} = 4,8$  %. Die Endwerte nach der geregelten Bohrbearbeitung betragen  $\bar{q}_{\text{End}} = 1255$  mV und, trotz der stark unterschiedlichen



Histogramme,  $s_{q_{\text{End}}} = 4,4 \text{ mV}$  und  $v_{q_{\text{End}}} = 0,35 \%$ . Beim letztgenannten Betrag ist zu berücksichtigen, daß er auf einen vergleichsweise kleinen Absolutwert bezogen ist und dadurch groß erscheint. Insbesondere angesichts der erschwerten Bearbeitungsbedingungen im Vergleich zu dünnerem Blech ist die durch die Regelung erbrachte Eineingung der Durchflußsteuerung auch hier überzeugend.

Zum Abschluß bezüglich der Regelstrategie mit adaptiver Fokuslagenverschiebung sei an einem Beispiel aufgeführt, was bei schlechter Anpassung der Variablen in dieser Regelstrategie passieren kann: Im Versuch nach Bild 52 soll ein zweistufiges Loch auf ein Soll-Durchflußäquivalent von  $q_{\text{Soll}} = 4000 \text{ mV}$  mit Faktor  $c = 1/8000 \text{ mm/mV}$  aufgearbeitet werden. Entsprechend der sehr großen Differenz zwischen Soll- und dem Durchflußäquivalent nach dem ersten durchgängigen Laserstrahlpuls wird die Achse  $z_M$  in sehr großen Schritten zugestellt. (Diesbezüglich beachte man den im Vergleich zu den bisherigen Bildern um in etwa den Faktor 10 erweiterten  $z_M$ -Bereich in der Abszisse des Diagramms.) Nach den ersten drei  $z_M$ -Zustellungen erfolgt mit dem jeweiligen Laserstrahlpulszug ein Materialabtrag am Werkstück, der sich in der dokumentierten Vergrößerung des Durchflußäquivalents niederschlägt. Danach aber trifft der Laserstrahl bereits derart defokus-

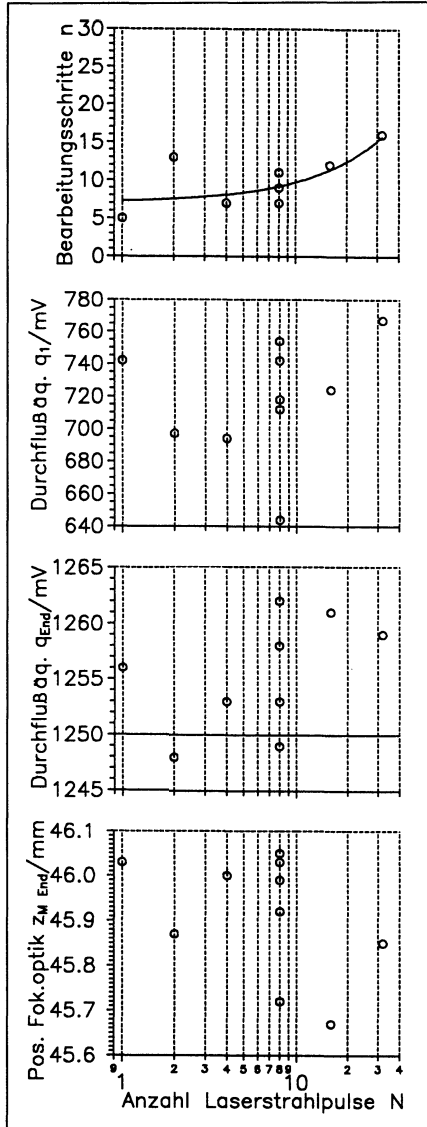


Bild 51: Detailsauswertungen zu Bearbeitungsbeispiel 3 unter Variation der Anzahl Laserstrahlpulse N

siert auf das Werkstück, daß sich keine weitere Beeinflussung des Durchflußwertes ergibt. Für die Regel-Software bleibt jedoch die Soll-Ist-Differenz erhalten, und die Fokuslagenverschiebung wird mit konstantem  $\Delta z_M$  von Regelschritt zu Regelschritt fortgesetzt. Ein solcher Zustand muß von der Software erkannt und abgestellt werden können, um einen unnötigen Zeitverlust, hauptsächlich aber auch die Gefährdung von Mensch und Maschine durch unkontrollierte Laserstrahlemission sowie durch eine mögliche Kollision von Maschinenteilen auszuschließen. Gegen eine solche Fehlfunktion ist, wie in Kapitel 4 beschrieben, in der Versuchs-Software eine vereinfachte Absicherung implementiert: Die Anzahl der Bearbeitungsschritte ist auf  $n \leq 40$  limitiert.

Zweierlei Abhilfemaßnahmen können für den soeben geschilderten Fall vorgeschlagen werden: Zum einen könnte die Soll-Ist-Durchflußdifferenz entweder durch die Verkleinerung des Solls oder durch angepaßte Laserstrahlparameter, die zu einem Loch mit größerem Durchfluß führten, reduziert werden. Andererseits könnte aber auch der Faktor  $c$  deutlich verringert, der Nenner darin also vergrößert werden, was kleinere Zustellwege  $\Delta z_M$  zur Folge hätte.

#### 6.4.2 Regelstrategie "konstante Fokuslagenverschiebung"

Im folgenden wird diskutiert, in welchen Anwendungsfällen die Regelstrategie mit konstanter Fokuslagenverschiebung zweckmäßig ist. Die Argumentation basiert auf den Erkenntnissen zur im vorangegangenen Abschnitt behandelten Regelstrategie mit adaptiver Fokuslagenverschiebung. Entsprechend ihrer in Kapitel 4 dargestellten, einfacheren Berechnungsformel böte die nichtadaptive Variante den Vorteil, für die Bedienperson transparenter zu sein, was zu einem besseren Verständnis des Bearbeitungsvorgangs beitrüge. Zum anderen impliziert diese Regelstrategie nur einen Freiheitsgrad, nämlich die konstante Koordinatenverschiebung  $\Delta z_M$ , wodurch sich eine Optimierung des Bohrprozesses einfacher gestaltete.

Besonders an Bearbeitungsbeispiel 1 zur adaptiven Regelstrategie wird klar, daß sich die besten Ergebnisse hinsichtlich des Erscheinungsbildes der Löcher bei kleinen Nacharbeitsumfängen erzielen lassen. Anhand von Bild 40 wird exemplarisch gezeigt, daß die Differenz zwischen dem Solldurchfluß und demjenigen nach dem ersten Laserstrahlpuls in einem solchen Fall klein sein muß. Unter Einsatz der adaptiven Regelstrategie bedeutet dies wiederum, daß auch die Zustellwege  $\Delta z_M$  immer klein sind. Sie sind im letztgenannten Bild zudem meist gleich der kleinsten Schrittweite der

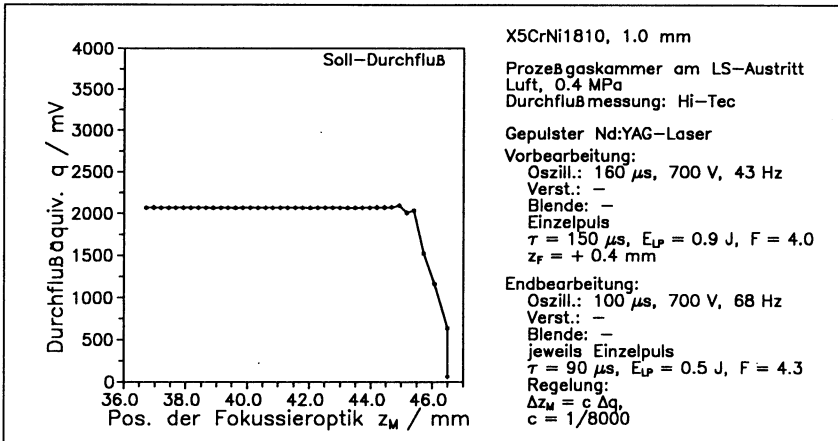


Bild 52: Bohrhistogramm einer mißlungenen Bearbeitung in Anlehnung an Bearbeitungsbeispiel 3

Positioniereinheit von 0,01 mm. Gerade das ist aber ein Anwendungsfall, auf den die konstante Fokuslagenverschiebung bestens zugeschnitten wäre: Mit konstantem  $\Delta z_M = 0,01$  mm wäre die Regelung genauso effektiv wie ihre adaptive Variante.

Anderenfalls aber, wenn unter Inkaufnahme eines schlechteren Erscheinungsbildes der Löcher größere Durchflußdifferenzen zu überbrücken sind, mangelt es der Regelstrategie mit konstanter Fokuslagenverschiebung an der wünschenswerten Anpassungsfähigkeit: Wird  $\Delta z_M$  mit einem großen Wert versehen, kann die am Ende der Bearbeitung erforderliche Feinanpassung der Lage  $z_M$  nicht stattfinden und es resultieren zwangsläufig größere Durchflußabweichungen vom und -streuungen um den Sollwert. Wenn aber umgekehrt  $\Delta z_M$  klein gewählt wird, um jenen Sollwert möglichst genau einhalten zu können, erfolgt zu Beginn der geregelten Nachbearbeitung kein Grobtrag und die Bearbeitungszeiten verlängern sich unverhältnismäßig. (Es sei daran erinnert, daß die Fertigungszeit im wesentlichen durch die Durchflußmessung bestimmt wird. Selbst bei Einsatz schneller Durchflußsensoren bleibt die eigentliche Prozeßzeit, das heißt die Dauer des eingesetzten Laserstrahleinpulses beziehungsweise -pulszuges, vernachlässigbar.) In gewissen Fällen, wenn die angesprochene Durchflußdifferenz nicht zu hohe Werte annimmt, ist vorstellbar, daß mit einem sorgfältig abgestimmten (festen)  $\Delta z_M$  ein tragbarer Kompromiß zwischen der Anzahl an Bearbeitungsschritten und der letztendlich erzielten Durchflußstreuung zu finden sein muß.

### 6.4.3 Regelstrategie "Spiralbahn"

Als dritte Alternative für eine Approximationsstrategie an einen vorgegebenen Durchfluß wird in Kapitel 4 das Abfahren einer in der Werkstückebene gelegenen Spiralbahn vorgeschlagen. Neben den Lasereinstellparametern und der Fokusslage sind dabei die Spiralenparameter Bahnabstand  $a$  und Bogenlänge  $b$  vorzuwählen. Aus der Wahl der Lasereinstellparameter, zu denen hier auch insbesondere der Modenblendendurchmesser  $d_{Ap}$  gezählt wird, ergibt sich der Fokussdurchmesser  $d_{LF}$ . Die Spiralenparameter sind dazu passend zu definieren.

Aus Versuchen ergibt sich exemplarisch, daß bei Einsatz der Modenblende mit  $d_{Ap} = 4,4$  mm und den Lasereinstellparametern  $t$ ,  $U$ ,  $f$  gemäß Bild 53 mit Laserstrahleinzelpulsen qualitativ hochwertige Löcher mit  $d_j = 0,12$  mm und  $d_o = 0,08$  mm zu erzielen sind. Wird die Anzahl der Pulse auf, wie für den Versuch gewählt,  $N = 4$  erhöht, ergibt

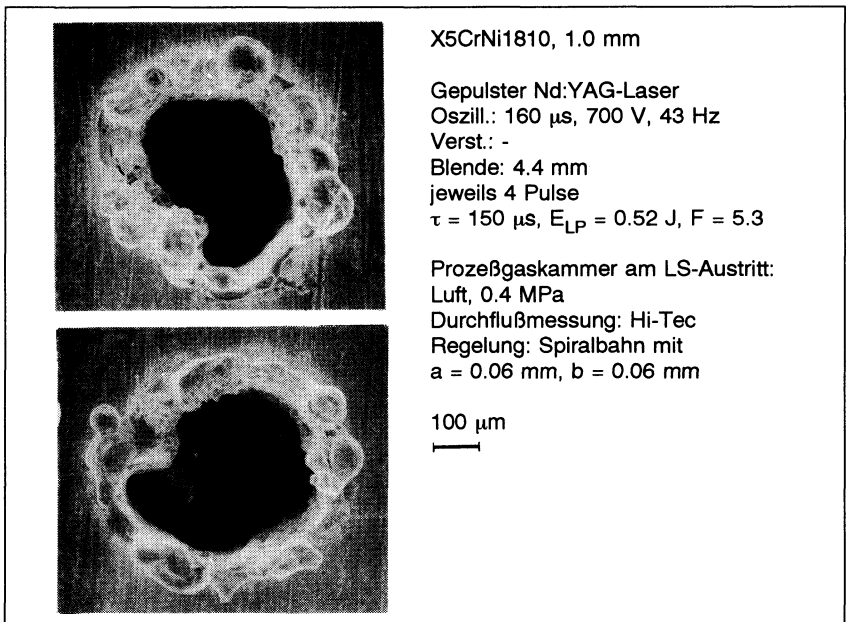


Bild 53: Aussehen von mit Regelstrategie "Spiralbahn" hergestellten Löchern

sich ein vergrößerter Ausgangsdurchmesser  $d_o$ , das heißt eine annähernd zylindrische Lochgeometrie.

Eine der unendlich vielen Möglichkeiten zur Festlegung der Spiralenparameter besteht darin,  $a = b = \frac{1}{2} d_{LF}$  zu machen. Unter der bereits in Kapitel 2 getroffenen Annahme, daß  $d_{LF} = d_i$ , ergeben sich daraus quer und längs der Spiralbahn Überlappgrade von  $\dot{U}_a = \dot{U}_b = \frac{1}{2}$ , insgesamt betrachtet also ein Überlappgrad von  $\dot{U}_t = \frac{1}{4}$ . Dieser Wert bedeutet anschaulich, daß von Laserstrahlpuls zu -puls in grober Näherung ein Quadrant eines vollen Kreises mit dem Lochdurchmesser  $d_i$  abgetragen wird. Es sei darauf hingewiesen, daß weder  $\dot{U}_b$  noch  $\dot{U}_t$  mit einem gleichwertigen Überlappgrad beim Laserstrahlschneiden, wo sichelförmige Werkstoffpartien von Puls zu Puls bearbeitet werden, verglichen werden darf.

Aufgrund der eingangs des Abschnittes erwähnten Lasereinstellungen wird dementsprechend für das im folgenden aufgeführte Bearbeitungsbeispiel gewählt:  $a = b = 0,06$  mm. Die tatsächlich von der Positioniereinheit angesteuerten Maschinenkoordinatenpaare  $(x_M, y_M)$  zeigt Bild 54. Die Spiralbahn ist, von den unvermeidlichen, durch die Minimalschrittweite der Positioniereinheit von 0,01 mm bedingten Rundungsfehlern abgesehen, sauber zu erkennen. Die tatsächlich abgefahrene Bahn ist jedoch noch vom Positionierverhalten der beiden Maschinenschlitten abhängig. So macht sich der Umkehrfehler, der für die eingesetzte Positioniereinheit mit maximal 0,01 mm gemessen wurde, einmalig oder bei langen Spiralen sogar mehrmalig bemerkbar.

Die bei der Bearbeitung erzielte Qualität der Löcher zeigt Bild 53 in einer photographischen Aufsicht auf die Laserstrahleintrittsseite einer Versuchsprobe. (Die Diskrepanz in den Spiraldrehrichtungen in diesem und dem vorangegangenen Bild erklärt sich aus der unterschiedlichen Anordnung der Koordinatensysteme: Während in Bild 54 die Achse  $z_M$  aus der Ebene des Papiers heraus zeigt, ist sie in Bild 53 in das Papier hinein

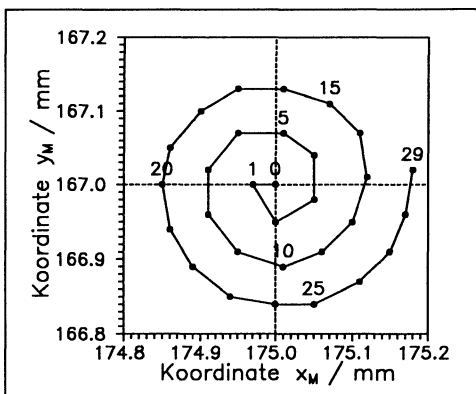


Bild 54: Verfahrenweg der Positioniereinheit zu Bearbeitungsbeispiel "Spiralbahn"

orientiert. Bild 54 entspricht demnach einer Ansicht der Bearbeitungsstelle "von unten", das heißt gegen die Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls.)

Am Photo sind starke Schmelzeablagerungen am Rande des Lochs sowie dessen hohe Rauigkeit erkennbar. Diese sind weder mit einer Erhöhung des Gasdrucks noch durch die Wahl eines von seiner Laserstrahlbearbeitbarkeit her günstigeren Stahls zu vermeiden. Auch die eingebrachte Laserstrahlleistungsdichte von  $I_{LPi} = 0,31 \text{ MW/mm}^2$  ist ausreichend für gute Bohrergebnisse, wie die erwähnten Vorversuche beweisen, und läßt sich mit der gegebenen Laserstrahlquelle nicht mehr wesentlich steigern. Eine gewisse Verbesserung läßt sich erzielen, wenn ein kleineres Schachtverhältnis, zum Beispiel bei geringerer Blechdicke, vorliegt. Dabei ist nämlich in Relation zum unveränderten Strahlquerschnitt, oder äquivalenterweise Lochdurchmesser, ein geringeres Werkstoffvolumen aus der Bearbeitungsstelle zu entfernen.

Das Erscheinungsbild ist derart enttäuschend, daß diese Art der Lochbearbeitung grundsätzlich ob ihrer praktischen Anwendbarkeit in Frage gestellt werden muß. Im folgenden werden, der Vollständigkeit halber, ergänzende Versuchsauswertungen vorgestellt. Am Ende des Kapitels werden Vorschläge für eine Weiterentwicklung der Verfahrens im Hinblick auf eine Verbesserung der Qualität vorgetragen.

Die Entwicklung des Durchflußäquivalents mit der Anzahl Bearbeitungsschritte zeigt Bild 55 für insgesamt 6 Bearbeitungsversuche. Diese sind durch unterschiedliche Soll-Durchflußäquivalente gekennzeichnet, und zwar  $q_{\text{Soll}} = 1250, 1600, 2000, 2500, 3200$

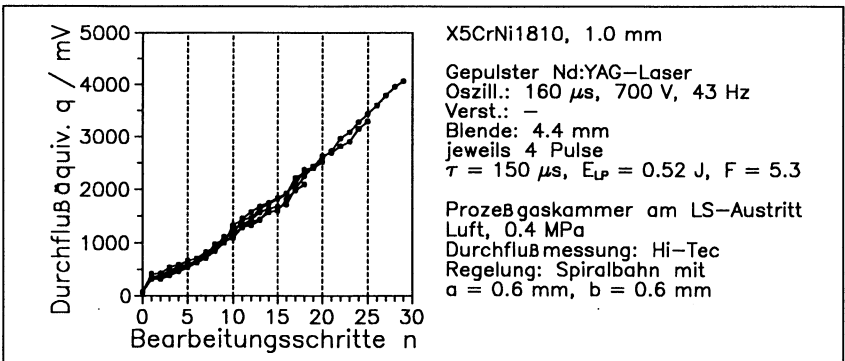


Bild 55: Bohrhistogramme zu Bearbeitungsbeispiel "Spiralbahn"

und 4000 mV. Die Bearbeitungsschritte sind auch in Bild 54 in Form der Numerierung an den Spiralpunkten eingetragen, wodurch die Bearbeitungsfolge anschaulich zu verfolgen ist. Es zeigt sich anhand der Versuche, daß die Durchflußwerte innerhalb eines schmalen Bandes verlaufen. Ab etwa dem 5ten Bearbeitungsschritt steigen sie linear an; die approximierte Gerade ergibt sich etwa zu

$$q / \text{mV} = 140 n - 120 ,$$

mit  $n$  = Anzahl Bearbeitungsschritte.

Die Durchflußäquivalente am Ende der Bearbeitung weichen stark vom Soll-Durchflußäquivalent ab, Bild 56. Für die 6 Versuche ist die Abweichung vom jeweiligen Sollwert über besagtem Sollwert aufgetragen. Außerdem werden die abgespeicherten Versuchsdateien daraufhin untersucht, mit welchem Durchflußäquivalent sie ein (gedachtes) gemeinsames Soll-Durchflußäquivalent von  $q_{\text{Soll}} = 1250 \text{ mV}$  erreicht beziehungsweise überschritten haben. Das Ergebnis findet sich über besagtem  $q_{\text{Soll}}$ -Wert und macht deutlich, daß die Schwankungsbreite sehr groß ist: Der Mittelwert der Abweichung beträgt  $\bar{\Delta q} = 64 \text{ mV}$ , mit  $s_{\Delta q} = 66 \text{ mV}$  und  $v_{\Delta q} = 5,3 \%$ . Eine Erklärung läßt sich auch dem folgenden Bild entnehmen, das zunächst erläutert wird.

Bild 57 stellt die bereits erwähnte Abweichung  $\bar{\Delta q}$ , Dreiecke im Bild, und die Anzahl Bearbeitungsschritte  $n$ , Kreise, für die einzelnen Löcher dar. Eine Korrelation beider Größen ist nicht feststellbar. Zur Erreichung des Soll-Durchflußäquivalents sind zwischen 10 und 11 Bearbeitungsschritte erforderlich, das heißt pro Schritt ergibt sich im Mittel ein Zuwachs des Durchflußäquivalents von 125 mV. Die Berechnungsweise impliziert die Annahme, daß der Durchfluß von Anbeginn an linear mit der Anzahl Bearbeitungsschritte wächst. Gemäß Bild 55 ist dies nicht zutreffend. Es gilt vielmehr, und zwar besonders ab Schritt Nr. 5, die oben aufgeführte Approximations-

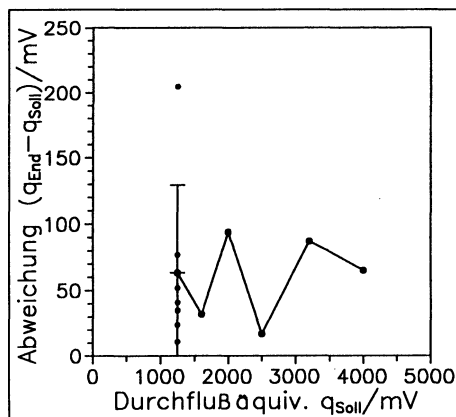


Bild 56: Detailauswertung zu Bearbeitungsbeispiel "Spiralbahn"

gerade. Der Steigungsfaktor beträgt demnach 140 mV pro Bearbeitungsschritt. Somit verwundert es nicht, daß die Genauigkeit des Verfahrens nicht besser sein kann als das oben aufgeführte  $s_{\Delta q}$ .

Um dieses Ergebnis zu verbessern, böte sich die folgende Verfeinerung der Regelstrategie an: Der bisher feste Spiralenparameter  $a$  könnte bei Annäherung der Istgröße an die Sollgröße entsprechend verkleinert werden, so daß im Grenzfall  $a \rightarrow 0$  und die Spiralbahn zur Kreisbahn werden würde. Der dann variable Spiralenparameter  $a_i$  könnte beispielsweise definiert werden als

$$a_{i+1} = c (q_{\text{Soll}} - q_i) , \text{ mit } c = \text{const} \tag{20}.$$

Der  $(i+1)$ -te Spiralenpunkt mit den Koordinaten  $(x_{M\ i+1}, y_{M\ i+1})$  müßte dann nach dem  $i$ -ten Bohrvorgang jeweils aus dem festen  $b$  und dem durchflußadaptiv bestimmten  $a$  errechnet werden. Die oben aufgeführte Berechnungsformel für  $a_{i+1}$  könnte entweder von Anbeginn der Bearbeitung oder erst nach Überschreitung einer vorab definierten Durchflußschwelle gültig sein.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise wäre nicht nur in Anbetracht der genaueren Einhaltung des Solldurchflusses von Vorteil. Die Lochform, die in den bisherigen Versuchen deutlich die bei Erreichung des Solldurchflusses abgebrochene Spiralbahn erkennen läßt, würde "geglättet" werden. Die sich ergebende Lochkontur wäre kreis-, ungünstigstenfalls ellipsenähnlich.

Es bliebe jedoch das unsaubere Erscheinungsbild der Löcher mit den großen aufgeworfenen Graten am Lochrand und einer hohen Rauigkeit an der Lochwandung. Es

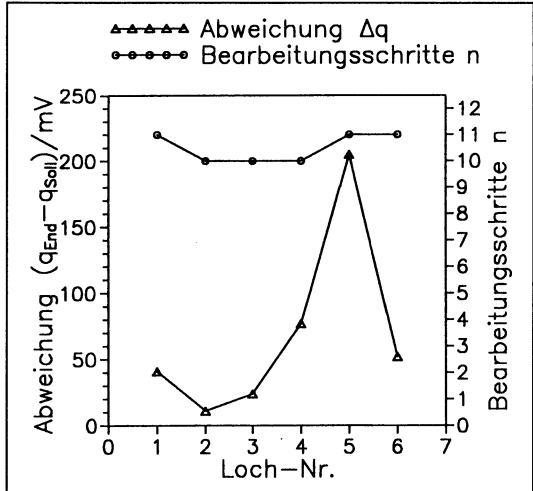


Bild 57: Detailauswertung zu Bearbeitungsbeispiel "Spiralbahn"



ist ein Ergebnis der ungünstigen Prozeßgasführung, da es der sich aus dem Überdruck in der Prozeßgaskammer aufbauende Gasstrom offensichtlich nicht vermag, die schmelzflüssigen Werkstoffanteile derart in Bewegung zu versetzen, daß ein Anhaften an Lochwandung und -rand sicher vermieden werden kann. Des weiteren ist von Nachteil, daß das Prozeßgas wegen der in den Versuchen eingesetzten Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite gegen die Laserstrahlrichtung strömt. Während der Laserstrahl entsprechend seiner Ausbreitungsrichtung den Werkstoff von oben nach unten bearbeitet, steht der Gasdruck nur unten an und kann somit nicht wesentlich zum Bearbeitungserfolg beitragen.

Ein Lösungsvorschlag sei dem Laserstrahlfein- und -feinstschneiden entliehen: Mit diesem Fertigungsverfahren werden heute Schnittfugenbreiten unter  $50\ \mu\text{m}$  bei geringer Rauigkeit erreicht. Maschinenseitig sind für solche Erfolge zum einen ein Nd:YAG-Laser bester Strahlqualität und zum anderen die Gasführung über eine formoptimierte Düse bei hohen Drücken Voraussetzung. Der in dieser Arbeit eingesetzte Laser würde unter Einsatz der Modenblenden die Strahlqualitätsanforderungen ohne weiteres erfüllen. Das Werkstück würde wie gehabt auf der Laserstrahlaustrittsseite gasdicht mit dem Durchflußmeßgerät verbunden sein, während auf der Laserstrahleintrittsseite koaxial zum Laserstrahl eine Düse angeordnet wäre. Die Steuerung des Bearbeitungsprozesses müßte derart gestaltet werden, daß während der eigentlichen Laserstrahlbearbeitung das Prozeßgas über die Düse auf das Werkstück geblasen und, dazu intermittierend, über die Prozeßgaskammer die Durchflußmessung durchgeführt werden würde. Die Laserstrahlbearbeitung bestünde, wie oben für die Regelstrategie "Spiralbahn" beschrieben, aus Einzelpulsen beziehungsweise kurzen Pulszügen an jedem der errechneten Spiralenpunkte.

## 7 Ergänzende Hinweise für die industrielle Anwendung des durchflußgeregelten Laserstrahlbohrverfahrens

Für eine industrielle Umsetzung des durchflußgeregelten Laserstrahlbohrens ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens von ausschlaggebender Bedeutung. Die Wirtschaftlichkeit wird im wesentlichen durch einerseits die Investitionskosten für die Bearbeitungsanlage, andererseits die Gesamtbearbeitungszeit für ein Loch beziehungsweise ein Lochbild bedingt. Im folgenden werden Lösungsvorschläge vorgestellt, die auf eine Minimierung besagter Bearbeitungszeiten abzielen.

Allen dargestellten Bearbeitungsvarianten mit integrierter Durchflußmessung ist gemeinsam, daß die Dauer eines Bearbeitungsvorgangs im wesentlichen durch die Meßzeiten bestimmt wird, die laseraktive Zeit dagegen vernachlässigbar ist. Werden beispielhaft für die Einschwingzeit des Meßsensors 20 s und für die laseraktive Zeit eine Pulsperiode von  $T = 10 \text{ ms}$  (Pulsfrequenz  $f = 100 \text{ Hz}$ ) angesetzt, so ergibt sich

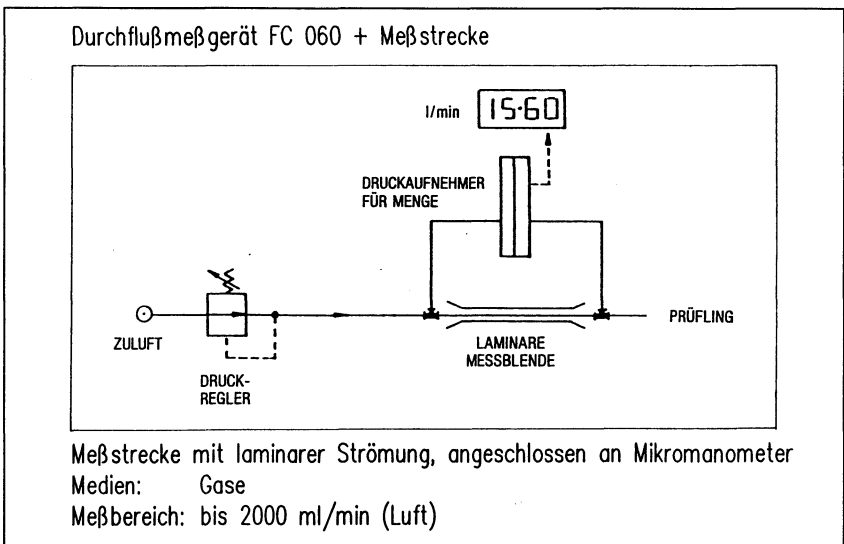


Bild 58: Prinzipskizze des Laminarstrom-Differenzdruck-Geräts zur Messung pneumatischer Durchflüsse [138]

die Relation von Bohr- zu Meßzeit zu 1:2000. Solch ungünstige Verhältnisse sind für eine industrielle Umsetzung des durchflußgeregelten Laserstrahlbohrens untragbar; im Sinne der Wirtschaftlichkeit muß es gelingen, den Anteil der Meßzeiten herabzusetzen.

Eine Minimierung der Meßzeiten läßt sich durch Einsatz eines möglichst schnellen Durchflußmeßgerätes erreichen. Eine Marktrecherche, basierend auf den Kriterien aus Tabelle 1, läßt einen Laminarstrom-Differenzdruck-Messer als besonders geeignetes Gerät hervortreten. In einem solchen Sensor wird der Differenzdruck in einer Meßstrecke, die vom Gas in einem laminaren Strömungszustand durchflossen wird, abgegriffen und mit einem Manometer hoher Auflösung gemessen, Bild 58. Der Differenzdruck ist, im Gegensatz zum Sensor nach dem thermischen Wirkprinzip, dem Volumenstrom  $q_v$  proportional. Der physikalische Zusammenhang kommt in der Gleichung von Hagen-Poiseuille [132] zum Ausdruck:

$$q_v = \frac{\pi r^4}{8 \eta l} (p_1 - p_2) \quad (21),$$

mit

$r$  = wirksamer Radius der Meßstrecke,

$\eta$  = dynamische Zähigkeit des Fluids,

$l$  = wirksame Länge der Meßstrecke und

$(p_1 - p_2)$  = Differenzdruck an der Meßstrecke.

Der Massenstrom läßt sich mit  $q_m = \rho q_v$  aus dem Volumenstrom berechnen.

Aus einem Vergleichsversuch sind in Bild 59 die Einschwingkurven des in dieser Arbeit eingesetzten thermischen Meßgerätes und eines marktüblichen Differenzdruck-sensors [138] gegenübergestellt. Das Bild zeigt, daß der Differenzdruckmesser (FC) bei einem plötzlichen Anstieg des Luftdurchflusses aus dem Ruhestand auf einen Wert, der exemplarisch etwa  $1500 \text{ ml}_n / \text{min}$  beträgt, nach etwa 0,5 s einen stabilen Wert anzeigt, während der gleichzeitig messende thermische Sensor (Hi-Tec) dafür eine Zeit von über 20 s benötigt.

Bei gegenüber dem eingangs aufgeführten Beispiel unveränderter Pulsperiode verbessert sich mit dem Differenzdruckmesser die Relation produktiver zu unproduktiver Zeiten auf 1:50. Die Herstellung eines Loches unter Zuhilfenahme der Bohrregelung mit Fokuslagenverschiebung, bei der zum Beispiel 5 Bearbeitungsschritte

erforderlich wären, benötigte dann unter 3 s, Verfahrzeiten der Positioniereinheit zur Fokuslagenverschiebung inbegriffen.

Ein zweiter wesentlicher Beitrag zur Senkung der Bearbeitungszeit besteht in der Minimierung der Anzahl Bearbeitungsschritte zur Herstellung eines Loches beziehungsweise Lochbildes. Gemäß Kapitel 6 liegt das Optimum für die gegenläufigen Größen Durchflußstreuung und qualitatives Erscheinungsbild bei etwa 2 bis 4 Nachbearbeitungsschritten pro Loch. Die - in der Regel empirische - Optimierung der Bearbeitungsparameter für eine gegebene Bohraufgabe muß demnach darauf abzielen, über die Herstellung eines jeweils geeigneten Ausgangsloches sowie die Wahl passender Regelparameter besagte Anzahl an Nachbearbeitungsschritten zu erreichen.

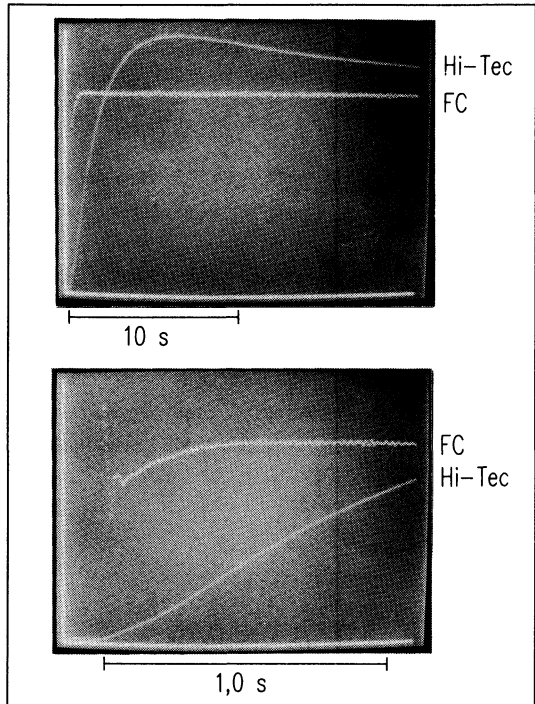


Bild 59: Ansprechverhalten des Laminarstrom-Differenzdruck- (FC) und des thermischen (Hi-Tec) Durchflußmeßgerätes

Des weiteren kann die Bearbeitungsdauer ganz wesentlich durch Vermeidung unnötiger Meßvorgänge eingeschränkt werden. Insbesondere bei Bohrvorgängen mit vielen Nachbearbeitungsschritten ist es zweckmäßig, die Durchflußmessung, und damit die eigentliche Regelung, nur wenige Bearbeitungsschritte vor Erreichen des Soll durchflusses zu aktivieren.

Die Meßzeiten können aber auch dadurch reduziert werden, daß die Einschwingkurven der Durchflußmeßgeräte rechnerseitig verfolgt werden, um noch vor Erreichen des jeweiligen Endwertes dessen Erwartungsbereich zu antizipieren. Insbesondere bei

einer Grobbearbeitung zu Beginn eines geregelten Bohrvorganges kann bereits mit diesem Erwartungsbereich der nächste Bearbeitungsschritt eingeleitet werden, und die Bearbeitungszeit läßt sich insgesamt senken.

Als weiterer Ansatz im Sinne einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit sollte die Meßzeit zur zeitparallelen Bearbeitung auf mehreren Arbeitsstationen genutzt werden. Dies kann durch eine Aufteilung der Laserstrahlung über marktübliche Strahlweichen, erforderlichenfalls in Verbindung mit Lichtleitkabeln zur flexiblen Strahlführung, bewerkstelligt werden. Eine Laserstrahlquelle kann somit intermittierend mehrere Arbeitsstationen versorgen.

Für die Bearbeitungsvariante mit Regelung nach dem Spiralbahnverfahren wird eine wirksame Abhilfe für das schlechte Erscheinungsbild in einer Verfahrensmodifikation gesehen, bei der das Prozeßgas bei jedem Bearbeitungsschritt wie beim Laserstrahlschneiden mittels einer koaxial zum Laserstrahl angeordneten Düse zugeführt wird. Intermittierend dazu wird unter Zuhilfenahme einer Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite des Werkstücks der Durchfluß durch das Loch ermittelt, um so die Steuergröße für die Regelung zu gewinnen. Die sich zwangsläufig ergebenden längeren Bearbeitungsnebenzeiten müßten im industriellen Einsatz durch eine Verteilung des Laserstrahls auf mehrere solcher Bearbeitungsstationen erfolgen.

## 8 Zusammenfassung

Wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Reduzierung der Durchflußtoleranzen von laserstrahlgebohrten Löchern auf unter 1 % des Durchflußmittelwerts. Dies entspricht einer Reduzierung um etwa eine Größenordnung gegenüber herkömmlichen Laserstrahlbohrbearbeitungen und gelingt durch das neuartige Konzept der in-process-Messung des Durchflusses an Prozeßgas durch das in Bearbeitung befindliche Loch und darauf basierender Regelung der Bohrbearbeitung.

Die Lochgrößendiagnose über die Durchflußmessung bedient sich im vorgestellten Versuchsaufbau eines kommerziell erhältlichen, thermisch messenden Durchflußsensors. Für eine industrielle Anwendung, bei der es auf ein möglichst genaues, aber auch schnelles Meßgerät ankäme, ist ein solches nach dem Differenzdruckverfahren an einer laminar durchströmten Meßstrecke zu empfehlen.

Voraussetzung für die Durchflußmessung ist eine gasdichte Verbindung zwischen der zu bearbeitenden Stelle am Werkstück und dem Durchflußmeßgerät. Für ebene, in der Regel als Blech vorliegende Werkstücke werden Spannvorrichtungen vorgeschlagen, die eine sogenannte Prozeßgaskammer beinhalten. Eine solche Kammer kann prinzipiell entweder auf der Laserstrahleintritts- oder auf der -austrittsseite des Werkstücks angeordnet sein; die Erfahrung zeigt jedoch, daß sich erstere wegen der unvermeidlichen Verschmutzung des Glasfensters für die Laserstrahlung nicht bewährt. Die Versuche werden demnach mit einer Prozeßgaskammer auf der Laserstrahlaustrittsseite durchgeführt, an der -eintrittsseite steht die Umgebungsluft an. Die Zuführung des Gases geschieht demzufolge nicht über eine Düse, wie es zum Beispiel beim Laserstrahlschneiden generell oder auch teilweise beim Laserstrahlbohren, zum Beispiel von Turbinenschaufeln, praktiziert wird.

Durch den Einsatz der rechnerbasierten Regeleinrichtung läßt sich ein Loch durch gezielte Laserstrahlnachbearbeitung in seinem Durchflußwert korrigieren und einem vorab festgelegten Solldurchfluß annähern. Als Regelgröße wird der momentane Durchflußwert, als Stellgrößen alle Einstellparameter der Laseranlage, das heißt des Laseraggregats und der Positioniereinheit, genutzt.

Als effektivste Regelstrategie bewährt sich diejenige mit adaptiver Fokusalagenverschiebung, bei der nach Herstellung eines Ausgangslochs mit einem ersten Laserstrahleinpuls die Differenz zum Sollthrough rechnerisch ermittelt und proportional dazu die Anhebung der Fokusalage vorgenommen wird. Dadurch, daß der Laserstrahl mit seinem nach dem Fokus wieder divergierenden Abschnitt im wesentlichen auf den Bereich der Laserstrahlaustrittsseite am Werkstück trifft, wird diese Partie bevorzugt von der Nacharbeit betroffen. Es resultieren laserstrahlgebohrte Löcher mit einer Durchflußstreuung von  $6 \nu_q \leq 1 \%$  bei für das Laserstrahlbohren qualitativ zufriedenstellendem Erscheinungsbild.

Letzteres ist im wesentlichen von der Differenz zwischen dem Sollthrough und demjenigen nach dem ersten Durchbruch des Loches abhängig: Ist die Differenz zu groß, ergeben sich auffällige Aufschmelzungen an Lochrand oder -wandung. Ist die Differenz andererseits zu klein, kann die Regelung nicht effektiv eingreifen, um den Sollthrough präzise erreichen zu können. Das Optimum bezüglich der Laserstrahlparameter und besagter Durchflußdifferenz muß für jeden Bearbeitungsfall empirisch ermittelt werden.

Der Regelungsvorgang stößt bei Löchern mit einem Schachtverhältnis ab etwa 5:1 an Grenzen, weil der Werkstoffabtrag durch die Laserstrahlpulse nicht mehr definiert und selektiv im Bereich der Laserstrahlaustrittskante erfolgen kann. Am Beispiel eines 1,0 mm dicken Bleches wird demonstriert, daß sich diese Schwierigkeit mit zweistufigen Löchern umgehen läßt: In das Werkstück wird zunächst ein Sackloch vergleichsweise großen Durchmessers eingebracht, auf dessen Grund das eigentlich durchflußbestimmende Loch durch den Materialrestquerschnitt hergestellt wird. An letzterem kann die Durchflußregelung dann erfolgreich eingesetzt werden.

Die zweite vorgeschlagene Regelstrategie mit konstanter Fokusalagenverschiebung ist der ersterwähnten ähnlich, wobei die Fokusalage aber von Bearbeitungsschritt zu Bearbeitungsschritt um einen festen Betrag angehoben wird. Die nichtadaptive Fokusalagenverschiebung eignet sich besonders für Fälle, in denen die Abweichung des Durchflusses vom ersten Loch zum Sollwert gering ist, was mit kleinen Zustellwegen für die Fokusalage zu korrigieren ist. Sie ersetzt demzufolge die softwareseitig etwas aufwendigere adaptive Variante, wenn diese wegen nur kleiner Durchflußabweichungen nicht zweckmäßig eingesetzt werden kann.

Für eine dritte Regelstrategie, bei der eine Spiralbahn abgefahren wird, läßt sich die

Effektivität zur gezielten Vergrößerung eines Durchflußwertes ebenfalls nachweisen. Die sich ergebenden Durchflußabweichungen vom vorgegebenen Soll durchfluß sind jedoch im Mittel deutlich größer als bei den zwei vorgenannten Regelstrategien. Größter Nachteil bei der Bearbeitung nach dem Spiralbahnverfahren ist aber die schlechte Qualität der hergestellten Löcher, die extrem mit Graten und Werkstoffaufwürfen an der Laserstrahleintrittsseite des Werkstücks behaftet sind. Diese Aufwürfe ergeben sich aus der ungünstigen Prozeßgasführung, die durch den Einsatz einer Prozeßgaskammer gegeben ist.

Die vorgestellten Regelstrategien haben gemeinsam, daß sie als Stellgrößen die Parameter der Positioniereinheit verwenden. Denkbar ist auch, eine Approximation an den Soll durchfluß durch eine Anpassung der Laserstrahleigenschaften im Laufe des geregelten Bohrvorgangs zu erreichen.

Eine Modenblende im Laserresonator ist ein probates und einfaches Mittel, die Strahlqualität eines Lasers zu verbessern. Sie wird immer dann eingesetzt, wenn es auf besonders filigrane Bearbeitungen ankommt. Mit einer solchen Blende kann der Strahl des hier eingesetzten Laseraggregats derart modifiziert werden, daß Löcher mit Durchmessern deutlich unter  $50\ \mu\text{m}$  bei guter Qualität gefertigt werden können. Kleine Strahldurchmesser sind aber auch dann von Interesse, wenn, wie zum Beispiel beim durchflußgeregelten Bohren nach dem Spiralbahnverfahren, ein nur kleiner Zuwachs des Lochquerschnitts für jeden abgegebenen Laserstrahleimpuls benötigt wird.

Für eine industrielle Umsetzung des durchflußgeregelten Laserstrahlbohrens ist neben den angesprochenen technologischen Aspekten die Wirtschaftlichkeit von überragender Bedeutung. Sie läßt sich insbesondere durch eine Minimierung der Gesamtbearbeitungszeit pro Loch beziehungsweise Lochbild optimieren. Da diese Bearbeitungszeit im wesentlichen durch die Zeiten für die Durchflußmessung bedingt ist, werden verschiedene Ansätze zur Vermeidung beziehungsweise Minimierung derselben vorgestellt: Einsatz eines schnellen Meßsensors, Minimierung der Anzahl Bearbeitungsschritte, Messung erst kurz vor Erreichen des Soll durchflusses und/oder zeitparallele Bearbeitung auf mehreren Bearbeitungsstationen mit nur einem Laser.



## Literatur

- [1] König, W.; Schmitz-Justen, C.; Trasser, Fr.-J.; Willerscheid, H.: Zusammenstellung der Terminologie zum Laserstrahlschneiden. Annals of the CIRP 38 (1989) 2, 683-688
- [2] Norm DIN V 18730 01.1991. Laser und Laseranlagen: Grundbegriffe der Lasertechnik
- [3] Norm DIN 32511 Entwurf 03.1991. Elektronen - und Laserstrahlverfahren zur Materialbearbeitung: Begriffe für Verfahren und Geräte
- [4] Norm ISO/TC 172/SC 9/WG 1, Third Working Draft, 02.1991. Terminology, Symbols and Units of Measure for the Specification and Testing of Lasers and Laser Systems
- [5] Norm VDI/VDE 2040 Bl.1-5 01.1970 - 01.1991. Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren
- [6] Norm DIN 1319 Teil 3 08.1983. Grundbegriffe der Meßtechnik - Begriffe für die Meßunsicherheit und für die Beurteilung von Meßgeräten und Meßeinrichtungen
- [7] Anders-von Ahlfthen, A.; Altheide, H.-J.: Laser - das andere Licht. Stuttgart: TRIAS, 1989
- [8] Schutzrecht DT 2415971 (1974). Lasag S.A.
- [9] Bolin, St. R.: Nd:YAG Laser Applications Survey. In: Bass, M. (ed.): Laser Materials Processing. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1983
- [10] Loosen, P.; Treusch, H.G.; Herziger, G.: Lasersysteme für die Materialbearbeitung (CO<sub>2</sub>- und Festkörperlaser). Feinwerktechnik & Meßtechnik 93 (1985) 5, 222-233
- [11] Niederhauser, H.N.: Ziehsteine vom Laser gebohrt. Drahtwelt 74 (1988) 4, 32-34
- [12] Müräu, H.: Hochdruckwasserstrahl als Schneidwerkzeug für dreidimensionale Bearbeitung. wt Werkstattstechnik 80 (1990), 99-101
- [13] Hildebrandt, U.: Der Einfluß des "thermal-lensing"-Effekts bei der Materialbearbeitung mit Festkörperlasern. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser/Optoelektronik in der Technik - Vorträge des 9. Internationalen Kongresses Laser 89 Optoelektronik. Berlin: Springer, 1990

- 
- [14] Hillebrand, F.-J.: Laserbohren in organischem Leiterplatten-Material. Feinwerktechnik & Meßtechnik 91 (1983) 2, 56-58
- [15] Lenk, P.: Keramikbearbeitung mit Laser. Elektronik, Produktion & Prüftechnik 1990 7/8
- [16] Rose, B.: Mikromechanik: Ein Schuß Licht. Wirtschaftswoche 43 (1989) 23, 82
- [17] Schutzrecht DE 3933448-A1 (1990). Rolls-Royce plc
- [18] Schutzrecht EP 0385911-A1 (1990). United Technologies Corporation
- [19] Lenz, E.; Schachrai, A.; Shpitalni, M.: An Automatic Laser Beam System for Production Holes in Polyethylene Irrigation Pipes. wt - Zeitschrift für industrielle Fertigung 69 (1979) 621-623
- [20] Allen, D.M.: Design and production of small hole profiles in thin materials. Chartered Mechanical Engineer 28 (1981) 3, 37-40
- [21] Beyer, G.; Gerlach, B.; Henkel, E.; Ben-Mizzian-Palma, M.: Multilayerbohren - Microbohren: Bohrmaschine in höchster Technologie. Metalloberfläche 42 (1988) 8, 388-392
- [22] Farnum, G.T.: Microdrilling: the expanding market for small holes. Manufacturing Engineering 97 (1986) 1, 28-31
- [23] Gerlach, B.: Zunehmend schneller: Mikrolochbohren - was machbar ist. Pronic 5 (1989) 7, 42-48
- [24] Heilmann, K.S.: Kleine Bohrungen - große Probleme. Werkstatt und Betrieb 108 (1975) 8, 495-498
- [25] Höchsmann, K.: Bohren mit Hartmetallbohrern. In: Fertigungstechniken zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Bohrungen. Düsseldorf: VDI-ADB, 1988, 109-122
- [26] Iwata, K.; Moriwaki, T.: Basic Study of High Speed Micro Deep Drilling. Annals of the CIRP 30 (1981) 1, 27-30
- [27] Pörschke, H.F.; Hefendehl, F.; Hessler, H.: Herstellung kleiner Bohrungen mit Spiralbohrern aus Hochleistungsschnellstahl. In: Fertigungstechniken zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Bohrungen. Düsseldorf: VDI-ADB, 1988, 79-108
- [28] Hachfeld, K.: Laser zum Bohren von Diamanten. Schweizer Maschinenmarkt 78 (1978) 14, 34-35

- [29] Heitmann, D.: Stechen - Bohren - Erodieren: Kapillaren in Spinddüsen. In: Fertigungstechniken zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Bohrungen. Düsseldorf: VDI-ADB, 1988, 17-32
- [30] Jain, V.K.: Analysis of Electrodischarge Drilling of a Precision Blind Hole in HSS Using Bit Type of Tools. Microtecnic 1989 2, 34-40
- [31] Masuzawa, T.; Tsukamoto, J.; Fujino, M.: Drilling of Deep Microholes by EDM. In: Annals of the CIRP 38 (1989) 3, 195-198
- [32] Masuzawa, T.; Fujino, M.; Kobayashi, I.I.S.; Suzuki, T.: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining. Annals of the CIRP 34 (1985) 1, 431-434
- [33] Schreiber, O.: Maschinen und Einrichtungen für das funkenerosive Bohren. In: Fertigungstechniken zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Bohrungen. Düsseldorf: VDI-ADB, 1988, 1-16
- [34] Tenini, H.; Baumgartner, U.: Fein-Senkerodieren bei Mikrobearbeitungen. Feinwerktechnik & Messtechnik 92 (1984 2, 63-65
- [35] Adam, P.: Elektrochemisches Bohren kleiner Löcher. In: Fertigungstechniken zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Bohrungen. Düsseldorf: VDI-ADB, 1988, 133-162
- [36] Angell, J.B.; Terry, S.C.; Barth, P.W.: Mikromechanik aus Silizium. Spektrum der Wissenschaft 1983 6, 38-50
- [37] Jain, V.K.: Workshape Prediction in Electrochemical Drilling and Electrochemical Boring Operations. Microtecnic 1987 3, 42-47
- [38] Pyper, M.: Laser strahlt in die Breite - Elektronenstrahl stagniert. VDI-Nachrichten 42 (1988) 37, 26
- [39] Schmidt, N.: EDV stimuliert Elektronenstrahltechnik: Computer erschließt dem High-Tech-Vefahren neue Anwendungsbereiche in der Fertigung. VDI-Nachrichten 45 (1991) 34, 15
- [40] National Aperture, Inc.: Precision Apertures. Carl Baasel Lasertechnik GmbH, D-8130 Starnberg, 1990. - Firmenschrift
- [41] PLANO W.Plannet GmbH: Katalog Nr. 6: Elektronenmikroskopie. D-3550 Marburg, 1991. - Firmenschrift
- [42] PLANO W.Plannet GmbH: Customer-Information: Mechanical tolerances of apertures for electron microscopes. D-3550 Marburg, 1991. - Firmenschrift
- [43] Robert Bosch GmbH: Kombiniertes Zünd - und Benzineinspritzsystem Motro-

- nic - Technische Unterrichtung. D-7000 Stuttgart, 1983. - Firmenschrift
- [44] Lechler GmbH & Co. KG: Präzisionsdüsen - Anwendungen und Erzeugnisse. D-7012 Fellbach, 1990. - Firmenschrift
- [45] Spraying Systems Deutschland GmbH: Düsentechnik. D-2100 Hamburg, ca. 1990. - Firmenschrift
- [46] Treusch, H.-G.: Geometrie und Reproduzierbarkeit einer plasmaunterstützten Materialabtragung durch Laserstrahlung. Darmstadt, TH, Diss., 1985
- [47] Green, R. G.: Lasers cast a new light on metalworking. Tool and production 45 (1980) 12, 72-83
- [48] Semrau, H.: Technologie der Laser-Materialbearbeitung und Einsatzmöglichkeiten für den Laser zum Schneiden und Bohren in der industriellen Fertigung. In: Tönshoff, H.K.; Semrau, H. (Hrsg.): Anwenderseminar Laserschneiden und -bohren. Hannover, Universität, 1987
- [49] Steen, W.M.; Kamalu, J.N.: Laser Cutting. In: Bass, M. (ed.): Laser Materials Processing. Amsterdam: North-Holland, 1983
- [50] Kahlert, H.-J.; Burghardt, B.; Basting, D.: Industrietauglich bohrt der Excimerlaser mit 150 W. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung ZWF/CIM 86 (1990) 6, LS56-LS58
- [51] Lambda Physik GmbH: Material Processing Using 157 nm. D-3400 Göttingen, Lambda Highlights 25 (1990)
- [52] Bachmann, F.; Holzer, P.: Bohren von Leiterplatten mit Excimerlasern. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung ZWF/CIM 84 (1989) 6, L31-L35
- [53] Dickmann, K.: Laser drilling of collagen: an exclusive application for excimer lasers. In: Lambda Physik GmbH (Hrsg.): Lambda Highlights 18 (1989)
- [54] Geiger, M.; Lutz, N.; Biermann, S.: Excimer Laser Processing of Ceramics and Fibre Reinforced Polymers Assisted by a Diagnostic System. Proceedings of the SPIE, Vol. 1503 "Excimer Lasers and Applications III", 1991, 238-248
- [55] Lambda Physik GmbH: Saphir Drilling: excimer outdoes YAG. D-3400 Göttingen, Lambda Highlights 18 (1989)
- [56] Kahlert, H.-J.: Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlaserstrahlung. In: Praxis der Feinbearbeitung mit dem Laserstrahl. Düsseldorf: VDI-ADB, 1989, 23-33

- [57] Bergmann, H.W.; Kupfer, R.; Lassner, H.: Further Aspects of Materials Processing with Copper Vapor Lasers. In: Bergmann, H.W.; Kupfer, R. (ed.): Proceedings of the 3rd European Conference on Laser Treatment of Materials. Coburg: Sprechsaal, 1990
- [58] Kupfer, R.; Bergmann, H.W.: Materials Processing with Copper Vapor Lasers. Opto Elektronik Magazin 6 (1990) 1, 49-60
- [59] Hashimoto, K.; Niwa, K.; Murakawa, K.: Laser Drilling of Alumina Substrates. Fujitsu Limited (Kacoasaki): Fujitsu Scientific & Technical Journal 14 (1978) 3, 123-133
- [60] Harrysson, R.; Herbertsson, H.: Energy distribution during laser machining of glass. In: Proceedings of the 5th Conference on Lasers in Manufacturing, 1988, 25-34
- [61] N.N.: Laser Drilling of Aerosol Valves - High Production Rates, Fewer Rejects. Electro-optical systems design 7 (1975) 7, 51
- [62] Gafgen, D.J.: Laser Manifesto in the Materials Business. Optical Spectra 13 (1979) 3, 36-45
- [63] Dickmann, K.; Alvensleben, F.v.; Friedl, S.: Fein - und Mikrobohren mit Nd:YAG-Q-switch-Laser hoher Strahlqualität. Laser und Optoelektronik 23 (1991) 6, 56-62
- [64] Koehler, W.: Solid-State Laser Engineering. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1988
- [65] N.N.: Die Wünsche der Anwender erfordern neue Geometrien: Konzepte für Hochleistungs-Festkörper-Laser im Vergleich. Produktion 1991 37, 3
- [66] Marin, C.; Harrysson, R.; Lindbäck, T.; Herbertsson, H.: Focal Length and Focal Diameter Dependence on Laser Parameters in Materials Processing with Nd:YAG Slab Laser. In: Moisio, T. (ed.): Proceedings of the 3rd Conference on Laser Materials Processing in the Nordic Countries (NOLAMP-3), 1991, Lappeenranta, Finland
- [67] Arb, H.P.v.; Ochsenbein, S.; Studer, F.: Performance Characteristics of Nd:YAG Slab Geometry Lasers in Pulsed, CW and Q-Switched Operations. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser/Optoelektronik in der Technik - Vorträge des 9. Internationalen Kongresses Laser 89 Optoelektronik. Berlin: Springer, 1990
- [68] Sidler, T.; Steffen, J.: YAG-Slab Laser Cutting Performance. In: High Power Solid State Lasers and Applications. Proceedings of the SPIE, Vol. 1277, 1990, 232-243
- [69] Greve, P.: Optische Probleme diodengepumpter Festkörperlaser. Laser

Magazin 1988 6, 35-39

- [70] Greve, P.: Diodengepumpte Festkörperlaser. Opto Elektronik Magazin 5 (1989) 4/5, 415-424
- [71] Treusch, H.-G.: Bohren mit Laserstrahlung, Teil 1. Schweizer Maschinenmarkt 84 (1984) 25, 28-30
- [72] Treusch, H.-G.: Bohren mit Laserstrahlung, Teil 2. Schweizer Maschinenmarkt 84 (1984) 26, 29-31
- [73] Dausinger, F.; Beck, M.; Rudlaff, T.; Wahl, T.: Einkopplungsmechanismen für die Lasermaterialbearbeitung. Tagungsband zum Lasersymposium TECLAS (Techn. Laser-Arbeitsgemeinschaft Stuttgart) 1988
- [74] Iffländer, R.: Festkörperlaser zur Materialbearbeitung. Berlin: Springer, 1990
- [75] Fraunhofer-Institut für Lasertechnik: Herstellung von Spinddüsen mit gepulstem Nd:YAG-Laser. Aachen, 1989. - Tätigkeitsbericht
- [76] Goldfine, N.; Youcef-Toumi, K.: Behavior Characterization and Control for Pulsed Laser Cutting of Thin Metal Plates. Modelling, Sensing and Control of Manufacturing Processes, Wintern Annual ASME Meeting, 1986, 129-141
- [77] Murphy, S.: Laser Drilling: Capabilities and Trends. Lasers & Applications 03.1987, 59-62
- [78] Steffen, J.: Präzisionsbohrung mit Laser-Strahlen. F & M 83 (1975) 3, 93-98
- [79] Affolter, P.K.: Laserbohren und -schneiden: Gepulste Nd:YAG-Hochleistungslaser. Technische Rundschau 1983 25, 13-14
- [80] Bolin, S. R.: Drilling with Lasers. Machine and Tool Blue Book 79 (1984) 3, 44-46
- [81] Heglin, L.M.: Introduction to laser drilling. In: Belforte D., Levitt M. (ed.): The industrial laser annual handbook. Tulsa: Penn Well Books 1986, 116-120
- [82] Terell, N.E.: Laser precision small hole drilling. Technical Paper SME 1980, 1-13
- [83] Treusch, H.-G.; Höltgen, B.; Knoff, M.: Bohren mit gepulsten Nd:YAG-Lasersystemen. Laser und Optoelektronik 1985 4, 397-408
- [84] Kobayashi, A.; Komine, N.; Kuniyoshi, S.: Material Processing with Solid-State Laser. SME Paper, 1973, 1-9

- [85] Corfe, A. G.: Laser Drilling of Aero Engine Components.
- [86] Bolin, St.: Laser light the way to low-cost drilling and cutting. *Manufacturing Engineering* 87 (1981) 6, 63-65
- [87] Bina, W.: Erfahrungen mit dem Laser in der Serienpraxis. *Laser-Praxis* 10.1990, LS 83-84
- [88] Cincinnati Milacron: News Release: ILM-Cincinnati Milacron, Modell 3425 YF - Laserbohranlage für Turbinenteile. D-6050 Offenbach/Main, ca. 1988. - Firmenschrift
- [89] HAAS-Laser GmbH: Schneiden mit HAAS-Laser LAY 50 K und LAY 150 MC. D-7230 Schramberg, ca. 1991. - Firmenschrift
- [90] Kränert, J.; Müller, K.; Sonnefeld, D.: Erzeugung von Nanosekunden-Impulserien mit passiven Güteschaltern in YAG:Nd<sup>3+</sup>-Lasern. *Laser und Optoelektronik* 22 (1990) 5, 72-74
- [91] Kugler, Th.R.; Culkin, Th.J.: Nd:YAG Advances Aid Production. *Photonics Spectra* 1989 11, 143-148
- [92] Geiger, S.; Hefter, U.: Robotertaugliche Laserbeschriftung durch den Einsatz von Glasfasern. *Laser und Optoelektronik* 20 (1988) 4, 70-72
- [93] Prause, L.; Hering, P.: Lichtleiter für gepulste Laser: Transmissionsverhalten, Dämpfung und Zerstörschwellen. *Laser und Optoelektronik* 19 (1987) 1, 25-31
- [94] Herziger, G.; Treusch, H.-G.: Anforderungsprofil an Hochleistungs-Festkörperlaser. In: Waidelich, W. (Hrsg.): *Laser/Optoelektronik in der Technik - Vorträge des 8. Internationalen Kongresses Laser 87 Optoelektronik*. Berlin: Springer, 1987
- [95] Ripper, G.; Herziger, G.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung: Teil 5: Fokussierung von Laserstrahlung am Beispiel des CO<sub>2</sub>-Lasers. *Feinwerktechnik & Messtechnik* 92 (1984) 6, 297-302
- [96] Hoenig, S.A.: New technologies for protecting optical surfaces against contamination by vapors and particulates. In: Kychakoff, G. (ed.): *Electro-optic Sensing and Measurement. Proceedings of the 6th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics ICALEO '87, San Diego, 1987*
- [97] Schutzrecht US 4.092.515 (1978). United Technologies Corporation
- [98] Nuss, R.: Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden. Erlangen, Universität, Diss., Reihe Fertigungstechnik - Erlangen. München, Wien: C. Hanser, 1989

- [99] Lambda Physik GmbH: Clean Holes in Polymers under a Helium Stream. D-3400 Göttingen, Lambda Highlights 24 (1990)
- [100] Emmelmann, C.; Meyer, C.; Semrau, H.: Laserschneiden - Materialbearbeitung mit kW-Festkörperlaser und Lichtleitfaser. Industrie-Anzeiger 110 (1988) 63/64, 30-32
- [101] Yilbas, B.S.: Heat Transfer Mechanisms Initiating the Laser Drilling of Metals. Birmingham, University, Department of Mechanical Engineering, Ph.D. thesis, 1981
- [102] Rykalin, N.; Uglov, A.; Kokora, A.: Laser Machining and Welding. Moscow: MIR, 1978
- [103] Darby, M.J.: Laser-Bohrungen in Keramik ohne Bruch. Laser Magazin 1989 2, 41
- [104] Morita, N.; Ishida, S.; Fujimori, Y.; Ishikawa, K.: Pulsed laser processing of ceramics in water. Applied Physics Letters 52 (1988) 23, 1965-1966
- [105] Schutzrecht EP 0013657-B1. United Technologies Corporation
- [106] Schutzrecht EP 0347053-A3. Rolls-Royce plc
- [107] Schutzrecht JP 63-154282 (1988). Fujitsu Ltd
- [108] Amende, W.; Wolf, G.: Schweißen und Schneiden mit Laserstrahlen. Praktiker 1988 2, 71-76
- [109] Chang, U.I.: Laser Drilling of Pyrex Glass for Pressure Sensor Manufacturing. Proceedings of the 1st International Laser Processing Conference 1981, 14.1-14.18
- [110] Hansmann, M.; Decker, I.; Ruge, J.; Heine, K.-H.: Laserstrahlschneiden von Blechen bei verschiedenen Vorwärmtemperaturen. Schweißen und Schneiden 39 (1987) 8, 388-392
- [111] Schutzrecht DE 3007169-C2 (1982). Fiat Auto S.p.A.
- [112] Clarke, J.; Steen, W.M.: Arc Augmented Laser Cutting. Proceedings of Laser 1978, London, 247-253
- [113] Schutzrecht DE 3720249-C2. Jurca, M.Ch.
- [114] Han, Y.-H.; Decker, I.: Einfluß der Legierungselemente auf den Laserstrahlschneidprozeß. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser/Optoelektronik in der Technik - Vorträge des 9. Internationalen Kongresses Laser 89 Optoelektronik. Berlin:



Springer, 1990

- [115] Schutzrecht DT 1790128 (1972). Laser Technique S.A.
- [116] Bader, H.C.; Meinl, J.: Faseroptik führt Laserstrahl beim Beschriften. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung ZWF/CIM 85 (1990) 10, LS120-LS122
- [117] Montagu, J.I.; Brosens, P.; Tweed, D.G.; Peluse, K.N.: Galvanometric and Resonant Low Inertia Scanners. In: Marshall, G.F. (ed.): Laser Beam Scanning: Opto-Mechanical Devices, Systems, and Data Storage Optics. New York: Dekker, 1985
- [118] Oehrle, R.C.: Galvanometer beam-scanning system for laser fiber drawing. Applied Optics 18 (1979) 4, 496-500
- [119] Richter, K.: Festkörper-Laser als universelles Werkzeug in der Materialbearbeitung. Labor 2000 1992, 152-163
- [120] Brosens, P.: Scanning Accuracy of the Moving-Iron Galvanometer Scanner. Optical Engineering 15 (1976) 2, 95-98
- [121] Brosens, P.J.: Dynamic Mirror Distortions in Optical Scanning: Applied Optics 11 (1972) 12, 2987-2989
- [122] Blais, F.: Control of low inertia galvanometers for high precision laser scanning systems. Optical Engineering 27 (1988) 2, 104-110
- [123] Schutzrecht DE 3835981-A1. MTU Motoren- und Turbinen-Union München GmbH
- [124] Schutzrecht EP 0344339-A1. A.L.L. GmbH
- [125] Schutzrecht US 4.504.727 (1985). International Business Machines Corporation
- [126] Chryssolouris, G.; Sheng, P.; Alvensleben, F. v.: Process Control of Laser Grooving Using Acoustic Sensing. In: Automation of Manufacturing Processes - Symposium (Winter annual meeting of the ASME/dynamic systems and control division). New York 1990, 153-162
- [127] Schutzrecht EP 0364914-A3. MTU Motoren - und Turbinen-Union München GmbH
- [128] Hopf, W.; Knoff, M.; Treusch, H.-G.: Reproduzierbares Abtragen geometrisch definierter Werkstoffvolumen mit Laserstrahlung. Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 1985. - Abschlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 13N5236/9

- [129] Fraunhofer-Institut für Lasertechnik: Steuerung der Bearbeitungsdauer beim Laserbohren zur Kontrolle des Bohrungsdurchmessers. Aachen, 1987 (Abschlußbericht zum Forschungsauftrag). - Forschungsbericht
- [130] Abels, P.; Petring, D.; Beyer, E.: Technique to Control the Boring Process in Laser Beam Cutting. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser/Optoelektronik in der Technik - Vorträge des 9. Internationalen Kongresses Laser 89 Optoelektronik. Berlin: Springer, 1990
- [131] Schutzrecht DE 3934587-A1 (1991). Robert Bosch GmbH. Erfinder: Schmidt-Hebbel, Robert
- [132] Becker, E.: Technische Strömungslehre: Eine Einführung in die Grundlagen und technischen Anwendungen der Strömungsmechanik. 5. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner, 1982
- [133] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer, 1977
- [134] Bronkhorst Hi-Tec B.V.: EL-Flow: Massendurchfluß-Messer/-Regler für Gase. NL-7261 AK Ruurlo, 1990 (5-90). - Firmenschrift
- [135] Messcomp Datentechnik GmbH: Meßtechnik-Katalog. D-8094 Edling, 1991. - Firmenschrift
- [136] Norm DIN 323 Blatt 1 08.1974. Normzahlen und Normzahlreihen: Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte
- [137] Schutzrecht DE 3942299-A1 (1991). Robert Bosch GmbH. Erfinder: Schmidt-Hebbel, Robert
- [138] Furness Controls Limited: Feinstdruck-Transmitter, Mikromanometer, Dichtheitsprüfgeräte für die Qualitätskontrolle: Kurzformkatalog. Ingenieurbüro Prévôt GmbH (Vertr.), Hamburg, ca. 1990. - Firmenschrift
- [139] Weidmüller GmbH & Co., C.A.: SLDS - Solid State Laser Beam Diagnostic System: Technische Dokumentation. D-W7560 Gaggenau, 1991 (TD 120-D, 03/91). - Firmenschrift
- [140] Ophir Optics Ltd.: Model 30 A Laser Power Monitor - Operating Instruction Manual. Israel, Jerusalem, ca. 1990. - Firmenschrift
- [141] Laser 2000 GmbH: LabMaster, FieldMaster, ModeMaster messen Leistung, Energie und Strahlcharakteristik von Lasern. D-8039 Puchheim, ca. 1991 (Laser 2000 News 63). - Firmenschrift

## Anhang

### A.1 Rechnersteuerung der Laseranlage

Ziel der entwickelten Rechnersteuerung für die Laseranlage ist die Erhöhung der Flexibilität und Bedienfreundlichkeit. In praxi ergibt sich die Forderung, zum einen wiederkehrende, zum anderen aber auch komplizierte Abläufe, für die eine manuelle Anlagenbedienung unzumutbar ist, zu automatisieren. Als Beispiel seien hier die Mehrloch-Bohrbilder in Kapitel 6, die zwecks statistischer Absicherung der Untersuchungen mehrfach wiederholt werden müssen, aufgeführt.

Gegenstand der Rechnersteuerung ist zum einen das Laseraggregat, an dem sämtliche Einstellparameter für Laseroszillator und -verstärker, das heißt jeweilige Pulsdauer  $t$ , Ladespannung  $U$  und die gemeinsame Pulsfrequenz  $f$ , eingestellt werden müssen. Als zusätzliche Option für Untersuchungen ermöglicht die Steuerung die Einstellung unterschiedlicher Verzögerungszeiten  $t_d$  für beide Laserkavitäten, wodurch die Möglichkeit zur Laserstrahlpulsformung eröffnet wird (vgl. Bearbeitungsergebnisse in Kapitel 2). Des weiteren muß der Laser von der Steuerung aus ein- beziehungsweise ausgeschaltet sowie Laserstrahlpulse entweder als Einzelpulse oder als Pulszug ausgelöst werden können. Zum anderen werden auch die Positionierschlitten der Verfahreinheiten von der Steuerung angesprochen: Es stehen Befehle für eine Referenzfahrt, für Verfahrwege, -geschwindigkeiten sowie zur linearen Interpolation in zwei Achsen bereit.

Die Programmiermöglichkeiten sind derart modular konzipiert, daß eine Erweiterung auf weitere Positioniereinrichtungen, Strahlführungssysteme, wie Scanner, und Hilfsfunktionen, wie das Schalten von Ventilen oder das Betätigen einer Strahlweiche, ohne großen Aufwand realisierbar ist.

Bedienkomfort und Flexibilität der realisierten Rechnersteuerung werden durch die speziell auf Laserstrahlbohranwendungen zugeschnittene Programmiersprache bewerkstelligt. Der Auszug eines Programms mit den dazugehörigen Erläuterungen in Tabelle 10 dokumentiert dies summarisch. "L"-Programmsätze beziehen sich auf das Laseraggregat, die "M"-Befehle (move) auf die Positioniereinheit. Verschiedene

Betriebsmodi runden das Steuerungskonzept ab: Programme können wahlweise automatisch oder Satz für Satz, ohne oder mit Bildschirmanzeige abgefahren werden.

Tabelle 10: Rechnersteuerung des Lasers und seiner Peripherie: Programmierbeispiel mit Erläuterungen

<u>Befehle</u>	<u>Beispiel</u>
L = Laser	; PROGRAMM 7K7Z1W.
.A = Parameter in Absolutwerten	
.R = Parameter in Relativwerten	LA ot100 ov670 at0 av0 fr90
.ON = "hochfahren"	
.OFF = ausschalten	; MREF
.S = "schießen" (shot)	MA x174.5 y166.4 z48 f1000
M = Verfahreinheit (move)	LS 1000,0
.A = Parameter in Absolutwerten	
.R = Parameter in Relativwerten	DO 7 TIMES
.REF = Referenzfahrt	LS 200,1
	MR x.4 f50
DO . TIMES	LS 200,1
= Wiederholung	MR x-.8
ENDO	LS 200,1
= Ende Wiederholungsschleife	MR x.2 y.35
	LS 200,1
; = Kommentar	MR x.4
	LS 200,1
	MR y-.7
	LS 200,1
	MR x-.4
	LS 200,1
	MR x-4.8 y.35 z-.1 f500
	ENDO
	MA x5 f1000

## A.2 Laserstrahldiagnostik

Für eine fundierte Beurteilung von Bearbeitungsergebnissen ist es unerlässlich, die eingesetzte Laserstrahlung charakterisieren zu können. In vielen Fällen ist es von Vorteil, wenn diese Charakterisierung sogar on-line und real-time geschehen kann.

Jede Leistungs- oder Energiemessung ist wegen der gepulsten Natur der Strahlung mit besonderen Schwierigkeiten behaftet. Häufig kommt es zum Beispiel vor, daß die

Spitzenleistungen für den verwendeten Meßkopf zu hoch sind, so daß nur ein ausgekoppelter Teilstrahl oder ein stark abgeschwächter Strahl vermessen werden kann. Die Korrelation von Meßergebnissen mit verschiedenen Geräten ist oftmals schlecht.

#### A.2.1 Laserstrahl diagnosesystem

In Versuchen, bei denen entweder unmittelbar die Strahlqualität festgestellt werden soll oder aber eine Korrelation zu Bearbeitungsergebnissen gesucht wird, stellt sich die Frage nach der örtlichen Verteilung der Laserstrahlenergie über den Querschnitt des Laserstrahls. Diese Information kann in komfortabler Weise mit dem SLDS-Diagnosesystem [139] gewonnen werden.

Das Herzstück des Systems bildet eine CCD-Matrixkamera, auf welche ein sehr kleiner ausgekoppelter Anteil der Laserstrahlung abgebildet wird. Zur Teilstrahlauskopplung bietet sich an, das SLDS-Gerät hinter einen (hochreflektierenden) Umlenkspiegel im Laserstrahlengang zu setzen. Durch eine schwenkbare Fokussierlinse im SLDS-Gerät kann wahlweise der unfokussierte beziehungsweise der fokussierte Laserstrahl diagnostiziert werden. Letzteres hat zum Ziel, die Bedingungen, die im Laserstrahlfokus an der Bearbeitungsstelle herrschen, nachzubilden. Mit der mitgelieferten Software kann die Energieverteilung über den Laserstrahlquerschnitt wahlweise in verschiedenen Darstellungsarten angezeigt werden; Beispiele hierzu finden sich in Kapitel 5. Die zusätzlich eingebaute Photodiode erfüllt den Zweck, den zeitlichen Verlauf der Laserstrahlleistung über die Dauer eines Laserstrahlpulses aufzuzeigen. Die Apertur des Systems beträgt für einen Laserstrahl geringer Divergenz 33 mm im Durchmesser. Die maximale Laserpulsfrequenz von 2 kHz bei einer maximalen Aufnahme Frequenz von 60 Hz ist für den eingesetzten Laser ausreichend. Die Anpassung der anfallenden Laserstrahlpulsenergie an die Empfindlichkeit des CCD-Arrays wird durch eine softwareseitig realisierte Belichtungszeitvorgabe beziehungsweise, bei groben Unter- oder Überbelichtungen, durch Austausch eines Graufilterpakets bewerkstelligt.

### A.2.2 Photodiode mit Auswertegeräten

Die genannte Photodiode des Laserstrahl Diagnosesystems erfüllt mit der mitgelieferten Auswerte-Software mangels Auflösung nicht zufriedenstellend den Zweck, den zeitlichen Verlauf der Laserstrahlleistung sowie die -pulsenergie sichtbar zu machen. Es wird deswegen auf die in Kapitel 5 beschriebene Photodiode zurückgegriffen. Vom Laserhersteller ist standardmäßig vorgesehen, das Signal dieser Photodiode mit dem sogenannten EMDC-Auswertegerät für die Anzeige der Laserstrahlpulsenergie zu verwenden. Wird das Signal auf ein schnelles Oszilloskop gegeben, erhält man eine hochaufgelöste Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der Laserstrahlleistung.

### A.2.3 Weitere Laserstrahlenergiemeßgeräte und -hilfsmittel

Aus verschiedenen Gründen ist es wünschenswert, weitere Meßgeräte zur Ermittlung der Laserstrahlleistungsdaten verfügbar zu haben. Zum einen ist die Meßunsicherheit der Geräte manchmal entweder sehr groß oder unbekannt, so daß eine Gegenmessung zwecks Absicherung der Ergebnisse geboten erscheint. Zum anderen kann es bei bestimmten Experimenten nötig sein, an verschiedenen Orten in der Laserstrahlführung gleichzeitig Daten aufzunehmen. Gelegentlich kommt es ferner vor, daß ein bestimmter Meßort nicht jedem Gerät zugänglich ist oder daß die Laserstrahlleistungsdaten wegen des begrenzten Meßbereiches nicht gemessen werden können.

Vor diesem Hintergrund werden in Ergänzung zu den genannten Geräten noch zwei weitere eingesetzt. Das Ophir-Gerät [140] verfügt über verschiedene Meßköpfe und ist in der Lage, die mittlere Laserstrahlleistung zu messen. Die Leistungsgrenzwerte der Meßköpfe liegen derart, daß sie bei den Versuchen für die vorliegende Arbeit meistens mit dem unabgeschwächten Nutzstrahl beaufschlagt werden können. Anders verhält sich dies beim Labmaster mit LMP-10-Sensorkopf [141], der nur bis maximal 10 W mittlere Laserstrahlleistung verträgt. Das Gerät hat aber den Vorteil, neben der mittleren Laserstrahlleistung auch die -pulsenergie und -frequenz anzuzeigen.

Als weitere Methode zur experimentellen Ermittlung der mittleren Laserstrahlleistung eines Laseraggregats wird die Messung mit der Thermoskanne eingesetzt. Hierbei wird ein vorab bestimmtes Volumen Wasser durch die vom Laser emittierte Strahlung erwärmt. Zur Verbesserung der Wechselwirkung zwischen der Laserstrahlung und der Flüssigkeit wird letztere mit einem geeigneten Farbstoff, zum Beispiel Zeichentusche

oder Tinte, eingefärbt. Um die thermischen Verluste an die Umgebung möglichst gering zu halten, wird wegen der guten Wärmeisolierung eine Thermoskanne als Behältnis für die Flüssigkeit genommen. Für die Temperaturmessung jeweils vor und nach der Einstrahlung wird ein hochauflösendes Thermometer (0,01 K) verwendet.

Als wichtiges Hilfsmittel für Laserstrahldiagnosezwecke bewährt sich ein selbstgebauter Strahlauskoppelbaustein. Sein Einsatz bietet sich an, wenn die Diagnose ohne Beeinträchtigung des Nutzstrahls, das heißt bei laufendem Bohrversuch, durchgeführt werden soll. Die Teilauskoppelung wird durch eine in den Nutzstrahl schwenkbare Strahlteilerplatte mit einem Reflexionskoeffizienten von wahlweise 2 oder 5 % bewerkstelligt. Diese Reflexionswerte bedeuten, daß eine in der Regel willkommene Reduzierung der Belastung auf die Meßsensoren erfolgt, sofern diese in den ausgekoppelten Teilstrahl gesetzt werden. Die Strahlteilerplatte sitzt mit ihrer Schwenkaufnahme in einem Gehäuse, das modular zu den Optikkomponenten des Laserherstellers paßt und somit an beliebiger Stelle im Strahlengang anflanschbar ist.

Reicht die Abschwächung nicht aus oder soll der Laserstrahl aus anderen Gründen überhaupt oder noch stärker abgeschwächt werden, so steht ein ebenfalls selbstgebauter Abschwächbaustein zur Verfügung. Sein Abschwächelement wird von einer Glasscheibe mit einer aufgedampften dielektrischen Schicht verkörpert. Diese Scheibe ist zum Laserstrahl hin drehbar gelagert: Eine Veränderung des Strahleinfallswinkels von 0° auf 45° führt gemäß von Herstellerseite empirisch ermittelten Kurven zu einem Abfall des Transmissionsgrades von circa 86 % auf 5 %.

Bei Laserstrahldiagnosearbeiten ergibt sich aus der begrenzten Belastbarkeit der eingesetzten Laserstrahldetektoren oftmals die Notwendigkeit, einen größeren Anteil der Laserstrahlleistung zu vernichten. Beim im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Laser kann es vorkommen, daß bis zu  $P_{Lm} = 100 \text{ W}$  in eine sogenannte Strahlfalle geleitet werden müssen. Für diesen Zweck wurde ein Absorber entwickelt, der sich dadurch auszeichnet, daß die bei Einfall eines Laserstrahls geringer Divergenz besonders belastete Zone um die Laserstrahlachse durch eine spezielle konstruktive Maßnahme entlastet wird: In der Achse des Absorptionskegels befindet sich ein Reflexionsdorn, der die einfallende Laserstrahlung aus dem zentralen Bereich wegreflektiert und auf die großflächige und gut absorbierende Mantelfläche des Absorbers ablenkt. Unter Umständen kann es zwischen dem Dorn und der Mantelfläche zu Mehrfachreflexion und jeweiliger Teilabsorption der Laserstrahlung kommen. Der Reflexionsdorn besteht aus Kupfer, während die kegelförmige Mantelfläche und das

gesamte Gehäuse des Absorbers aus schwarz eloxiertem Aluminium hergestellt sind. Die Aluminiumoberfläche, die einer direkten Bestrahlung mit den am Laser auftretenden Strahlungsdichten nicht standhielte, widersteht der vom Kupferdorn aufgefächerten Strahlung problemlos. Die Außenfläche des Absorptionsmantels ist wassergekühlt. Neben der Vernichtung nahezu paralleler Laserstrahlen ist der Absorber auch für stark divergente Strahlung, wie zum Beispiel im Fokusbereich, geeignet. Der Absorber ist kompakt gebaut und so konzipiert, daß er an die standardisierten Optikmodule des Laserherstellers angeflanscht beziehungsweise mittels eines wahlweise anzubringenden Ständers frei in den Laserstrahl gestellt werden kann. Auch wegen dieser Einsatzflexibilität hat sich der Absorber im praktischen Betrieb bestens bewährt.

#### A.2.4 Pumpleistungsmeßgerät

Obwohl nicht unmittelbar zu den Laserstrahlleistungsmeßgeräten gehörig, rundet ein Pumpleistungsmeßgerät die Diagnosemöglichkeiten für den Betriebszustand des Lasers ab. Bei den Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit wird ein vom Laserhersteller angebotenes Gerät eingesetzt, das im wesentlichen die elektrische Spannung auf sowie den Strom durch die Blitzlampen der Laserkavitäten abgreift und daraus den Leistungswert ermittelt. Das Gerät kann wahlweise auf den Laseroszillator oder den -verstärker geschaltet werden.

### A.3 **Versuchsauswertemethoden**

In diesem Abschnitt sind Anmerkungen zu einigen ausgewählten Versuchsauswertemethoden zusammengefaßt. Sie beziehen sich auf die Probenauswertung und die empirische Ermittlung wichtiger Kenngrößen des Laserstrahlengangs.

#### A.3.1 Herstellung von Schliffen

Selbst unter Nutzung eines Rasterelektronenmikroskops ist es vielfach unumgänglich, Schliffe der Versuchsproben anzufertigen, um eine genaue Aussage über den Verlauf eines Loches entlang seiner Achse machen zu können. Besonders wenn statistische Aussagen über die angesprochene Lochform gewünscht sind, müssen für eine Auswertung gleich mehrere, unter gleichen Prozeßparametern hergestellte Löcher



beurteilt werden können. Wegen der sehr kleinen Dimensionen der Löcher ist es erstrebenswert, eine rationelle und sichere Methode einzusetzen, um die Proben zu schleifen.

Im folgenden wird eine selbstentwickelte Methode dargestellt, die der oben aufgeführten Zielsetzung entspricht. Die zu beurteilenden Versuchslöcher werden nach Bild 60 auf einer gemeinsamen Achse A aneinandergereiht. Beidseits dieser Löcher werden zusätzliche Hilfslöcher sowie ein oder zwei Hilfsschnitte angeordnet. Es ist von eminenter Bedeutung, daß sowohl die Versuchslöcher als auch die Hilfslöcher und -schnitte in einer Aufspannung, möglichst NC-gesteuert, angefertigt werden. Das komplette Lochbild kann dann, unter Umständen auch in einer getrennten Aufspannung, ausgeschnitten werden. Danach wird die Probe mit dem Lochbild in Kunstharz eingebettet und nach der beim Schleifen üblichen Technik bearbeitet. Der Bediener der Schleifmaschine muß dabei zunächst mit grobkörnigem Schleifpapier die von außen durch das transparente Kunstharz erkennbaren Hilfsschnitte anvisieren, um dann mit schrittweise feinerem Schleifpapier zunächst die zwei außenliegenden Hilfslöcher, dann die innenliegenden Hilfslöcher und schließlich die eigentlichen Versuchslöcher freizuschleifen. Die beschriebene Vorgehensweise erfordert zwar einige Übung, ist aber gegenüber der Schliifanfertigung an einzelnen Löchern deutlich rationeller und präziser. Dies bedeutet auch, daß die Ausschußquote relativ gering gehalten werden kann.

Zur weiteren Absicherung der Methode ist es ratsam, vor der Anfertigung der Schlitze

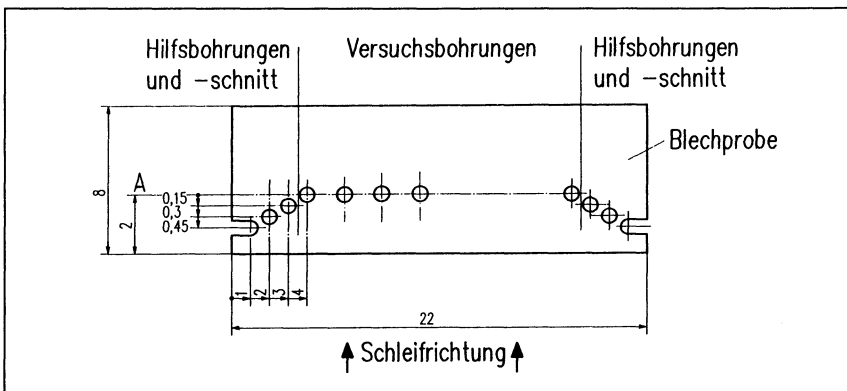


Bild 60: Herstellungsweise von Schlitzen zur Beurteilung laserstrahlgebohrter Löcher

zumindest einige Löcher bezüglich ihrer Durchmesser auf den beiden Werkstückseiten vermessen zu haben, um diese mit denselben Durchmessern an den Schlifflinien vergleichen zu können. Wird keine nennenswerte Abweichung der Durchmesser vor und nach der Schliffanfertigung festgestellt, so kann angenommen werden, daß die Schliffebene die Lochachsen mit ausreichender Genauigkeit trifft. Weichen die Durchmesser hingegen voneinander ab, so ist von einer Weiterverwertung der Schlicke für eine Längenmeßtechnische Erfassung der Löcher abzuraten.

### A.3.2 Kriterien für die qualitative Bewertung laserstrahlgebohrter Löcher

Bild 61 zeigt schematisch die sich beim Laserstrahlbohren typischerweise ergebenden Lochformen. Zur subjektiven Charakterisierung dieser Formen wird der in Tabelle 11 festgehaltene Katalog mit den wichtigsten qualitativen Negativmerkmalen der Löcher eingesetzt. Die Qualitätsmerkmale beziehen sich im wesentlichen auf die Laserstrahl-eintrittsseite des Werkstücks, da bei den in dieser Arbeit behandelten Laserstrahlbohrverfahren auf der Laserstrahlaustrittsseite selten nennenswerte Qualitätseinbußen zu verzeichnen sind. Der Katalog wird durch Gewichtungsfaktoren vervollständigt, die der unterschiedlich starken Ausprägung der Merkmale Rechnung tragen. Bezüglich der Schreibweise wird vereinbart, daß die Kürzel für diese Faktoren denjenigen für die eigentlichen Kriterien gegebenenfalls voranzustellen sind.

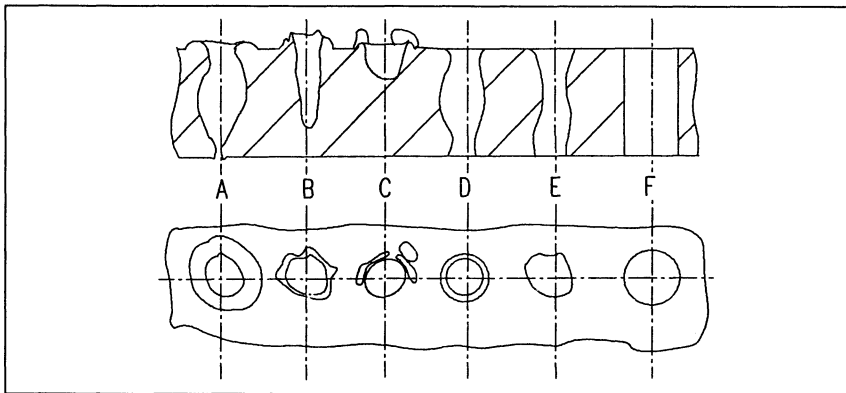


Bild 61: Typische Formen laserstrahlgebohrter Löcher

Unter Verwendung dieser Kürzel erhalten die in Bild 61 dargestellten Löcher die Kennzeichnungen:

A: Ur,W; B: Ur,SL,G; C: Ur,K,Sp; D: R; E: Ur; F: Zielvorstellung.

Tabelle 11: Kriterien zur Qualitätsbeurteilung laserstrahlgebohrter Löcher

K	Krater	Gewichtung:
SL	Sackloch	k klein
R	Rundung der Kante	m mittel
Sp	Spritzer	g groß
G	Grat	
W	Wulst	
Ur	Unrundheit (Formabweichung)	
St	Streuung (Maß- und/oder Formabweichung)	

### A.3.3 Bestimmung der Laserstrahl-Fokuslage

Aus den Anmerkungen in Kapitel 5 zur sich besonders bei Betrieb mit Laserverstärker stark verändernden Lage der Strahlteile ergibt sich zwangsläufig, daß die Lage des Strahlfokus bezogen auf die Fokussieroptik in Abhängigkeit von den Lasereinstellparametern wandert. Hinzu kommt der Effekt, daß bei einer Aufspannung von Versuchsproben unterschiedlicher Dicke auf ihrer dem Laserstrahl abgekehrten Seite die Probendicke voll in eine Betrachtung der relativen Lage des Fokus zum Werkstück eingeht. Dies hat zur Folge, daß es unmöglich ist, einer bestimmten, festen Lage der Fokussieroptik  $z_M$  die Fokuslage  $z_F = 0$  zuzuordnen. Es ist vielmehr erforderlich, für jede neue Lasereinstellparameterkombination und jede neue Werkstückdicke den Ursprung für die  $z_F$ -Achse neu festzulegen.

In den Versuchen zu dieser Arbeit wird zur Bestimmung der Laserstrahl-Fokuslage generell wie folgt vorgegangen: Mit den zu verwendenden Lasereinstellparametern werden im Einzelpulsverfahren Löcher in ein 0,2 mm dickes Blech aus X5CrNi1810-Stahl eingebracht. Dabei wird die Fokussieroptik über einen derart festgelegten  $z_M$ -Bereich verfahren, daß der Strahlfokus die Lage  $z_F = 0$  durchläuft. Damit resultiert auf dem Blech eine Abbildung der Strahlkaustik: Die Löcher sind zunächst groß, passieren ein Durchmesserminimum und wachsen dann wieder an. Derjenigen Koordinate

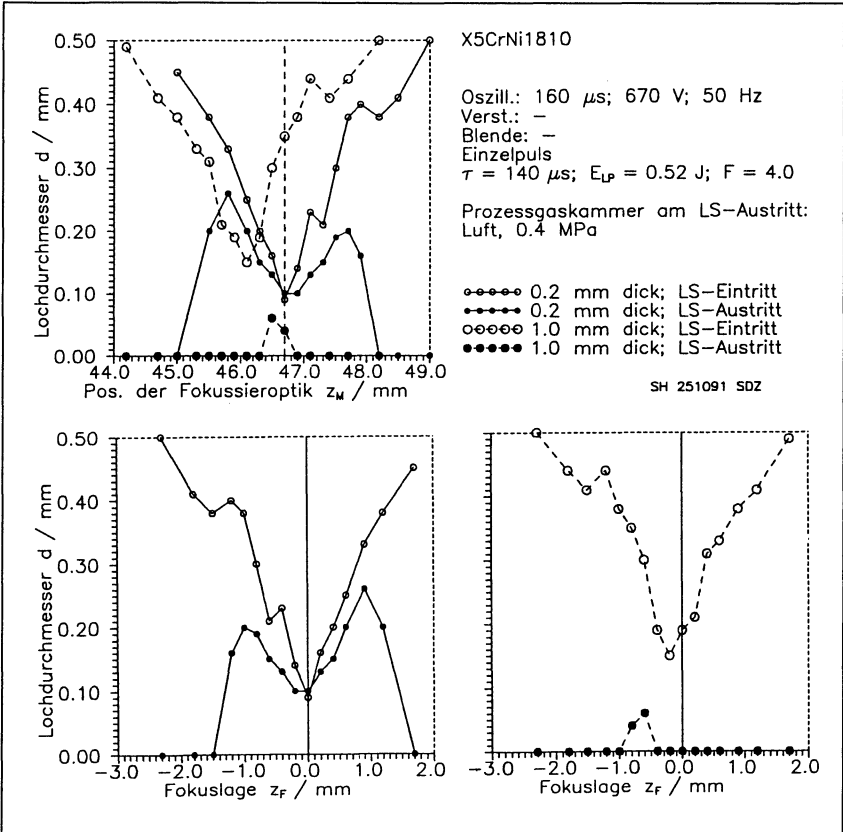


Bild 62: Vorgehensweise zur Ermittlung der Laserstrahlfokusslage

$z_M$  bei der sich der kleinste Lochdurchmesser im Blech einstellt, wird die Fokusslage  $z_F = 0$  zugeordnet. Bild 62 illustriert die Vorgehensweise: Während das obenstehende Diagramm die Lochdurchmesser über der Position der Fokussieroptik  $z_M$  zeigt, sind unten dieselben Durchmesserverläufe über der auf die beschriebene Weise aus  $z_M$  errechneten Fokusslage  $z_F$  dargestellt.

Obschon die Verwendung eines dünneren Bleches beziehungsweise einer Folie zur Steigerung der Genauigkeit bei der Fokusslagebestimmung prinzipiell angebrachter erscheint, resultieren in praxi gravierende Nachteile: Bei Aufspannung auf den Prozessgaskammern und insbesondere unter höheren Prozessgasdrücken verformen sich

die Proben mangels Steifigkeit in undefinierter Weise. Die Bestimmung der tatsächlichen Blechlage während der Bearbeitung und damit der Fokusslage ist demzufolge mit großen Unsicherheiten behaftet. Das beschriebene Verfahren mit 0,2 mm dicken Blechen hat sich hingegen gut bewährt, und die Genauigkeit der Fokusslagenbestimmung ist für die Belange einer Laserstrahlbohraufgabe ausreichend.

#### A.3.4 Bestimmung der Fokussierzahl des Laserstrahlengangs

Die Fokussierzahl  $F$  ist definiert als

$$F = f / d_{L \text{ lens}} \quad (22),$$

mit  $d_{L \text{ lens}}$  Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse. Die eingesetzten Fokussieroptiken besitzen Brennweiten von  $f = 100 \text{ mm}$ . Zur Bestimmung der Fokussierzahl ist demzufolge nur noch die Ermittlung des jeweiligen Laserstrahldurchmessers  $d_{L \text{ lens}}$  vonnöten, was wie folgt erreicht wird: An einer gut zugänglichen Stelle des Laserstrahlengangs kurz vor der Fokussieroptik wird mit einigen Laserstrahlpulsen ("Dauerpuls") ein Einbrand in Photopapier hergestellt. Dieser Einbrand wird gemäß der in Bild 63 vorgestellten Weise ausgemessen.

Die meisten der Bearbeitungsversuche in Kapitel 6 werden mit der Strahlaufweitung mit Faktor  $a = 4$  durchgeführt. Die ermittelten  $F$ -Werte kommen demnach mit dem genannten Aufweitungsfaktor zustande.

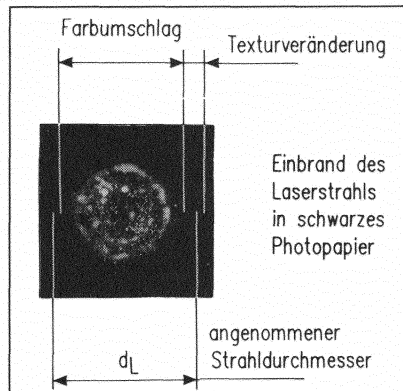


Bild 63: Auswertung eines Laserstrahl-Einbrandes in Photopapier zur Bestimmung des Laserstrahldurchmessers

## **Lebenslauf**

Der Lebenslauf wird nicht veröffentlicht.

# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

## Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

## Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-  
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

## Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektierung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

## Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem  
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

## Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter  
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-  
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

## Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der  
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

- Band 10  
Rolf Pfeiffer  
**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik**  
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 11  
Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12  
Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP : Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13  
Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14  
Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>- Hochleistungslasern**  
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15  
Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16  
Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**  
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17  
Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18  
Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19  
Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20  
Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.



Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende**

**Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten**

**in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der**

**Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden**

**und –schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen**

**in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartonierte.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub> – Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartonierte.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartonierte.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM –Prozesskette für die Herstellung**  
**von Blechblegteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartonierte.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :**

**Prozessführung und Systemtechnik in der 3D – Laserstrahlbearbeitung von Blech-**  
**formteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartonierte.

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartonierte.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur Impliziten**

**Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartonierte.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens  
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung  
einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative  
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**  
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35

Bertram Ehmann

**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener  
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36

Harald Kolléra

**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems  
für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37

Stephanie Abels

**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen  
in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.