

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

M. Honer
Prozesssicherungsmaßnahmen beim
Bohren metallischer Werkstoffe
mittels Laserstrahlung

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

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

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

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

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

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung

Von Dr.-Ing. Michael Honer
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · München

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2004

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wieder-
gabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch
bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2004

ISBN 3-8316-0441-X

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-0

Kurzfassung

Neben dem Laserschweißen hält in den letzten Jahren auch vermehrt das Laserbohren Einzug in die industrielle Fertigung. Für spezielle Anwendungen, wie beispielsweise Einspritzkomponenten, werden höchste Anforderungen an die Genauigkeit von Lochdurchmesser und -form gestellt. Bei Lochdurchmessern von unter 120 μm bedeutet das eine Genauigkeit von wenigen Mikrometern, wofür das Laserbohren derzeit das wirtschaftlichste Verfahren ist. Zur Erfüllung der Spezifikationen hinsichtlich der Lochgeometrie wurde das Wendelbohren entwickelt. Hierbei werden Laserstrahl und Werkstück so gegeneinander bewegt, dass der Laserstrahl eine kreisförmige Bewegung ausführt. Mit Laserpulsen mit einer Pulsdauer von wenigen Nanosekunden und Pulsenergien von einigen Millijoule werden mehrere zehntausend Laserpulse benötigt, um ein metallisches Werkstück von einem Millimeter Stärke zu durchbohren.

Um dieses Verfahren in die Mengenfertigung einzuführen, bedarf es einer zuverlässigen Prozesskontrolle, um eine hohe Reproduzierbarkeit trotz wechselnder Fertigungseinflüsse sicherzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Verfahrens- und Systemkomponenten entwickelt, um diesen Ansprüchen gerecht zu werden. Da der Abstand zwischen Werkstück und Laserfokus mit etablierten Methoden, bedingt durch die Bauteilform und -oberfläche, nicht geregelt werden kann, wird ein Messsystem mit einer intelligenten Kamera aufgebaut. Hiermit wird der Abstand zwischen Werkstück und Gasdüse ermittelt und durch Verknüpfung mit der NC-Steuerung vollautomatisch geregelt. Schwankungen der Wandstärke der Bauteile sowie Leistungsschwankungen des Lasers bedingen wechselnde Durchbruchzeiten beim Laserbohren. Da die Qualität der Bohrung abnimmt, wenn nach dem Durchbohren des Materials weiter Energie eingebracht wird, ist ein Beenden des Bohrprozesses zwingend erforderlich. Hierfür wird ein Mess- und Steuersystem entwickelt, welches durch Auswerten der Strahlungsemissionen den Zeitpunkt des Durchbohrens erkennt und daraufhin den Laser abschaltet. Neben der Optimierung von Bohrlochqualität und Prozesszeit wird hiermit auch eine Schädigung des Raumes hinter dem Bohrungsaustritt vermindert. Befindet sich hinter dem Bohrungsaustritt ein Backingmaterial, welches dem Schutz des Rückraums dient, so wird dessen Lebensdauer signifikant erhöht und ein Kostenvorteil erreicht.

Diese Prozessregel- und -kontrollsysteme werden bereits erfolgreich eingesetzt, um das Wendelbohren von Präzisionsbohrungen in der industriellen Fertigung abzusichern.

Inhalt

Kurzfassung	5
Inhalt	7
Symbole und Einheiten	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation	17
1.2 Zielsetzung	18
1.3 Aufbau der Arbeit	18
2 Grundlagen und Stand der Technik	21
2.1 Charakterisierung von Bohrungen	22
2.2 Laserbohren	24
2.2.1 Laserstrahlparameter	25
2.2.2 Bohrverfahren	31
2.2.3 Hirschegg-Modell	35
2.2.4 Relevanz und Toleranzen der Prozessparameter	37
2.3 Prozessdiagnostik	44
2.3.1 Akustische Emissionen beim Laserbohren	44
2.3.2 Beobachten des Bohrprozesses mit optischen Sensoren	45
2.3.3 Überwachung des Lasersystems	47
2.3.4 Ermittlung der Fokusposition über den Strahlengang	48
3 Experimenteller Aufbau	50
3.1 Optischer Aufbau	50
3.2 Sensoren	53
3.3 Kamera	53
3.4 Strahlanalyse-System	54
3.5 Messtechnik und Datenauswertung	56
3.6 Maschinensteuerung	57

3.7	Charakterisierung der verwendeten Strahlquelle	57
3.7.1	Laserleistung	57
3.7.2	Pulsdauer	59
3.7.3	Messen der Strahlqualität	59
3.8	Prozessparameter	61
4	Lösungsansätze und experimentelle Umsetzung	63
4.1	Strahlvermessung zur Qualitätssicherung	63
4.2	Sicherstellen der Fokusslage	66
4.2.1	Ursachen für Änderungen der Fokusslage	66
4.2.2	Sicherstellen der Fokusslage durch externe Sensoren	68
4.2.3	Bauteile mit ebener Oberfläche	69
4.2.4	Abstandsregelung an Bauteilen mit gekrümmter Oberfläche mit intelligenter Kamera	75
4.3	Durchbrucherkennung beim Wendelbohren	81
4.3.1	Bestimmung einer geeigneten Messgröße	82
4.3.2	Funktionsprinzip der Durchbrucherkennung	84
4.3.3	Vorteile der Abschaltautomatik	85
4.4	Weitere Aussagen aus Höhe und Verlauf des Plasmasignals	87
4.4.1	Erkennen von Leistungsschwankungen anhand des Signalverlaufs im Plasmasignal	89
4.4.2	Aussage über die Fokusslage	91
4.4.3	Rückschlüsse auf den Gasdruck	93
4.4.4	Korrelation des Abstands zwischen Werkstück und Gasdüse zum Plasmasignal	94
4.4.5	Detektion von Abweichungen des Wendeldurchmessers	97
4.4.6	Zusammenfassende Beurteilung der Aussagen des Plasmaleuchtens	100
5	Zusammenfassung	101
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	105
	Literatur- und Quellenverzeichnis	106

Symbole und Einheiten

Zeichen	Erklärung	Einheit
Lateinische Buchstaben		
a_g	Abstand des Werkstücks von der Gasdüse	mm
A_σ	Strahlquerschnittsfläche	μm^2
a_t	Abstand des Messobjekts zum Abstandssensor	mm
b_{AS}	Breite der Ablagerungsschicht einer Bohrung	μm
b_T	Breite des Turms an einer Bohrung	μm
D	Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse	mm
D_A	Austrittsdurchmesser einer Bohrung mit Einzug	μm
d_A	Austrittsdurchmesser einer Bohrung ohne Einzug	μm
D_D	Austrittsdurchmesser der Gasdüse	mm
D_E	Eintrittsdurchmesser einer Bohrung mit Einzug	μm
d_E	Eintrittsdurchmesser einer Bohrung ohne Einzug	μm
d_f	Durchmesser der Laserstrahltaille	μm
d_σ	Durchmesser des Laserstrahls (Zweites Moment)	μm
d_w	Wendeldurchmesser	mm
$d_{w,\text{max}}$	maximal erreichbarer Wendeldurchmesser	mm
E	mittlere Leistungsdichte (Intensität)	W/cm^2
$\mathcal{E}$	Elektrische Feldstärke	V/m
$\mathcal{E}_0$	Elektrische Feldstärke auf der optischen Achse	V/m
F	Fokussierzahl	–
f	Brennweite	mm
f_P	Pulsfolgefrequenz	kHz
f_w	Wendelbohrfrequenz	Hz
H	Energiedichte	J/cm^2
h_{AS}	Höhe der Ablagerungsschicht einer Bohrung	μm
H_s	Schwellenergiedichte für Materialabtrag	J/cm^2
h_T	Höhe des Turms einer Bohrung	μm
K	Strahlpropagationsfaktor	–

Zeichen	Erklärung	Einheit
k	Konizität	–
l_{α}	optische Eindringtiefe	μm
l_{th}	thermische Eindringtiefe	μm
M^2	Beugungsmaßzahl	–
n	Zahl der Laserpulse	–
p	Grad der linearen Polarisierung	–
P_{av}	mittlere Leistung	W
p_g	Druck des Prozessgases	bar
P_{H}	Pulsleistung	W
P_{pk}	Spitzenleistung	W
p_z	Grad der zirkularen Polarisierung	–
Q	Pulsenergie	mJ
r	Koordinate senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls	mm
r_{A}	Verrundungsradius am Lochaustritt einer Bohrung	μm
r_{E}	Verrundungsradius am Locheintritt einer Bohrung	μm
R_{Max}	Radius des kleinsten umschriebenen Kreises einer Bohrung	μm
R_{Min}	Radius des größten eingeschriebenen Kreises einer Bohrung	μm
s	Bohrlochtiefe	mm
t_{B}	Bohrzeit	s
t_{p}	Prozesszeit	s
w	Strahlradius	μm
z	Koordinate in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls	mm
z_{f}	Fokusslage (Abstand der Strahltaile von der Werkstückoberfläche)	mm
z_{R}	Rayleighlänge	mm
Griechische Buchstaben		
α_{e}	Einfallswinkel, gemessen zur Flächennormalen	°
α_{v}	Verdrehwinkel der Wendelbohroptik	°
ε	Influenzkonstante	C^2/Jm
ε_0	Dielektrizitätszahl	–
Θ_0	Divergenzwinkel des unfokussierten Laserstrahls	rad
Θ_{f}	Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls	rad
λ	Wellenlänge	nm
ω_{t}	Kreisfrequenz der Wendelbohroptik	1/s

Zeichen	Erklärung	Einheit
σ_e	Ladungsdichte	C/m ²
τ_H	Pulsdauer	ns

Extended Abstract

Apart from the widespread laser welding and laser cutting, laser drilling is one of the leading techniques for laser material processing. Especially in the automotive industry it is used in the cost-effective production of sieve, throttle and spray holes [1]. The requirements regarding hole geometry and quality vary greatly depending on the specific application.

In the production of through holes, which are not only important for the total throughput but also for the spray evolving behind the hole, these requirements are extremely high. For holes with a diameter smaller than 120 μm , this can mean a tolerance of only a few micrometers and specifications of taper and cylindricity in the range of a few per cent. Holes with a diameter between 120 μm and 1 mm are produced with electrical discharge machining at low cost. However, this technique is limited concerning even smaller diameters due to problems in handling the thin wires, which are required for holes with a high ratio of depth to diameter.

For holes with high precision requirements a new process has been developed in the last years. This process is called helical drilling [2]. For metal workpieces, deviations of the diameter down to $\pm 3 \mu\text{m}$ and $\pm 1 \mu\text{m}$ for the shape can be achieved [3]. However, the geometry of the hole depends on a number of parameters [4]. In helical drilling a pulsed laser beam is machining a workpiece with several ten thousand laser pulses. The laser pulses have a pulselength in the range of nanoseconds and pulse energy of a few millijoule. Therefore each laser pulse ablates only a small amount of material, which is a prerequisite for the high precision of the process. During the drilling process the laser beam is moved corresponding to the workpiece, usually on a circular path. The superposition of the lateral manipulation and the ablation in depth leads to a helical movement of the laser spot in the workpiece, hence defining the process as helical drilling.

For the introduction of helical laser drilling into large scale production the reproducibility of both hole size and geometry becomes a major task. The goal of this doctoral thesis is to develop methods and devices for reproducible production of micro holes with diameters smaller than 120 μm in large scale production. Using these methods the crucial process parameters are measured and fluctuations, which are typical for parts and positioning systems in the production line, are compensated. Only with these effective

control systems it is possible to fulfill the requirements which are given for the micro holes.

There are no standard machines available for precise laser drilling of metallic parts, nor are there methods for process control. For the laser itself, a device for laser beam diagnostics was used to measure the beam propagation factor. The beam propagation factor influences the focal diameter and the divergence of the laser beam. The measurement allows for the comparison of different laser systems which were used in drilling experiments in cooperation with Wawra [3]. Additionally, it gives a possibility to detect faults in the laser machining equipment, such as misalignment of optical components or unwanted laser modes, which occurred in a frequency doubled laser system being used for comparative studies by Wawra. For the production line the beam propagation factor should be measured prior to installation of the laser system as well as on a regular basis. Thus the status of the laser system can be documented and degradation or damage of optical components can be detected.

For the geometry of a laser drilled hole, the focal position, which is the distance from smallest diameter of the laser beam to the surface of the workpiece, represents a crucial process parameter. The position of the workpiece, and therefore the focal position, depends on the positioning system and, depending on how the workpiece is handled, even on the thickness of the workpiece as well. In the laboratory scale the focal position is assured by manual measurement. Given the constant position of the laser focus with respect to the laser head, the focal position is measured with feeler gauge or slip gauge.

A control system for automated production has been developed in this doctoral thesis. Different measuring devices have been evaluated for this purpose. For a flat workpiece a laser triangulator or capacitive sensor, which is common for laser cutting, could be used. With these sensors an accuracy of up to 20 μm can be achieved. However, for parts with a convex surface there was no system available on the market. The laser triangulator cannot cope with ripples on the surface, which are common for parts with cylindrical symmetry. For the capacitive sensor edges of the workpiece in the vicinity of the sensor have a strong influence on the measured value. For components which have to be drilled under varying angles this can cause strong deviations in the result of the measurement.

For such components with rough surfaces and complex shape a new system for active control was necessary. An intelligent camera, consisting of a CCD camera, a processor for image processing, and digital and serial interface in one compact housing, was used to detect the contour of both workpiece and laser head and subsequently to determine the distance of these contours. This system has proved to be most suitable for this geometry. The intelligent camera was integrated in a laser drilling machine. With a

closed circuit control the distance between workpiece and laser head is adjusted with a precision suitable for the high precision bores.

In large scale production the dimensions of a part are subject to statistical fluctuations. This causes fluctuations of the depth of the laser drilled holes. These fluctuations as well as fluctuations of the laser power lead to different durations for penetrating the part. This could be offset with by choosing the penetration time, which is observed for a part with the largest thickness within the tolerance, as the constant drilling time. This would ensure that every hole is completed. However, this would mean that for every thinner part, a varying amount of energy is deposited in the wall of the bore hole and the space behind the hole. This could yield to reduction of the hole quality, damage of inner structures and in any case to excess process time.

This problem was solved by creating a method to determine the exact moment when the workpiece is penetrated. The optical emissions of the process are detected and evaluated. In the process of laser drilling, the material of the workpiece is heated and is ejected from the surface into the surrounding atmosphere. For nanosecond laser pulses the ablated material can still absorb laser energy and is heated up to several thousand Kelvin while expanding into a plume above the workpiece. The electromagnetic emissions of these hot particles extend into the visible range. These optical emissions are detected by a photo diode. When the laser beam fully penetrates the workpiece, the area of incidence is reduced, thus reducing the amount of ablated and radiating material and the detected signal. This decrease in the signal is detected and taken as an indicator for the penetration. With an appropriate controller the laser beam is switched off upon penetration and the drilling process is stopped. This leads to constant hole quality and optimised process time.

In addition, the signal obtained from the optical emissions was examined for further significance. Process parameters such as gas pressure, focal position, and the diameter of the laser beam movement were changed to simulate maladjustment of the process or faults in the laser drilling machine. From the detected signal some data are extracted, such as maximum value, mean value or the length of the drilling process. Using this data, the correlation of the change of the process parameters with the signal is discussed. For most of the process parameters major deviations can be detected. However, to conclude the faulty process parameter from a deviation in the signal is difficult to substantiate.

With the devices and methods, which were developed during this doctoral thesis, the helical laser drilling was optimised for the high reproducibility needed in large scale production. The devices are in service in a prototype production line of the Robert Bosch GmbH for precision holes in the range from 70–120 μm . This proves the suitability of

high precision laser drilling of through holes and the devices developed in this doctoral thesis for industrial scale production.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Laserbohren ist neben dem Laserschweißen und dem Laserschneiden eines der führenden Laserverfahren für die Materialbearbeitung. Insbesondere im Fahrzeugbau dient es als attraktives Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von Sieblöchern, Drossel- und Zerstäubungsbohrungen [1]. Dabei werden unterschiedliche Anforderungen an die Bohrungsgeometrie und -qualität gestellt.

Bei der Herstellung von Einspritzdüsen sind diese Anforderungen extrem hoch, da die hierfür erzeugten Durchgangslöcher nicht nur den Durchfluss, sondern auch das Sprühbild eines Fluids bestimmen. So wird bei einem Nenndurchmesser von kleiner als $120\text{ }\mu\text{m}$ eine Durchmessertoleranz von wenigen Mikrometern verlangt und die Vorgaben für Kantenverrundung und Zylindrizität liegen ebenfalls im Prozentbereich. Bohrungen zwischen $120\text{ }\mu\text{m}$ und 1 mm können sehr wirtschaftlich mittels Senkerodieren hergestellt werden. Dieses Verfahren stößt jedoch bei kleineren Durchmessern an seine Grenzen, da die hierfür notwendigen dünnen Drähte für Bohrungen mit einem großen Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser nicht mehr handhabbar sind.

Für die hohen Anforderungen an die Bohrung wurde im Laufe der letzten Jahre ein neues Laserbohrverfahren, das Wendelbohren, entwickelt [2, 3]. Mit diesem Verfahren können hoch präzise Bohrungen erstellt werden. Die erreichbaren Abweichungen liegen für Bohrungen in metallischen Werkstoffen bei $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ beim Bohrungsdurchmesser und $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ in der Form der Bohrungen [3]. Jedoch hängt die Bohrungsgeometrie dabei von einer Vielzahl von Prozessparametern ab [4].

Zur Einführung dieses Verfahrens in die Mengenfertigung kommen zu den genannten Anforderungen auch entsprechend hohe Ansprüche hinsichtlich der Reproduzierbarkeit hinzu. Ziel dieser Arbeit ist das Erarbeiten von Verfahrens- und Systemkomponenten zur wiederholgenauen Herstellung von Mikrolöchern mit Durchmessern kleiner als $120\text{ }\mu\text{m}$ in der industriellen Fertigung. Mit Hilfe dieser Komponenten sollen Prozessparameter laufend gemessen werden um Schwankungen auszugleichen, die sich unter anderem aus fertigungsbedingten Toleranzen von Werkstück und Werkstückpositionierung erge-

ben. Nur mit wirksamen Regelmechanismen wird es möglich sein, die Kenngrößen der Durchgangsbohrungen auch in der Mengenfertigung im Bereich der Toleranz zu halten.

1.2 Zielsetzung

Für das Präzisionsbohren metallischer Werkstoffe mit Laserstrahlen gibt es keine Standardmaschinen. Ebenso sind keine Methoden zur Prozesssicherung etabliert. So greift man zur Sicherung der Fokuslage, also des Abstands des Laserfokus von der Oberfläche des Werkstücks, im Laborbetrieb auf manuelles Messen, beispielsweise mit Fühlerlehre oder Endmaß, zurück. Im Rahmen dieser Arbeit sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem sich die Position des Werkstücks vollautomatisch nachregeln lässt, um Änderungen der Lochgeometrie, welche durch Schwankungen der Fokuslage hervorgerufen werden, innerhalb des geforderten Bereichs zu halten.

In der Massenproduktion hergestellte Bauteile sind stets mit Toleranzen behaftet. Die sich hiermit ergebenden Schwankungen der zu durchbohrenden Wandstärke sowie die Leistungsschwankungen der verfügbaren Lasersysteme resultieren in unterschiedlichen Zeiten zum Durchbrechen des Werkstücks. Um sicherzustellen, dass sämtliche Bohrungen das Material durchbrechen, kann die Bohrzeit so lang gewählt werden, dass auch die größte, innerhalb der Toleranz liegende Wandstärke noch durchbohrt wird. Damit wird jedoch bei allen dünneren Teilen nach dem Durchbruch weitere Energie in die Wandung der Bohrung sowie in den Rückraum der Bohrung eingebracht. Bei Bauteilen, bei denen der Laserstrahl hinter der einzubringenden Bohrung auf eine andere Oberfläche trifft, ergibt sich somit eine Schädigung dieser Fläche, in jedem Fall aber ein weiteres Anschmelzen der Bohrlochwandung. Um diesem Problem zu begegnen, ist der Zeitpunkt zu ermitteln, in dem die Bohrung das Bauteil vollständig durchdrungen hat. Daraufhin soll durch geeignete Steuerungstechnik der Laser abgeschaltet werden, um die Bearbeitungsmaschine ohne Zeitverlust weiteraktiven zu können.

Mit Hilfe der zu erarbeitenden Verfahrens- und Systemkomponenten ist der Prozess dergestalt zu optimieren, dass er stabil genug ist, um in der Mengenfertigung eingesetzt zu werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Grundlagen des Laserbohrens werden in Kapitel 2 behandelt. Dabei geht es zum Einen um die Charakterisierung des Bohrloches mittels geometrischer Kenngrößen. Die-

se sind zum Teil von Makrobohrungen bekannt. Darüber hinaus gibt es Kenngrößen, die erst im Verlauf der Prozessentwicklung eingeführt wurden, wie beispielsweise die Maße eines Turms, der sich beim Laserbohren auf der Eintrittsseite des Laserstrahls bilden kann (S. 24).

Im Anschluss wird das Laserbohren näher erläutert. Dazu werden in Abschnitt 2.2.1 zunächst die Größen aufgeführt, mit welchen die Eigenschaften von Laserstrahlen und die Strahlformung charakterisiert werden. Einerseits dienen diese Laserstrahlparameter zum Vergleich unterschiedlicher Lasersysteme, andererseits gehen sie auch in die Beschreibung der Wechselwirkung von Laserstrahl und Materie ein.

Für das Bohren mittels Laserstrahlen werden in Abschnitt 2.2.2 die derzeit verwendeten Verfahrensvarianten erläutert und die wesentlichen Unterschiede kurz aufgezeigt. Im Anschluss wird ein qualitatives Prozessmodell, das so genannte „Hirscheegg-Modell“, vorgestellt (Abschnitt 2.2.3). Dieses teilt das Bohren in vier unterschiedliche Phasen auf, vom ersten Auftreffen der Laserstrahlen auf die Oberfläche bis zum vollständigen Durchbohren des Werkstücks, beziehungsweise bis zum Ende des Bohrfortschritts, welches bei zu geringer Pulsenergie beobachtet wird.

Anschließend werden in Abschnitt 2.2.4 die relevanten Prozessparameter aufgeführt, welche für die Reproduzierbarkeit der Bohrungen ausschlaggebend sind. Soweit sinnvoll, werden die Grenzen angegeben, die für die Parameter beim Präzisionsbohren einzuhalten sind. Das Kapitel schließt in Abschnitt 2.3 mit einer Übersicht über die bekannten Verfahren, mit denen Bohrprozesse diagnostiziert werden. Zum Teil werden mit den aufgeführten Methoden auch Prozessparameter überwacht.

Kapitel 3 befasst sich mit dem experimentellen Aufbau. Der optische Aufbau von der Strahlquelle über Strahlführungs- und -formungselemente, der für die Herstellung von Präzisionsbohrungen erstellt wurde [3], wird in Abschnitt 3.1 erläutert. In den folgenden Abschnitten 3.2–3.4 werden die Systemkomponenten aufgeführt, mit denen die relevanten Messwerte erfasst werden. Mit der in Abschnitt 3.5 erläuterten Messtechnik und Datenauswertung werden diese Messwerte verarbeitet und zur Prozessüberwachung und -regelung genutzt. Den Abschluss des Kapitels bildet in Abschnitt 3.7 die Charakterisierung der Strahlquelle, die für den Großteil der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Prozesse genutzt wurde.

Kapitel 4 behandelt die entwickelten Messverfahren sowie die hiermit erreichten Ergebnisse. Mängel am Bohrwerkzeug werden in Abschnitt 4.1 behandelt, welches die Fehlerentdeckung mit Hilfe der Strahlanalyse beschreibt. Nachfolgend geht es in Abschnitt 4.2 um die Maßnahmen zur Regelung der Fokusslage, welche ein wesentliches

Element der Prozesssicherung sind. Dabei werden in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie unterschiedliche Lösungswege aufgezeigt. In Abschnitt 4.3 wird ein Verfahren zur Bestimmung der Durchbruchzeit beschrieben. Mit dem gezeigten Verfahren wird nach Erreichen des Durchbruchs der Laserstrahl abgeschaltet und somit der Bohrprozess beendet. Im folgenden Abschnitt 4.4 wird ergänzend gezeigt, wie sich weitere Prozessparameter auf das verwendete Messsignal auswirken und die Möglichkeiten zur Überwachung dieser Parameter werden diskutiert.

Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 5 zusammengefasst. Darüber hinaus wird mit einem Ausblick auf die aktuellen Entwicklungstendenzen beim Laserbohren auch die Übertragbarkeit der Prozesssicherungskonzepte auf neue Laserbohrverfahren diskutiert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Das Laserbohren ist ein Verfahren, das sich bisher nur in wenigen Bereichen durchgesetzt hat. Dabei handelt es sich in manchen Fällen um Massenbohrungen, wie beispielsweise bei Kühlungsbohrungen in Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken [5] oder um Filterbohrungen in der Einspritztechnik [1].

Um den Anwendungsbereich des Laserbohrens zu erweitern, wurde im Laufe der letzten Jahre das Verfahren in Richtung höherer Lochqualität weiterentwickelt. Dieser Begriff der Qualität ist zum Teil abhängig von dem Einsatzbereich und kann folgende Aspekte umfassen (vgl. [3]):

- hohe Formtreue, zum Beispiel bei einer kreisförmigen Bohrung,
- geringe oder gezielt eingestellte Konizität über die Tiefe der Bohrung,
- Scharfkantigkeit,
- niedrige Rauigkeit,
- geringe Schmelzfilmbildung.



Bild 2.1: An der Düsenpannschraube werden in 5 s 540 Löcher mit Einzelpulsbohren eingebracht (aus [1]).

Für die Einführung des Prozesses in die Fertigung kommen weitere Forderungen wie

- hohe Reproduzierbarkeit,
- geringe Verschmutzung,
- kurze Prozesszeiten,
- keine Nacharbeit

hinzu.

Die Qualitätsanforderungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Geometrie der Bohrung. Deshalb wird im Folgenden dargestellt, wie die Bohrungen beschrieben werden.

2.1 Charakterisierung von Bohrungen

Die Form einer Bohrung ist in Bild 2.2 schematisch dargestellt. In einem Material der Stärke s befindet sich eine Durchgangsbohrung. Wurde die Bohrung mit dem Laser hergestellt, so bezeichnet man die der Laserstrahlquelle zugewandte Seite als Eintrittsseite. Die Seite, an welcher der Laserstrahl aus dem Material heraustritt, ist die Austrittsseite. Da die Bohrungen im Allgemeinen nicht zylindrisch sind, wird zwischen Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A unterschieden.

An beiden Enden der Bohrung kann eine Verrundung der Kanten entstehen. Diese wird auch als „Einzug“ bezeichnet. Da in den an der Oberfläche bestimmten Durchmessern auch der Einzug enthalten ist, geben diese nicht immer ein geeignetes Maß für die Größe der Bohrung an. Deshalb werden im Längsschliff im Abstand Δs von der jeweiligen Oberfläche zusätzlich Eintrittsdurchmesser d_E sowie Austrittsdurchmesser d_A gemessen. Im Allgemeinen wird $\Delta s = 0,1 \cdot s$ verwendet.

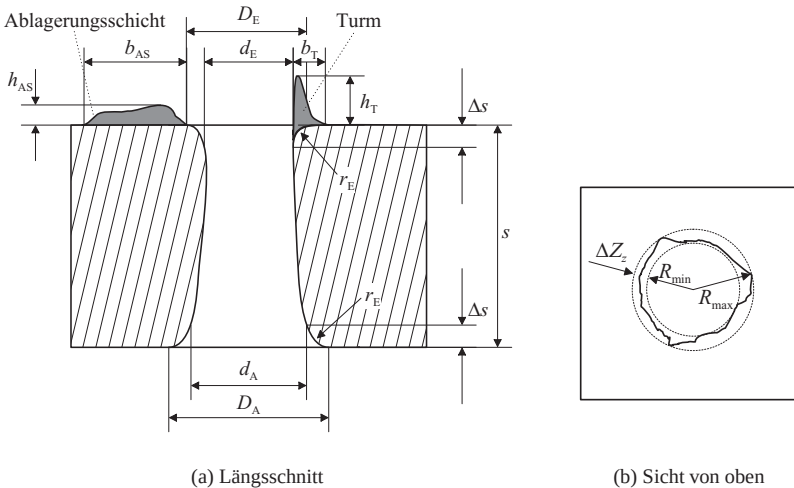


Bild 2.2: Im Bild sind die geometrischen Kenngrößen einer Bohrung dargestellt.

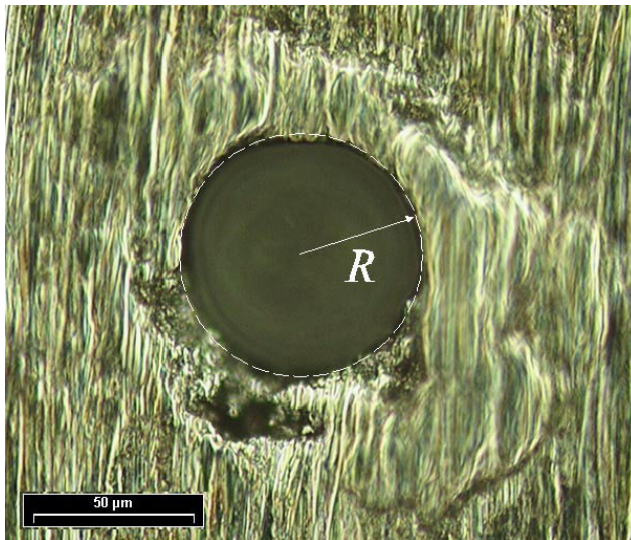


Bild 2.3: Bei der Bemaßung am Locheintritt wird häufig nur ein mittlerer Radius R angegeben. Im Bild sind auch unregelmäßige Ablagerungen zu erkennen.

Bei Mikrolöchern mit Durchmessern kleiner als $120\text{ }\mu\text{m}$ ist es allerdings sehr schwierig, den Schliff genau durch die Lochachse zu legen. Deshalb wird hier zum Vergleich der Löcher oftmals auf die Außenansicht mit Hilfe eines Mikroskops zurückgegriffen. An der Oberfläche wird hiermit der Durchmesser mit Einzug D_E gemessen. Durch Verschieben der Bildebene wird dann der Eintrittsdurchmesser ohne Einzug d_E in jener Tiefe bestimmt, in welcher der Einzug endet und der konische Abschnitt der Bohrung beginnt.

Das beim Laserbohren ausgetriebene Material lagert sich zum Teil in einer größeren Umgebung rund um die Eintrittsöffnung ab, zum Teil aber auch in einem Turm, der sich direkt an der Eintrittsöffnung bildet.

Die zur geometrischen Charakterisierung der Lochform verwendeten Größen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst [6, 7]:

Zeichen	Kenngroße	Einheit
R_{Min}	Radius des größten eingeschriebenen Kreises	μm
R_{Max}	Radius des kleinsten umschriebenen Kreises	μm
R	Mittlerer Radius der Bohrung (s. Bild 2.3)	μm

Zeichen	Kenngröße	Einheit
D_E	Eintrittsdurchmesser mit Einzug	μm
d_E	Eintrittsdurchmesser ohne Einzug	μm
D_A	Austrittsdurchmesser mit Einzug	μm
d_A	Austrittsdurchmesser ohne Einzug	μm
r_E	Verrundungsradius am Locheintritt	μm
r_A	Verrundungsradius am Lochaustritt	μm
b_{AS}	Breite der Ablagerungsschicht	μm
h_{AS}	Höhe der Ablagerungsschicht	μm
b_T	Breite des Turms	μm
h_T	Höhe des Turms	μm
s	Bohrlochtiefe	mm
Δs	Abstand von der Oberfläche beim Bestimmen des Durchmessers	mm
k	Konizität	–

Die Radien R_{Min} und R_{Max} können bei Einzelpulsbohrungen auf Grund der Abhängigkeit von Strahlprofil und Polarisation des Laserstrahls stark unterschiedlich sein. Bei Präzisionsbohrungen, die durch Wendelbohren hergestellt wurden, ist der Unterschied nur in der Größenordnung von Mikrometern. Somit wird oft auch nur ein mittlerer Radius R eines Kreises angegeben, bei dem Einbuchtungen und Ausbuchtungen entlang des Umfangs sich die Waage halten (s. Bild 2.3).

Die Konizität einer Bohrung ist definiert als

$$k = \frac{d_E - d_A}{s} \cdot 100. \quad (2.1)$$

Bei einer Lochtiefe von $s = 1$ mm bedeutet also beispielsweise eine Konizität von 3, dass der Locheintritt um $30 \mu\text{m}$ größer ist als der Austritt.

2.2 Laserbohren

Beim Laserbohren wird die Energie mit Hilfe des Laserstrahls in das Werkstück eingebracht, um Material aufzuschmelzen und zu verdampfen. Um eine bestimmte Lochform zu erzielen, müssen Bohrverfahren und Lasersystem gezielt ausgewählt werden. Nach einer Übersicht über die wichtigsten Laserstrahlparameter (Abschnitt 2.2.1) werden verschiedene Bohrverfahren (Abschnitt 2.2.2) und ein Modell zu den Mechanismen beim Laserbohren (Abschnitt 2.2.3) dargestellt. Die wesentlichen Prozessparameter sowie die einzuhaltenden Toleranzen werden in Abschnitt 2.2.4 aufgeführt.

2.2.1 Laserstrahlparameter

Beim Laserbohren werden ausschließlich gepulste Laser eingesetzt. Nur mit diesen ist es möglich, die nötige hohe Intensität zu erreichen, um Materie schlagartig aufzuschmelzen und zu verdampfen. Die Pulsdauer τ_H eines Laserpulses bezeichnet das „Intervall zwischen den Zeitpunkten, bei denen die momentane Laserleistung 50 % der Spitzenleistung zum ersten und letzten Mal erreicht“ [8]. Mit der Pulsenergie Q ergibt sich hieraus die Pulsleistung P_H als

$$P_H = \frac{Q}{\tau_H}. \quad (2.2)$$

Über die Pulsfolgefrequenz f_P , also die Anzahl der Laserpulse pro Sekunde, erhält man die mittlere Leistung P_{av}

$$P_{av} = Q \cdot f_P. \quad (2.3)$$

Für die Wechselwirkung des Laserstrahls mit Materie ist aber neben dem zeitlichen Verlauf der Energieumsetzung auch deren räumliche Verteilung relevant, die im Folgenden für den Idealfall der Gaußschen Strahlen und für reale Strahlen erläutert wird.

2.2.1.1 Beschreibung Gaußscher Strahlen

Der qualitative Verlauf eines Laserstrahls ist in Bild 2.4 dargestellt. Ausgehend von einer Strahltaile mit Durchmesser d_0 , die sich entweder im Resonator der Strahlquelle oder als Zwischenfokus zwischen Strahlquelle und Bearbeitungsoptik befindet, breitet sich der Laserstrahl mit einem Öffnungswinkel Θ_0 aus. Um die für die Materialbearbeitung nötige Intensität zu erreichen, wird er mit einer Linse fokussiert. Hierdurch wird im Abstand $f + \Delta f$ eine Strahltaile mit Durchmesser d_f erzeugt (vgl. Gl. 2.13). Die quantitative Beschreibung wird im Folgenden näher ausgeführt.

Ein Laserstrahl ist transversale elektromagnetische Strahlung (TEM). Je nach Symmetrie wird die elektrische Feldstärke mit Hermiteischen Polynomen (Rechtecksymmetrie) oder Laguerre-Polynomen (Rotationssymmetrie) beschrieben [9]. Im Fall der Rechtecksymmetrie haben die Moden $TEM_{m,n}$ m Nullstellen in x -Richtung sowie n Nullstellen in y -Richtung, im Fall der Rotationssymmetrie haben sie entsprechend m Nullstellen in radialer Richtung und n Nullstellen in azimuthaler Richtung. In beiden Fällen entspricht der Grundmode TEM_{00} einer Gaußkurve, so dass sich die radiale Feldverteilung beschreiben lässt als

$$\mathcal{E}(r, z) = \mathcal{E}_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w(z)^2}\right), \quad (2.4)$$

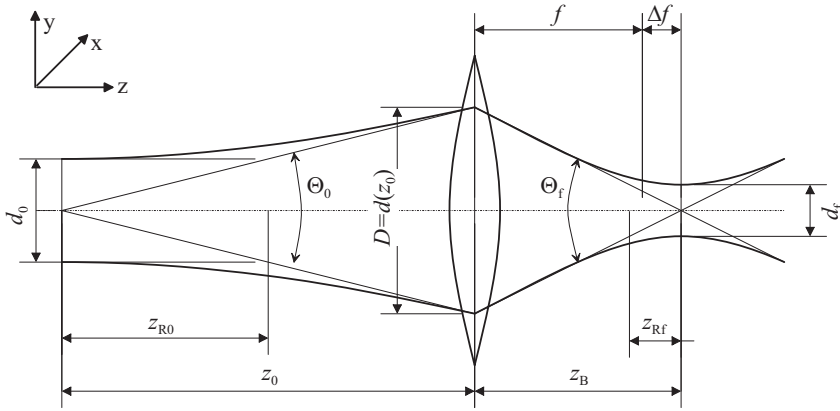


Bild 2.4: Diese Skizze zeigt die wesentlichen Strahlkenngrößen eines Gaußstrahls vor (Index 0) und nach (Index f) der Fokussierung durch eine Linse. (aus [9]).

wobei $\mathcal{E}_0$ die elektrische Feldstärke auf der optischen Achse an der Stelle $z = 0$ darstellt und $w(z)$ den Strahlradius an der Stelle z . Wie aus Gleichung 2.4 ersichtlich, bezeichnet der Strahlradius den Radius, an dem der Wert der Feldstärke auf $1/e \cdot \mathcal{E}_0$ abgefallen ist. Aus der elektrischen Feldstärke erhält man mit der Influenzkonstante $\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Jm}$ und der materialabhängigen Dielektrizitätskonstante ϵ die Energiedichte

$$H(r, z) = \epsilon \epsilon_0 (\mathcal{E}(r, z))^2 \quad (2.5)$$

einer elektromagnetischen Welle [10]. Hierin ist die Bedeutung der elektrischen Feldstärke für die Materialbearbeitung zu erkennen. Sie ist ein Maß dafür, wie viel Energie der Laserstrahl für den Materialabtrag zur Verfügung stellen kann.

Aus Gleichung 2.4 ergibt sich für die Energiedichte im Abstand z von dem Ort mit dem kleinsten Strahldurchmesser, der so genannten der Strahltaile [9]:

$$H(r, z) = H_0(z) \exp\left(-\frac{2r^2}{w(z)^2}\right), \quad (2.6)$$

$$\int_0^{w(z)} H(r, z) dr = \int_0^{w(z)} H_0(z) \exp\left(-\frac{2r^2}{w(z)^2}\right) dr \quad (2.7)$$

$$= 0,86 \cdot \int_0^\infty H_0(z) \exp\left(-\frac{2r^2}{w(z)^2}\right) dr. \quad (2.8)$$

$H_0(z)$ ist hierbei die Energiedichte auf der optischen Achse. Innerhalb des Kreises mit Durchmesser $d(z) = 2w(z)$ liegen also 86 % der Energie des Laserstrahls.

In Ausbreitungsrichtung lässt sich die Änderung des Strahldurchmessers mit

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (2.9)$$

beschreiben. Dabei ist d_0 der Strahldurchmesser an der Strahltaille und die Rayleighlänge z_R der Abstand vom Fokus, an dem sich der Querschnitt verdoppelt hat. Für sie gilt

$$z_R = \frac{\pi d_0^2}{4\lambda}. \quad (2.10)$$

Für $z \gg z_R$ geht die Strahlform in einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von

$$\Theta_0 = \frac{4\lambda}{\pi d_0} \quad (2.11)$$

über. Dieser so genannte Divergenzwinkel wird zwar durch optische Elemente verändert, jedoch bleibt das Produkt aus Divergenzwinkel und Taillendurchmesser, das sogenannte Strahlparameterprodukt

$$\frac{\Theta_0 d_0}{4} = \frac{\lambda}{\pi} = \text{const.}, \quad (2.12)$$

unverändert. Das bedeutet in der Praxis: Je kleiner der Fokus gewählt wird, desto größer wird die Divergenz des Laserstrahls, das heißt, um so schneller nimmt die Energiedichte des Strahls jenseits der Strahltaille ab.

Wird der Laserstrahl fokussiert (Bild 2.4), so ergeben sich die Strahlparameter Θ_f , d_f , sowie z_{Rf} aus den ursprünglichen Strahlparametern (Index 0) wie folgt:

$$\Theta_0 d_0 = \Theta_f d_f \quad (2.13)$$

$$z_{Rf} = \frac{d_f}{\Theta_f} = \frac{\pi d_f^2}{4\lambda} \quad (2.14)$$

$$d_f = \frac{d_0 f}{\sqrt{(z_0 - f)^2 + z_{R0}^2}} \quad (2.15)$$

$$\Theta_f = \frac{4\lambda}{\pi d_f}. \quad (2.16)$$

Dabei liegt die Strahltaille, im Gegensatz zur geometrischen Optik, nicht im Abstand der Brennweite f von der Linse, sondern hierzu verschoben um

$$\Delta f = \frac{(z_0 - f) f^2}{(z_0 - f)^2 + z_{R0}^2}. \quad (2.17)$$

In der Näherung $f \ll z_0$, also wenn die Brennweite der verwendeten Fokussieroptik wesentlich kleiner als der Abstand der Linse von der Strahltaille ist, gilt

$$d_f \approx \frac{d_0 \Theta_0 f}{d(z_0)} \quad (2.18)$$

$$\Leftrightarrow d_f \approx d_0 \Theta_0 F \quad (2.19)$$

$$\text{mit Gl. (2.12)} \Rightarrow d_f \approx \frac{\lambda}{\pi} \frac{4f}{D} \quad (2.20)$$

$$\Theta_f \approx \frac{d(z_0)}{f} = \frac{D}{f} = \frac{1}{F}. \quad (2.21)$$

Hierbei ist D der Strahldurchmesser auf der Fokussieroptik. Der Quotient $F = f/D$ wird auch als „Fokussierzahl“ oder „F-Zahl“ bezeichnet.

Ein kleiner Fokus lässt sich folglich erreichen, indem man eine kurze Brennweite f wählt oder den Durchmesser des Strahls $d(z_0)$ auf der Linse durch Aufweiten mit einem Teleskop vergrößert. Letzteres wird oft bevorzugt, damit der Arbeitsabstand der Fokussieroptik nicht zu klein wird. Dabei muss der Durchmesser der Fokussieroptik ausreichend groß sein, damit der Laserstrahl nicht beschnitten wird und um Linsenfehler wie sphärische Abberation zu vermeiden. Ein ausreichender Arbeitsabstand ist von Vorteil, um Verschmutzungen der Optik zu verringern sowie Platz für die Bauteilhalterung und -manipulation zu haben.

2.2.1.2 Beschreibung realer Strahlen

In der Praxis ist ein Laserstrahl meist eine Überlagerung verschiedener Moden. Bei einem Hochleistungslaser kann zwar durch Einführen einer Modenblende in den Resonator das Anschwingen höherer Moden verhindert werden, jedoch geht dadurch auch die Strahlungsenergie verloren, die in diesen Moden enthalten ist.

Die Überlagerung verschiedener Moden führt dazu, dass sich ein Laserstrahl nicht mehr so gut fokussieren lässt, wie es bei einem Gaußstrahl der Fall wäre. Um einen Vergleich für die Fokussierbarkeit zu erhalten, verwendet man den Strahlpropagationsfaktor K bzw. die Beugungsmaßzahl M^2 :

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{4}{d_0 \Theta_0}. \quad (2.22)$$

Wie aus Gleichung 2.11 ersichtlich, entspricht dies dem Verhältnis der Strahlparameterprodukte des Gaußschen Strahls zu dem des realen Laserstrahls [8]. Ein Laserstrahl mit einer Beugungsmaßzahl von $M^2 = 1$ wird auch als „beugungsbegrenzt“ bezeichnet. Durch den Beitrag höherer Moden erhält man folgende Fokusabmessungen:

$$d_f = M^2 \cdot \frac{4\lambda F}{\pi}, \quad (2.23)$$

$$z_{Rf} = M^2 \cdot \frac{4\lambda F^2}{\pi} \quad (2.24)$$

$$\Rightarrow z_{Rf} = F \cdot d_f. \quad (2.25)$$

Für das Laserbohren von hochpräzisen Durchgangsbohrungen verwendet man Laser mit Beugungsmaßzahlen $M^2 \approx 1$, für Bohrungen mit geringeren Ansprüchen an die Präzision reicht eine Beugungsmaßzahl $M^2 < 10$.

2.2.1.3 Bestimmung des Strahlpropagationsfaktors

Die Messung zur Ermittlung des Strahlpropagationsfaktors ist in der Europäischen Norm ISO 11146 beschrieben. An mindestens zehn verschiedenen axialen Positionen ist eine Messung des Strahldurchmessers durchzuführen. Ein hierzu geeigneter Messaufbau wird in Abschnitt 3.4 näher beschrieben. Bild 2.5 zeigt die Mindestanforderungen bezüglich der Messpositionen.

Zur Bestimmung des Strahldurchmessers wird das zweite Moment der Leistungsdichte verwendet:

$$d_\sigma(z) = 2\sqrt{2}\sigma(z), \text{ mit} \quad (2.26)$$

$$\sigma^2(z) = \frac{\iint r^2 E(r,z) r dr d\phi}{\iint E(r,z) r dr d\phi}. \quad (2.27)$$

Die Leistungsdichte $E(x,y)$ ist die Strahlleistung, die am Ort (x,y) auf eine Fläche δA auftrifft, geteilt durch die Fläche δA . Hierbei ist r der Abstand vom Schwerpunkt $(\bar{x}, \bar{y})$,

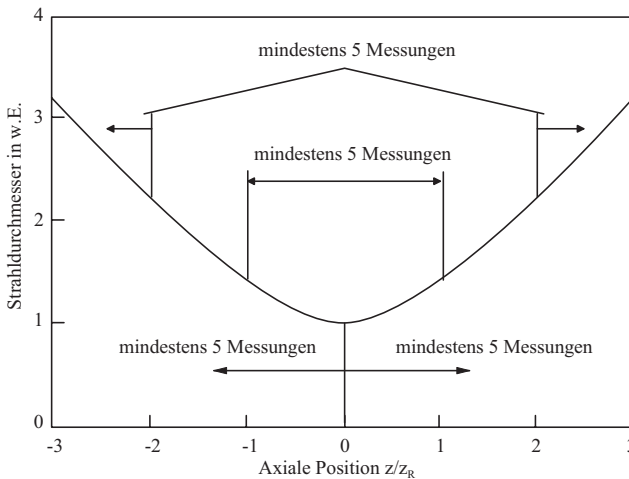


Bild 2.5: Nach EN ISO 11146 ist der Strahlquerschnitt an mindestens fünf verschiedenen Stellen vor und hinter dem Fokus zu messen. Weiterhin müssen im Nahfeld ($z < z_R$) und im Fernfeld ($z > 2z_R$) jeweils fünf Messpositionen liegen [11].

der über die ersten Momente der Koordinaten definiert ist:

$$\bar{x} = \frac{\iint x E(x,y,z) dx dy}{\iint E(x,y,z) dx dy}, \quad (2.28)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y E(x,y,z) dx dy}{\iint E(x,y,z) dx dy}. \quad (2.29)$$

Wie in Gleichung 2.9 ausgedrückt, lässt sich die Änderung des Strahldurchmessers entlang der optischen Achse mit einer Hyperbel beschreiben. Mit einer hyperbolischen Anpassung der gemessenen Werte des Strahldurchmessers in der Form

$$d_\sigma^2 = A + B \cdot z + C \cdot z^2 \quad (2.30)$$

ergeben sich aus den Parametern A , B und C die Strahlkenngrößen wie folgt:

$$d_f = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \quad (2.31)$$

$$K = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{1}{\sqrt{A \cdot C - \frac{B^2}{4}}} \quad (2.32)$$

$$z_{Rf} = \frac{1}{C} \sqrt{A \cdot C - \frac{B^2}{4}}. \quad (2.33)$$

2.2.1.4 Polarisation der Laserstrahlung

Wie in Abschnitt 2.2.1.1 erwähnt, handelt es sich bei der Grundmode um eine Transversale Welle, das heißt, das elektrische Feld ist in einer bestimmten Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung orientiert. Da das Einkopplungsverhalten des Laserstrahls in das Werkstück von der Orientierung der Polarisation in Bezug auf die Grenzfläche abhängt [12], versucht man, die lineare Polarisation in eine zirkuläre Polarisation überzuführen. Bei zirkularer Polarisation sind die Anteile der elektrischen Feldstärke in der x - z -Ebene und der hierzu senkrechten y - z -Ebene gleich groß. Dies wird dadurch erreicht, dass bei einem vollständig linear polarisierten Laserstrahl mit Hilfe einer $\lambda/4$ -Platte die Polarisation eines Teils des Laserstrahls um 90° gedreht wird. Durch Depolarisation im Laserstab, einen Anteil an zufällig orientierter Laserstrahlung oder Depolarisation an reflektierenden Optiken liegt jedoch oftmals kein rein linear polarisierter Laserstrahl vor, so dass es nicht vollständig gelingt, einen zirkular polarisierten Laserstrahl zu erzeugen. Als Maß für die Polarisation dient der *Grad der linearen Polarisation*

$$p = \frac{P_x - P_y}{P_x + P_y}. \quad (2.34)$$

Dabei werden die Richtungen x und y so gewählt, dass die Strahlungsleistung nach Durchgang durch einen linearen Polarisator minimal bzw. maximal geschwächt wird. Alternativ kann auch der *Grad der zirkularen Polarisation*

$$p_z = \frac{P_y}{P_x} = \frac{1-p}{1+p} \quad (2.35)$$

verwendet werden. Bei den Bohrversuchen lag der Polarisationsgrad bei $p_z = 80\%$ (s. Tabelle 3.2).

2.2.2 Bohrverfahren

Beim Laserbohren wird der Laserstrahl verwendet, um Material zu erhitzen und über die Flüssig- oder Dampfphase auszutreiben. Der Austreibmechanismus hängt davon ab, in welcher Zeit und mit welcher räumlichen Verteilung die Strahlungsenergie eingebracht wird. Je nach eingesetzter Laser- und Verfahrenstechnik unterscheidet man zwischen vier Bohrverfahren, die in Bild 2.6 schematisch dargestellt sind:

1. Einzelpulsbohren: Hierbei wird mit einem einzigen Laserpuls die Bohrung erzeugt. Verwendet werden Laserpulse mit einer Pulslänge von einigen Hundert Mikrosekunden bis zu einigen Millisekunden. Dabei bleiben Laserstrahl und Werkstück zueinander unbewegt. Der Bohrungsdurchmesser entspricht ungefähr dem Durchmesser des Laserstrahls.
2. Perkussionsbohren: Bei Pulsen mit Pulslängen von einigen hundert Mikrosekunden oder kürzer ist die Pulsenergie so gering, dass das Werkstück erst nach mehreren Laserpulsen durchdrungen wird. Hierbei trifft der Laserstrahl stets die gleiche Stelle des Werkstücks. Zum Teil wird jedoch der Laserfokus in der Tiefe nachgeführt.
3. Trepanieren (Schneidbohren): Um größere Löcher zu fertigen, beschreibt der Laserstrahl auf dem Werkstück eine in der Regel kreisförmige Bahn. Pulslänge und -energie werden so gewählt, dass der Laserstrahl mit wenigen Pulsen das Werkstück durchdringt und dann das Loch ausschneidet.
4. Wendelbohren (helisches Bohren): Bei Verwendung sehr kurzer, energiearmer Laserpulse arbeitet sich der Laserstrahl nur Stück für Stück durch das Werkstück hindurch. Somit beschreibt der Auftreffpunkt des Laserstrahls eine Wendel oder Helix im Werkstück. In dem Fall, dass eine nicht kreisförmige Struktur abgetragen wird, spricht man auch von Laser-Erodieren.

Bei den Bohrverfahren nehmen in der genannten Reihenfolge die Pulsdauer und -energie ab. Hierdurch wird die Prozessgeschwindigkeit verringert (s. Bild 2.6). Im Gegenzug

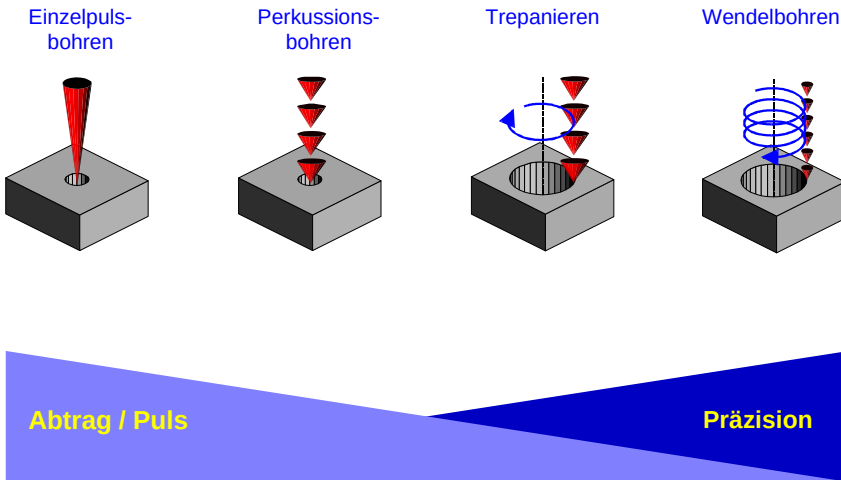


Bild 2.6: Vergleich der Bohrverfahren [2, 3]: Von links nach rechts nimmt die Präzision der eingebrachten Konturen zu. Dies wird erreicht, indem man Laserpulse mit immer kürzerer Pulslänge und geringerer Pulsenergie verwendet, wodurch das abgetragene Volumen pro Laserpuls und damit auch die Prozessgeschwindigkeit abnimmt.

nehmen Bohrzeit und Präzision zu. Hierbei bezeichnet man reproduzierbare Bohrungen, die den geometrischen Spezifikationen mit engen Toleranzen entsprechen, als „Präzisionsbohrungen“. Dies bedeutet zum Beispiel die Angabe eines Durchmessers von $100 \pm 3 \mu\text{m}$ mit einer Abweichung von der Kreisform von weniger als $1 \mu\text{m}$.

Da sich die beim Laserbohren entstehende Schmelze oft nur ungleichmäßig austreiben lässt, werden die Löcher um so gleichmäßiger, je weniger Schmelze beim Bohren erzeugt wird. Hierfür gibt es mehrere Ansatzpunkte.

Die Energiedichte des Laserstrahls bestimmt das Verhältnis von Materialdampf zu Schmelze. Durch Wahl einer Laserquelle mit hoher Energiedichte kann somit der Anteil des Werkstoffs, der gleich in die Dampfphase übergeführt wird, erhöht werden.

Speziell an der Oberfläche wirkt sich das Strahlprofil des verwendeten Lasers aus. Die Ablation durch den Laserstrahl erfolgt in den Bereichen, in denen die absorbierte Laserintensität die Schwellenergiedichte H_s übersteigt (s. Bild 2.7). An der Ablationsfront in der Mitte des Laserstrahls wird diese Schwelle deutlich überschritten. Das Material wird zum Teil verdampft. Durch den hierbei entstehenden Druck wird die Schmelze ausgetrieben. Am Rand des Laserstrahls und somit am Rand des Bohrlochs liegt die Energiedichte unter der Ablationsschwelle. Die entstehende Schmelze haftet an der

Bohrungswand und wird nur zum Teil durch das vom Bohrungsgrund abströmende Material ausgetrieben. Soweit die Schmelze hier entfernt wird, bildet sich ein Einzug auf der Eintrittsseite. Um diesen Teil der Schmelze und den Einzug zu minimieren, soll die Laserenergie möglichst gut fokussiert werden, so dass mit einem steilen Intensitätsprofil die Laserenergie weitgehend über der Ablationsschwelle liegt und somit zum Materialabtrag eingesetzt wird.

Wie in Bild 2.7 dargestellt, entspricht beim Perkussionsbohren und Einzelpulsbohren der Durchmesser der Bohrung ungefähr dem des Laserstrahls. Durch die am Rand langsam abnehmende Intensität entsteht hier ein dicker Schmelzfilm beziehungsweise großer Einzug. Beim Wendelbohren hingegen wird ein Laserstrahl mit deutlich kleinerem Durchmesser verwendet. Dadurch ergibt sich eine geringere Schmelzfilmdicke und eine scharfkantige Eintrittsöffnung.

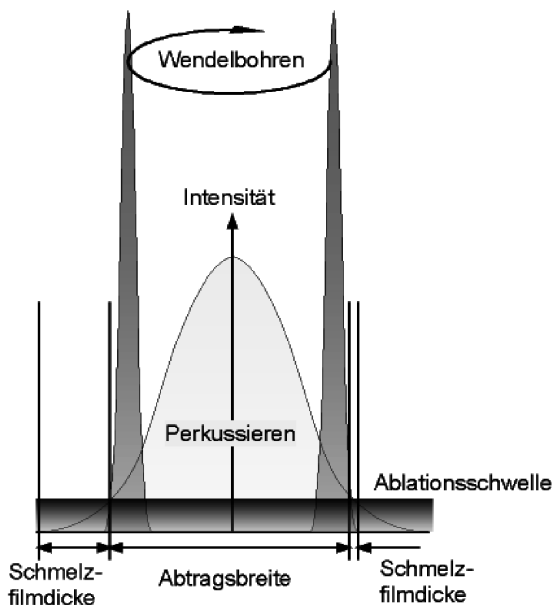


Bild 2.7: Zum Abtragen von Material muss die Laserintensität oberhalb der Ablationsschwelle H_s liegen. Bei identischen Lochdurchmessern ist schematisch die Schmelzfilmdicke beim Perkussionieren oder Einzelpulsbohren (links) bzw. beim Wendelbohren (rechts) dargestellt (aus [3]).

Schmelze entsteht nicht nur in Bereichen, in denen die Laserstrahlung direkt absorbiert wird, sondern auch in jenen Schichten, die durch Wärmeleitung erwärmt werden. Die Tiefe dieser Schicht wird einerseits durch die optische Eindringtiefe, andererseits durch Wärmeleitung bestimmt. Für Metalle ist die optische Eindringtiefe l_α wesentlich kleiner als die thermische Eindringtiefe l_{th} , welche über die Temperaturleitfähigkeit κ von der Pulslänge abhängt:

$$l_{th} = 2\sqrt{\kappa \cdot \tau_H}. \quad (2.36)$$

Dieser Zusammenhang gilt bis zu Pulslängen von 10 ps. Für kürzere Pulse bleibt die minimal zu erreichende Schmelzschichtdicke konstant und liegt bei 1 μm [13, 14]. Mit abnehmender Pulsdauer nimmt bei den verfügbaren Laserstrahlquellen aber auch die Pulsenergie und damit der Abtrag pro Puls ab. Die Prozessgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Abtrag pro Puls, welcher sich während des Bohrprozesses ändert (vgl. Abschnitt 2.2.3), und der Pulsfrequenz.

Wird zur Verringerung der Schmelzablagerungen die Pulsdauer des Bohrlasers verkürzt, so wird die Effizienz durch einen weiteren Effekt beschränkt. Bei kurzen Pulsen mit Pulsdauern von einigen 10 ns und kürzer kann es je nach Pulslänge, Wellenlänge, Pulsenergie und Fokussierung zu Luftdurchbrüchen kommen. Dabei wird ab einer Leistungsdichte von

$$E = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{d_f^2}{4} \cdot \tau_H} > 10^{12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \quad (2.37)$$

die Luft so weit ionisiert, dass ein Plasma entsteht. Das Plasma kann durch Absorption, Brechung und Streuung des Laserlichts die Effizienz des Bohrprozesses beeinträchtigen. Deshalb sollte die Leistungsdichte unter dieser Schwelle gehalten werden. Zwar könnte der Luftdurchbruch auch durch Bohren im Vakuum vermieden werden, jedoch werden hierdurch die Prozesskosten in der Regel zu hoch.

Eine Reihe von Untersuchungen hat sich bereits mit der Frage beschäftigt, welche Pulslänge und Wellenlänge für das Laserbohren vorzuziehen ist [15, 16, 17, 18, 19, 20]. Um einerseits wenig Schmelze, andererseits aber akzeptable Prozesszeiten zu erreichen, hat sich der Einsatz von Nanosekundenpulsen als geeignet erwiesen [3, 18]. Als Bohrverfahren höchster Präzision wird hierbei das Wendelbohren eingesetzt. Ob die Verwendung von Lasern mit kürzerer Pulsdauer zu gleichwertigen oder besseren Ergebnissen führt, ist Gegenstand laufender Untersuchungen [21, 22]. Die Verwendung in der industriellen Mengenfertigung hängt jedoch wesentlich von der Verfügbarkeit zuverlässiger und einfach zu bedienender Lasersysteme ab. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind Lasersysteme mit Pulslängen von 10–20 ns und Puls wiederholraten von bis zu 10 kHz verfügbar.

2.2.3 Hirscheegg-Modell

Die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen zum Laserbohren wurden im Rahmen zweier Workshops zu den Grundlagen des Laserabtrags [2, 23, 24, 25] zusammengetragen. Hieraus wurde unter Mitwirkung des Autors das Hirscheegg-Modell, benannt nach dem Tagungsort der Workshops, entwickelt, welches qualitativ die Abtragsprozesse beim Laserstrahlbohren beschreibt. Entsprechend dem Hirscheegg-Modell wird der Bohrprozess in vier Phasen eingeteilt:

- I In der ersten Phase, dem planaren Abtrag, trifft der Laserstrahl unter 90° auf die Oberfläche. Dies ermöglicht eine wenig behinderte Energieeinkopplung und Materialabströmung und somit eine hohe Abtragsrate. Die Menge des abgetragenen Materials hängt direkt von der eingestrahlten Energie ab. Entsprechend der Energiedichtevertelung des Laserstrahls bildet sich ein Oberflächenprofil im Werkstück aus. Abtrag kann überall dort erfolgen, wo die Energiedichte H des Laserstrahls größer als die Schwellenergiedichte H_s ist (s. Bild 2.7). Mit längeren Pulsen steigt die thermische Eindringtiefe, so dass die Bohrgeschwindigkeit steigt.
- II Im Folgenden hängt durch die Ausbildung des Oberflächenprofils der Einfallswinkel vom Ort auf dem Werkstück ab. In der Mitte des Bohrlochs trifft der Laserstrahl weiterhin unter 90° auf die Oberfläche, außermittig trifft er unter zunehmend spitzem Winkel auf die Oberfläche. Je spitzer der Auftreffwinkel, desto größer wird der Reflexionsgrad und desto geringer folglich auch die eingekoppelte Energie. Zusätzlich nimmt die vom Laser bestrahlte Fläche zu, so dass die Leistungsdichte abnimmt und weniger Material abgetragen wird [26]. Durch die unterschiedlichen Abtragsraten wird einerseits eine Kapillare ausgebildet, andererseits wird durch die Reflexionen an der Bohrungswand das ursprüngliche Strahlprofil in der Bohrung verändert [27]. Obwohl durch die Vielfachreflexionen eine Selbstfokussierung erreicht wird, nimmt die Abtragsrate stark ab. Dies wird durch die abschirmende Wirkung eines Plasmas erklärt (siehe unten).
- III Nach Ausbilden der Kapillare folgt als dritte Phase der konstante Bohrfortschritt. Hierbei bleibt die Abtragsrate nahezu konstant und die Form des Bohrlochgrunds wird kaum verändert.
Über die Tiefe der Bohrung geht Energie des Laserstrahls verloren, da Laserstrahlung in der Wandung absorbiert wird. Auf der anderen Seite nimmt die Absorption des Plasmas mit sinkender Leistungsdichte des Laserstrahls ab, so dass die transmittierte Laserleistung und somit auch die Abtragsrate annähernd konstant bleiben. Bei kürzeren Laserpulsen ist die Plasmaabschirmung geringer, so dass bei gleicher mittlerer Leistung eine höhere Abtragsrate erreicht wird.

Durch die Polarisationsabhängigkeit der Absorption [28, 9] ist die Absorption über den Umfang der Bohrung ungleichmäßig, sofern der Laserstrahl nicht vollkommen zirkular polarisiert ist. Dadurch kann es, sofern die Laserenergie am Grund der Bohrung nicht mehr an jeder Stelle zum Abtragen ausreicht, zu einem Abknicken der Bohrung kommen. Dies stellt das Ende der dritten Phase dar.

- IV Da in dem abknickenden Teil der Bohrung die Laserenergie mehr und mehr in der Wandung absorbiert wird, kommt es in der vierten Phase zu einem abrupten Stopp des Bohrfortschritts sobald die Energiedichte H des Laserstrahls kleiner wird als die Schwellenergiedichte H_s .

Zur Herstellung von Durchgangsbohrungen werden Laser mit einer ausreichend hohen Pulsenergie verwendet, so dass in der dritten Phase des Bohrfortschritts der Durchbruch erfolgt.

Im Rahmen des Hirscheegg-Modells wird von zwei „Bohrwerkzeugen“ gesprochen. Das erste Werkzeug ist der Laserstrahl. Durch Fresnelabsorption der Laserstrahlung geht die Energie direkt auf das Material über und führt zur Erwärmung und Ablation. Da die Absorption durch den fast senkrechten Einfall am Bohrungsgrund am effizientesten ist, wirkt der Laserstrahl vornehmlich axial abtragend. Das zweite Bohrwerkzeug ist das Plasma. Das Plasma tritt in drei Formen auf [25]:

1. Materialdampf über dem Werkstück absorbiert die eingestrahlte Laserenergie und wird dadurch erhitzt und ionisiert.
2. Bei sehr hohen Leistungsdichten kann bereits in reiner Luft ein Plasma gezündet werden. Dieser so genannte Luftdurchbruch tritt im Fokus des Laserstrahls auf, da nur hier die Schwelle zum Zünden des Plasmas von einigen 10^{12} W/cm^2 erreicht wird (s. S. 34).
3. Durch Verunreinigungen der Atmosphäre, wie zum Beispiel Metallmoleküle oder Cluster, die vom vorhergehenden Laserpuls noch in der Atmosphäre sind, wird die Leistungsdichte-Schwelle jedoch um mehrere Größenordnungen reduziert. Somit kommt es zur Entstehung eines partikelgezündeten Plasmas, das vornehmlich in der Bohrung entsteht, da hier die Partikel nicht effizient genug durch das Prozessgas entfernt werden.

Das Plasma bewirkt einerseits durch Wärmeleitung und Strahlung einen Energieübertrag und damit das Aufschmelzen des Materials entlang der Bohrungswand, andererseits bewirkt der hohe Druck, der durch Expansion des heißen Plasmas entsteht, dass aufgeschmolzenes Material aus der Bohrung herausgetrieben wird. Dadurch wird die Dicke der verbleibenden Schmelzeschicht verringert und die Wandung geglättet, das Plasma wirkt als „Plasma-Brush“ (von engl. brush = Bürste).

Temperatur und Druck des Plasmas werden stark durch die umgebende Atmosphäre beeinflusst [29, 30, 31]. So erhält man mit Argon als Umgebungsgas ein sehr dichtes, heißes Plasma. Mit Helium ergeben sich deutlich geringere Temperaturen und niedrigere Drücke, so dass hier das Plasma weniger zum Abtragen beiträgt. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde Stickstoff als Prozessgas verwendet, womit sich eine hohe Lochqualität bei mittlerer Bohrgeschwindigkeit erreichen lässt.

2.2.4 Relevanz und Toleranzen der Prozessparameter

Das Ergebnis des Bohrprozesses hängt von einer Vielzahl von Prozessparametern ab. Im Folgenden sollen die wichtigsten Parameter aufgeführt werden. Im Hinblick auf eine hohe Reproduzierbarkeit in der industriellen Fertigung müssen diese Parameter überwacht und zum Teil geregelt werden. Hierzu werden Notwendigkeit und Möglichkeiten diskutiert. Mangels fertigungsreifer Lösungen zu Beginn dieser Arbeit wurden für einige Parameter neue Konzepte und die Umsetzung in Mess- und Regelsysteme erarbeitet, wie in Kapitel 4 weiter ausgeführt wird.

2.2.4.1 Strahlqualität

Zur Minimierung von Schmelzebildung und Einzug am Locheintritt soll der Laserstrahl auf einen möglichst kleinen Durchmesser mit steiler Energiedichteverteilung fokussiert werden (s. Abschnitt 2.2.2). Da nach Gleichung 2.6 das Intensitätsprofil mit kleinem Fokusdurchmesser steiler wird und durch Gleichung 2.23 der Fokusdurchmesser von der Beugungsmaßzahl abhängt, werden Lasersysteme mit möglichst hoher Strahlqualität, das heißt kleiner Beugungsmaßzahl verwendet. Um die Strahlqualität bei Strahlführung und -formung zu erhalten, müssen optische Elemente mit hoher Qualität und ausreichend großer Apertur eingesetzt werden.

Eine gezielte Änderung der Strahlqualität zur Untersuchung ihres Einflusses auf die Lochgeometrie ist nur schwer zu bewerkstelligen. Durch Einführen von einer variablen Apertur kann der Laserstrahl beschnitten werden, was zu einer Vergrößerung der Beugungsmaßzahl, also einer Verschlechterung der Strahlqualität führt.

In der Praxis sind verschiedene Ursachen für eine Änderung der Strahlqualität möglich. Durch Eingriff des Bedieners können Strahlführungskomponenten dejustiert werden. Weiterhin kann es in einer Bearbeitungsstation zu einer Dejustage des Laseroszillators kommen oder zu einer Alterung des laseraktiven Mediums oder der Pumplichtquellen, im Falle des verwendeten Lasers also der Pumpdioden. Eine weitere Möglichkeit, wie

die Strahlqualität vermindert werden könnte, ist die allmähliche Verschmutzung oder Schädigung von optischen Elementen wie Umlenkspiegeln, Fokussieroptik und Schutzglas.

Bei der Beurteilung der Folgen einer solchen Veränderung der Strahlqualität kommt es im wesentlichen auf die geforderte Maßhaltigkeit der Bohrungen an. Durch die Strahlqualität wird unter anderem der Fokusedurchmesser verändert. Nach Gleichung 2.23 ist der Fokusedurchmesser direkt proportional zur Beugungsmaßzahl. Zum Beispiel wurde in den Versuchen mit einem Fokusedurchmesser von $40\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Beugungsmaßzahl von 1,2 gearbeitet (vgl. Tab. 3.2). Eine Verschlechterung der Beugungsmaßzahl auf 1,3 führt zu einem Fokusedurchmesser von $43\text{ }\mu\text{m}$. Somit wird auch die Bohrung in erster Näherung auf der Eintrittsseite um $3\text{ }\mu\text{m}$ größer werden. Jedoch kann mit der Änderung der Beugungsmaßzahl, je nachdem, wodurch sie bedingt ist, auch eine Verschiebung der Fokusslage und eine Änderung der Divergenz einhergehen. Somit kann die genaue Auswirkung auf die Lochgröße und -form nicht angegeben werden.

Festzuhalten bleibt, dass die Beugungsmaßzahl überwacht werden sollte, um eine gleichbleibende Qualität der Bohrungen sicherzustellen. Insbesondere bei Inbetriebnahme des Lasers und Aufbau einer Bearbeitungsmaschine muss die Strahlqualität ermittelt werden, um den Zustand der Komponenten zu dokumentieren. Möglichkeiten hierzu werden in Abschnitt 3.7 aufgezeigt.

2.2.4.2 Fokusslage

Die Form der Bohrung wird weiterhin durch die Fokusslage und die Pulsenergie beeinflusst. Die Fokusslage definiert die Lage der Strahlkaustik bezüglich der Werkstückoberfläche. Dabei spricht man von positiver Fokusslage, wenn die Laserstrahltaile über der Werkstückoberfläche liegt und entsprechend von negativer Fokusslage, wenn die Strahltaile innerhalb oder unterhalb des Werkstücks liegt. Nach Gleichung 2.6 wird hierdurch die Energiedichte beeinflusst, die zum Materialaustrieb und zur Wechselwirkung mit dem Plasma zur Verfügung steht.

Untersuchungen von [3] zeigen eine Abhängigkeit des Eintritts- und Austrittsdurchmessers der Bohrung von der Fokusslage für verschiedene Leistungen (Bild 2.8). Mit zunehmender Laserleistung nimmt der Bohrungsdurchmesser zu. Hierbei ist je nach Leistung der Einfluss der Fokusslage auf Bohrungseintritt und -austritt unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei niedriger Leistung nimmt der Bohrungsdurchmesser am Austritt mit zunehmender Fokusslage ab. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Intensität des Laserstrahls mit zunehmendem Abstand von der Strahltaile abnimmt und am Austritt der Bohrung

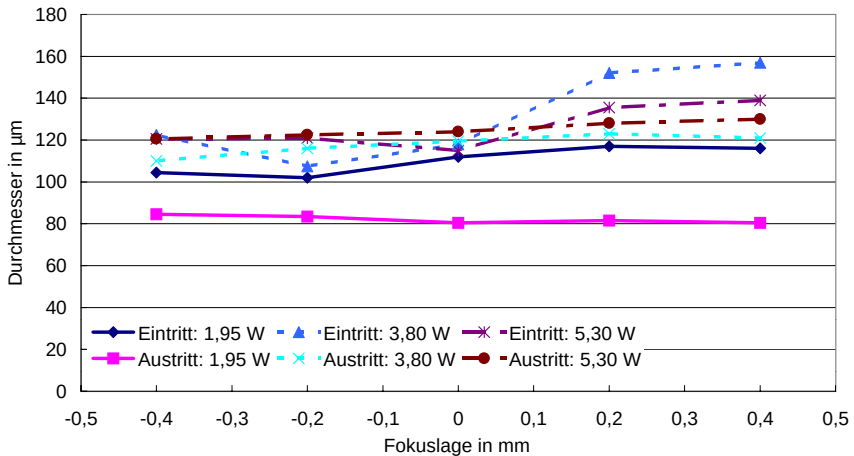


Bild 2.8: Bohrungsdurchmesser über der Fokuslage mit der Laserwellenlänge 1064 nm bei unterschiedlichen Laserleistungen bei 10 µm Fokusradius, 23 µm Wendeldurchmesser in 1 mm Stahl (18CrNi8) aus [3].

nur auf einem kleineren Durchmesser noch über der Abtragsschwelle liegt. Bei höherer Leistung hingegen nimmt der Durchmesser am Lochaustritt zu, wenn der Fokus aus dem Werkstück heraus geführt wird. Hier ist auf Grund der nun höheren Pulsenergie auch am Bohrungsgrund trotz des größeren Strahldurchmessers noch ausreichend Intensität vorhanden, um das Material zu verdampfen. Da Bohrungseintritt und -austritt unterschiedlich stark von Fokuslage und Laserleistung abhängen, kann durch geeignete Parameterwahl die Konizität der Bohrung gezielt eingestellt werden.

Um die gewünschte Lochform zu erhalten, muss die Fokuslage genau eingehalten werden. Zum Beispiel ist für die Laserleistung von 3,8 W und 5,3 W ersichtlich, dass für Fokuslagen zwischen +0,0 mm und +0,2 mm der Eintrittsdurchmesser um 20 µm ansteigt. Soll der Eintrittsdurchmesser auf 120 µm mit einer Gesamtschwankungsbreite von 5 %, also 120 ± 3 µm konstant gehalten werden, so muss die Fokuslage für die in Tabelle 3.2 gezeigten Parameter auf $0,15 \pm 0,03$ mm konstant gehalten werden.

Da bei der gegebenen Bauteilgeometrie hierfür am Markt kein System zur Verfügung stand, wurden verschiedene Sensoren getestet und auf ihren Anwendungsbereich untersucht. Für eine Gruppe von Bauteilen wurde eine automatische Abstandsregelung entwickelt. Diese Arbeiten zur Sicherstellung der Fokuslage werden in Abschnitt 4.2 detailliert beschrieben.

2.2.4.3 Wendeldurchmesser

Beim Wendelbohren wird durch den Wendeldurchmesser der Kreis beschrieben, den der Laserstrahl auf dem Werkstück beschreibt. Je nach Fokusgröße, Pulsenergie und Fokusslage können verschieden große Bohrungen erzeugt werden (s. Bild 2.9). Die Relativbewegung wird in der Regel durch bewegte optische Elemente wie z.B. einen Galvoscaner [32] oder eine Keilplattenoptik erreicht.

Nimmt man in erster Näherung an, dass der Durchmesser der Bohrung sich aus Fokusdurchmesser und Wendeldurchmesser zusammensetzt, so kann die benötigte Genauigkeit des Wendeldurchmessers abgeschätzt werden. Für die als Beispiel genannte Bohrung mit Durchmesser $120 \pm 3 \mu\text{m}$ muss der Wendeldurchmesser auf $\pm 3 \mu\text{m}$ konstant gehalten werden. Mit der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Optik und der Abhängigkeit des Wendeldurchmessers vom Verdrehwinkel (vgl. Gleichung 3.1, Bild 3.3) bedeutet dies eine Toleranz für den Verdrehwinkel der Keilplattenoptik von $\pm 2^\circ$.

Die in Bild 2.9 gezeigten Daten zeigen, dass sich der Bohrungsdurchmesser bei den hier verwendeten Prozessparametern ungefähr doppelt so stark ändert, wie mit der Näherung zu erwarten wäre, so dass auch die Toleranz für den Verdrehwinkel halbiert werden muss. Bei der genannten Keilplattenoptik ist der mechanische Aufbau ausreichend stabil. Durch Verstiften kann eine Abweichung des Verdrehwinkels vom Sollwert auf ca. $\pm 0,1^\circ$ verringert werden.

2.2.4.4 Nachbohrzeit

Wird nach dem vollständigen Durchbohren des Werkstücks der Laser nicht abgeschaltet, so spricht man von Nachbohren. Wie in [3] gezeigt, hängt die Lochform am Bohrgrund von der Wellenlänge des Lasers und der Pulsenergie ab. Mit einer Pulsenergie von ca. 2,5 mJ und einer Wellenlänge von 1064 nm ist die Bohrung größtenteils zylindrisch und bildet sich nur im untersten Bereich spitz aus (s. Bild 2.10). Ist der Durchbruch erreicht, so stellt sich bei geeigneter Wahl der Prozessparameter die gewünschte Lochform nach wenigen weiteren Pulsen ein.

Tritt darüber hinaus der Laserstrahl noch weiter in Wechselwirkung mit dem Werkstück, so ergibt sich eine Reihe von Nachteilen (siehe auch [3]):

- Durch weitere Einkopplung von Laserenergie in die Bohrungswand wird zusätzliches Material aufgeschmolzen. Hierdurch wird die Bohrung aufgeweitet und die Verrundung an Lasereintritt und Laseraustritt vergrößert.

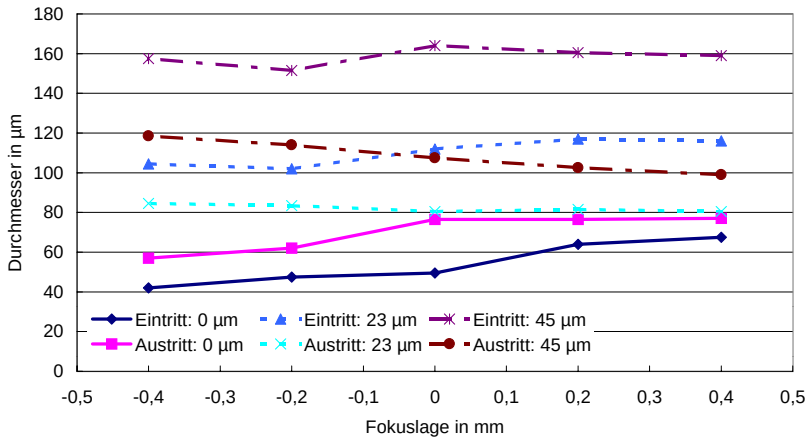


Bild 2.9: Bohrdurchmesser über der Fokusslage bei unterschiedlichen Wendeldurchmessern mit der Laserwellenlänge 1064 nm bei 10 µm Fokusradius, 23 µm Wendeldurchmesser in 1 mm Stahl (18CrNi8) aus [3].

- Durch den nun geöffneten Bohrlochgrund ergibt sich ein schwächeres Plasma, so dass das aufgeschmolzene Material nicht mehr effizient ausgetrieben wird. Es lagert sich zum Teil als wiedererstartete Schmelzschicht an der Wandung des Bohrlochs ab (s. Bild 2.10) [33].
- Abgetragenes Material kann nun durch das Bohrloch gelangen und sich dort am Bauteil niederschlagen. Bei Einspritzdüsen liegt hier beispielsweise die Dichtfläche der Ventilschlechte, deren Dichtfunktion durch Ablagerungen beeinträchtigt wird.
- Der Laserstrahl tritt hinter der Bohrung auf Innenflächen des Bauteils, die der Bohrung gegenüber liegen. An diesen kommt es zu unerwünschtem Materialabtrag.
- Wird zum Schutz des Rückraums der Bohrung ein anderes Material, genannt Backingmaterial, hinter der Bohrung platziert, so wird dieses durch den Laserstrahl bearbeitet und abgenutzt.

Um diese Qualitätseinbußen zu vermeiden ist es zwingend erforderlich, den Zeitpunkt des Durchbruchs zu bestimmen und den Laser danach, eventuell nach einer vordefinierten Verzögerung, abzuschalten. Auf Grund der fertigungsbedingten Schwankungen der Bauteildicke und der Leistungsschwankungen des Lasers ist dieser Zeitpunkt von Loch zu Loch verschieden. Verfahren für das Erkennen des Durchbruchs, wie sie vom Perkussionsbohren bekannt sind (s. Abschnitt 2.3), ließen sich nicht auf das Wendelbohren

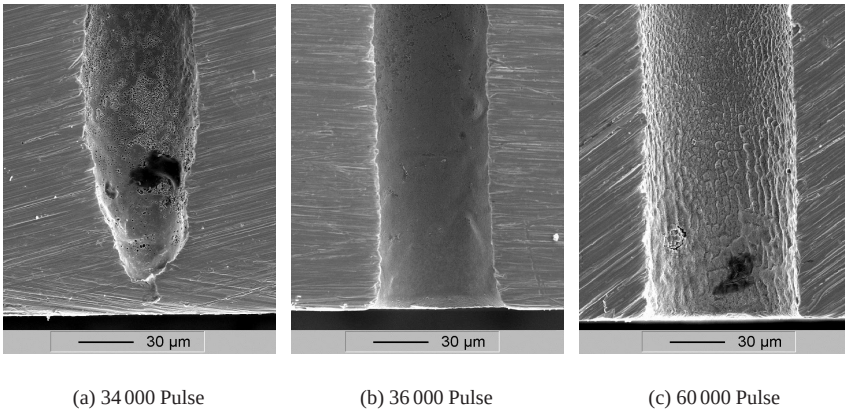


Bild 2.10: Der Bohrungsgrund wird nach dem Durchbruch durch weitere Energieeinbringung aufgeweitet und Schmelze lagert sich an der Wand ab. Dargestellt sind die REM-Aufnahmen von Bohrungen in 18CrNi8 nach einer unterschiedlichen Anzahl von Laserpulsen. Hiermit ist jeweils der Moment kurz vor (links) bzw. nach dem Durchbruch (Mitte) und nach längerem Nachbohren (rechts) erfasst (aus [33]).

übertragen, auch bedingt durch die Bauteilformen, bei denen das Werkstück nur von der Außenseite her zugänglich ist. Deshalb wurden Messverfahren entwickelt und in eine Prozesssteuerung integriert, um den Zeitpunkt des Durchbruchs zu bestimmen und damit die Nachbohrzeit regeln zu können (s. Abschnitt 4.3).

2.2.4.5 Polarisation

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Polarisation der Laserstrahlung. Diese wirkt sich besonders auf die Lochform am Laseraustritt aus. Bei linearer Polarisation wird der zur Bohrungswand parallele Anteil stärker absorbiert als der senkrechte Anteil [12]. Deshalb steht mit zunehmender Tiefe der Bohrung mehr und mehr die senkrechte Polarisation zum Materialabtrag zur Verfügung und der Bohrungsaustritt wird senkrecht zur Polarisationsrichtung oval ausgebildet. Dieser Effekt lässt sich zum Bohren ovaler und konischer Löcher einsetzen, indem die Polarisierung gezielt eingestellt und mit der Wendelbewegung nachgeführt wird [34]. In der verwendeten Materialbearbeitungsstation sollen kreisförmige Löcher hergestellt werden. Deshalb wird der Einfluss der Polarisation minimiert. Mit Hilfe eines $\lambda/4$ -Plättchens wird der hauptsächlich linear polarisierte Laserstrahl in überwiegend zirkular polarisiertes Licht umgewandelt. Die Polarisation des verwendeten Lasers ist auf Grund des Aufbaus des Oszillators vorgegeben. Somit ist

die Einstellung der zirkularen Polarisation bei geeignetem mechanischem Aufbau zeitlich konstant. Eine Änderung kann sich durch Schädigung des $\lambda/4$ -Plättchens oder der beschichteten, reflektierenden optischen Elemente ergeben, weshalb eine Überwachung der Polarisation in regelmäßigen Abständen ratsam ist.

2.2.4.6 Prozessgas

Das Prozessgas kann sich, wie im Fall des Sauerstoffs, auf die Energiebilanz beim Abtragsprozess auswirken, indem es mit dem auszutreibenden Material chemisch reagiert. Dies ist beim Bohren kleiner Durchmesser vornehmlich am Bohrungseintritt von Bedeutung, da das Prozessgas auf Grund des Gegendrucks des Metaldampfs nicht vollständig in die Bohrung eindringen kann [3].

Viel deutlicher ist jedoch die Wirkung auf das Plasma, welches als Bohrwerkzeug dient (s. Abschnitt 2.2.3). Je nach Molekulargewicht und Ionisationspotential unterscheiden sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Metaldampfwolke und die Elektronendichte im Metaldampf. Da das Plasma einerseits Laserenergie vom Bohrungsgrund abschirmt,

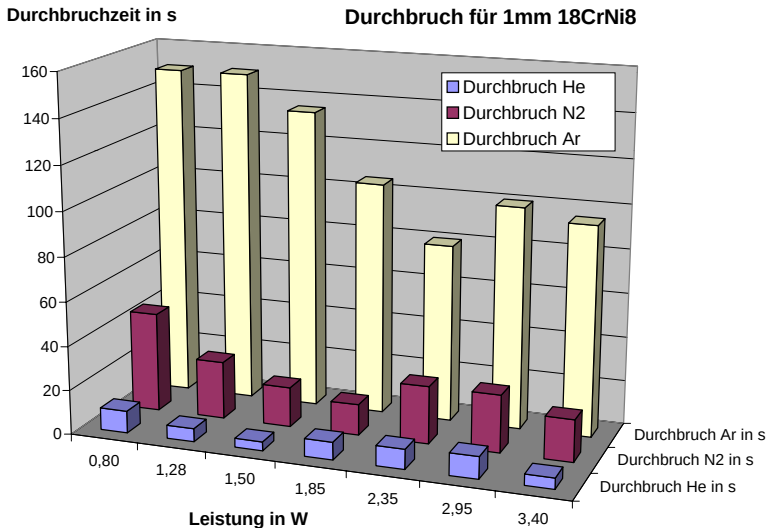


Bild 2.11: Durchbruchzeiten bei Verwendung unterschiedlicher Prozessgase bei verschiedenen Laserleistungen. Die Bohrungen wurden mit dem Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit einer Pulswiederholfrequenz von 2 kHz hergestellt (aus [3]).

andererseits aber auch die Bohrung aufweitet, erhält man je nach Gasart unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten und Bohrungsdurchmesser (s. Bild 2.11). Zur Wahl des am besten geeigneten Prozessgases wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt [35, 36]. Für die Präzisionsbohrungen mit nur einem Prozessgas hat sich Stickstoff als geeignetes Prozessgas herausgestellt. Einerseits wird hiermit die starke Oxidation am Locheintritt verhindert, die zu starken Unregelmäßigkeiten führt. Andererseits erhält man im Vergleich zu den Edelgasen Argon und Helium akzeptable Bohrgeschwindigkeiten und durch die Einwirkung des Plasmas auch dünne Schmelzschichten an der Bohrungswand.

Neben der Gasart ist auch die Reinheit des Gases sowie der Gasdruck für das Bohrergebnis wichtig (siehe auch [37]). Deshalb sollte bei der Beschaffung auf eine ausreichend gute Qualität des Gases, wie zum Beispiel Reinheit 4,5 oder 5,0, geachtet werden. Der Gasdruck muss einerseits bei der Einspeisung mittels Manometern überwacht werden, andererseits muss der Einfluss der Gasströmung konstant gehalten werden, indem die Geometrie der Gaszuführung und die Positionierung von Werkstück zu Gas führenden Elementen erhalten bleiben (vgl. [38] und Abschnitte 4.4.3, 4.4.4).

2.3 Prozessdiagnostik

Während zu anderen Laserverfahren, wie Laserschweißen [39, 40, 41, 42] und Laserschneiden [43, 41, 44], bereits fertigungstaugliche Prozesskontrollkonzepte existieren, ist für das Laserbohren bislang kaum eine Prozesskontrolle verfügbar. Für die bisher verwendeten Bohrverfahren werden im Folgenden einige Prozesssicherungsansätze vorgestellt.

2.3.1 Akustische Emissionen beim Laserbohren

In [45] wird eine Methode mit akustischer Überwachung des Bohrprozesses vorgestellt. Beim Bohren mit einem Nd:YAG-Laser wird der Schall mit einem Mikrofon erfasst. Das Maximum des Schallsignals, das während eines Laserpulses gemessen wird, dient als Maß für das abgetragene Volumen pro Puls. In den beschriebenen Untersuchungen wird festgestellt, dass der maximale Abtrag pro Puls erreicht wird, wenn der Fokus des Laserstrahls über dem Bauteil liegt. Weiterhin steigt die Schallamplitude mit dem Schmelzpunkt des ablatierten Materials.

Bei einer weiteren Untersuchung [44] werden die Schallemissionen beim Bohren mit einem CO₂-Laser mit Hilfe der Chaostheorie untersucht. Über eine fraktale Analyse wird hierbei für den Signalverlauf eine fraktale Dimension ermittelt. Diese Kennzahl steigt kurz vor dem Durchbruch durch das Material an. Nach dem Durchbruch bleibt die Dimension auf einem niedrigen Wert konstant. Beim Laserschneiden wird eine Abhängigkeit der fraktalen Dimension von der Abtragsgeschwindigkeit ermittelt. Die Standardabweichung der fraktalen Dimension erlaubt Rückschlüsse auf die Qualität des Schnittes.

2.3.2 Beobachten des Bohrprozesses mit optischen Sensoren

Für das Perkussionsbohren ist in [46, 47] ein aussagekräftiges Verfahren dargestellt. Während ein Nd:YAG-Laser eine Bohrung in eine Metall-Probe einbringt, wird die Probe mit einem Helium-Neon-Laser beleuchtet, wobei der Strahlfleck stets größer ist als die entstehende Bohrung. Das durch das Bohrloch tretende Licht des Helium-Neon-Lasers wird auf eine Photodiode abgebildet (s. Bild 2.12). Die Signalhöhe ist, zumindest nach Ende des Bohrprozesses, wenn keine Absorption im Plasma mehr stattfindet, ein Maß für die Querschnittsfläche der Bohrung. Darüber hinaus korreliert der Signalverlauf während des Bohrprozesses mit der Qualität der Bohrung hinsichtlich Rundheit und Zylindrizität.

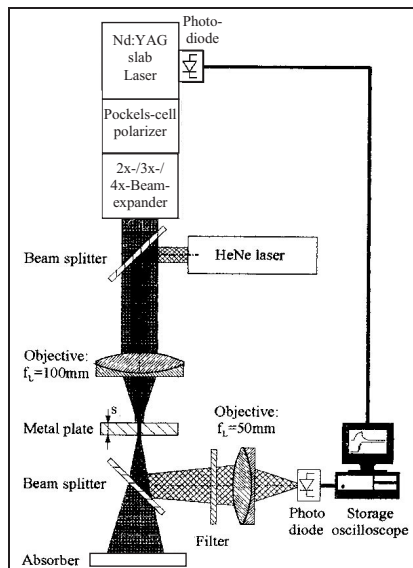


Bild 2.12: Experimenteller Aufbau zur in situ Beobachtung beim Einzelpulsbohren [46].

Der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn des Laserpulses und der Detektion des Lichts des Helium-Neon-Lasers ist die Durchbruchzeit. Diese liegt zum Teil, bei Materialstärken von 0,1 mm bis 0,7 mm, unter der Pulslänge von 0,1 ms bis 0,4 ms des eingesetzten Nd:YAG-Lasers, bei der Materialstärke 1 mm aber meistens darüber. Aus dem Signalverlauf folgt, dass der Durchmesser der Bohrung sich bei dieser Materialstärke erst nach Ende des Laserpulses einstellt. Hierbei haben Material- und Wärmetransport durch die Schmelze einen wesentlichen Einfluss. Die erkaltende Schmelze lagert sich hier auch an der Wand der Bohrung ab, so dass der am Ende erreichte Bohrungsdurchmesser kleiner ist als der Durchmesser, der während des Bohrvorgangs anhand des

Messsignals errechnet wurde.

Diese Art der Messung ist jedoch für viele Anwendungen nicht geeignet. Die Zugänglichkeit des Rückraums der Bohrung ist beispielsweise bei Einspritzkomponenten oder Turbinenschaufeln nicht gegeben. Für letztere zeigt Chen [48] eine weitere Möglichkeit auf. Hier wird mit einer Kamera der Moment erkannt, in dem die Tragfläche durchbohrt ist, um daraufhin den Bohrprozess zu stoppen. Chen bezieht sich hierbei auf Perkussionsbohren mit Laserpulsen mit einer Pulslänge von 100 ns und Pulsenergien von ca. 10 mJ. Die Kamera erfasst hierbei das am Bohrgrund reflektierte Licht. Bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Lochformen mit großem Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser wird jedoch das am Bohrloch reflektierte Licht teilweise in der Bohrungswand absorbiert und zusätzlich durch Laserlicht, das an der Bauteiloberfläche reflektiert wird, überlagert.

Somers [49] verwendet beim Perkussionsbohren von Turbinenschaufeln zwei Photodetektoren, um koaxial das vom Werkstück reflektierte Laserlicht und von einer seitlichen Position das Prozessleuchten zu erfassen. Das Prozessleuchten beinhaltet die Strahlung von heißen Metallpartikeln und auch an der Bauteiloberfläche reflektiertes Laserlicht. Dieses Signal dauert während des Bohrvorgangs wesentlich länger an als das Signal des reflektierten Laserlichts. Nach dem Durchbruch hingegen entfällt das Signal der heißen Metallpartikel, so dass beide Signale gleichzeitig abfallen. Der Vergleich der Signale wird verwendet, um den Durchbruch zu erkennen und den Bohrprozess zu beenden.

Bei Jones [50] wird ebenfalls mit einem koaxial angeordneten Photosensor gearbeitet. Beim Trepanieren von Löchern mit 1 mm Durchmesser wird das emittierte Licht erfasst, während der still stehende Laser das Startloch bohrt. Ein Abfall des Signals wird als Durchbohren des Werkstücks interpretiert und der Laserstrahl daraufhin relativ zum Werkstück bewegt, um die gewünschte Lochform auszuschneiden. Diese Methode funktioniert jedoch laut Duffin nur bei einlagigen Werkstücken, da bei komplizierteren Werkstücken, wie zum Beispiel Turbinenschaufeln, nach dem Durchbruch der Laserstrahl auf weitere Metallflächen trifft und dort wiederum ein Signal generiert wird [51]. Duffin verwendet statt dessen seitlich angeordnete Sensoren zum Erfassen des aus der Wechselwirkungszone emittierten Lichts. Hierbei addieren sich reflektierte Laserstrahlung und durch heiße Metallpartikel ausgestrahltes Licht. Hier wird festgestellt, dass beim Bohren mit gepulsten Lasern nicht die Signalthöhe des detektierten Lichts, sondern die Pulsform des Messsignals sich beim Durchbruch ändert. Die Abfallzeit am Ende der Pulse nimmt beim vollständigen Durchbohren oder Durchschneiden des Werkstücks deutlich ab. Mit den von Duffin spezifizierten Sensoren mit Anstiegszeiten von 0,4 ms und Lasern mit einer Pulslänge von einigen Millisekunden ist dieses Verfahren vorrangig für

das Schneidbohren relevant. Eine Übertragbarkeit auf Bohrverfahren mit kürzeren Pulsdauern ist fraglich, erfordert aber zumindest Sensoren mit wesentlich kürzeren Anstiegs- und Abfallzeiten.

Eine andere Möglichkeit wird von French et al. beschrieben. Hierbei wird das Perkussionsbohren mit einer Hochgeschwindigkeitskamera [52] koaxial zum Laserstrahl, bei einem anderen Aufbau von einer seitlichen Position der Bohrprozess beobachtet. Als Laser dient hierbei ein Nd:YAG-Laser mit Pulslängen von 0,3–1,0 ms und einer mittleren Leistung von 130–150 W. Die Hochgeschwindigkeitskamera, mit der bis zu 40 000 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden können, wird mit dem Laser synchronisiert. Zur Beleuchtung dient ein Argon-Ionen-Laser. Hiermit kann einerseits die Bildung des Plasmas beobachtet werden und mit der Beleuchtung durch den Argon-Ionen-Laser andererseits das Austreiben der Schmelze erfasst werden. Weiterhin kann anhand der Videobilder beurteilt werden, nach wie vielen Laserpulsen das Material vollständig durchbohrt ist.

In der genannten Arbeit wurde bemerkt, dass die Größe der Plasmawolke nicht genau bestimmt werden kann, da der Rand der Plasmawolke nicht erkannt wird. An anderer Stelle [30, 53] wird anstatt der Plasmawolke die Stoßwelle beobachtet, die sich durch das schlagartige Verdampfen des Metalls ausbildet. Je nach Wellenlänge des Lasers und umgebender Atmosphäre kann hierbei eine andere Form und Geschwindigkeit der Stoßwelle beobachtet werden. Hierbei beschränken sich die Untersuchungen jedoch auf Ablation an der Oberfläche.

Für die Prozessbeobachtung beim Präzisionsbohren ist die Übertragbarkeit dieser Methoden fraglich. Die Beobachtung durch die Bohrung mit einer Kamera wird durch die kleinen Durchmesser der Bohrungen erschwert, wodurch nur wenig Licht in die Bohrung gelangt. Denkbar wäre eine Beleuchtung von der Rückseite der Bohrung. Bei vielen Bauteilen, wie beispielsweise Einspritzkomponenten, sind hinter der Bohrung allerdings nur enge Strömungskanäle, in welchen nur schwer eine Lichtquelle positioniert werden kann. Weiterhin werden bei Präzisionsbohrungen Laserpulse mit deutlich kürzerer Pulsdauer verwendet, als dies bei den soeben beschriebenen Prozessen der Fall war.

2.3.3 Überwachung des Lasersystems

Das Werkzeug Laserstrahl wird in [5] überwacht. Wie auch bei dem in dieser Arbeit verwendeten System (s. Abschnitt 3.4) dient als Sensor eine CCD-Kamera. Bahnmlüller misst Strahlprofile einzelner Laserpulse für Pulsfolgefrequenzen bis zu 20 kHz. Hierzu wird der Laserstrahl so weit fokussiert, dass der Strahldurchmesser auf dem CCD-Chip

der Kamera nur einen Bruchteil der Chip-Abmessungen beträgt. Mit einem im Strahlengang eingebrachten Galvo-Scanner wird der Messstrahl mäanderförmig über den CCD-Chip bewegt. Bei geeigneter Geschwindigkeit des Scanners und Synchronisierung von Laser, Kamera und Scanner erscheinen die einzelnen Laserpulse nebeneinander in dem aufgenommenen Bild. Somit werden Puls-zu-Puls-Schwankungen der Pulsenergie und der Leistungsdichteverteilung erkannt. Das Messverfahren wird vor allem beim Einzelpulsbohren verwendet. Hierbei wird eine direkte Korrelation zwischen der Pulsenergie und dem abgetragenen Volumen festgestellt. Die bei Bahnmüller verwendeten Lasersysteme haben Beugungsmaßzahlen zwischen 11,1 und 32,2, Pulsdauern von 0,4–0,8 ms und Pulsenergien von 1,7–2,2 J. Die Erfassung der Puls-zu-Puls-Schwankungen der Laser- und Bohrungseigenschaften führt über das Erstellen eines Lastenheftes zur Entwicklung eines verbesserten Lasers für den Anwendungsbereich der Einzelpulsbohrungen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Präzisionsbohrungen mittels Wendelbohren hergestellt. Hierzu wird mit jedem Laserpuls nur ein kleines Volumen abgetragen. Puls-zu-Puls-Schwankungen fallen bei ca. $2 \cdot 10^5$ Laserpulsen pro Bohrung nicht ins Gewicht. Für die Qualität der Bohrungen, insbesondere die Schmelzfilmdicke und den Einzug der Bohrung ist jedoch die Strahlqualität, angegeben durch die Beugungsmaßzahl, wichtig. Die Maßnahmen zur Überwachung der Strahlqualität werden in Abschnitt 3.7 aufgeführt.

2.3.4 Ermittlung der Fokusposition über den Strahlengang

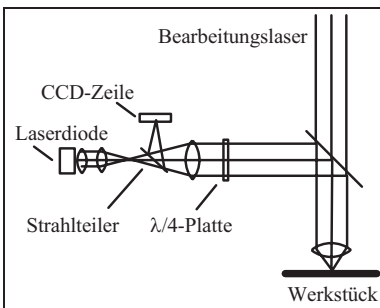


Bild 2.13: Prinzipskizze des Strahlengangs für einen Autofokus mit zusätzlicher Lichtquelle [54].

Zum Messen der Lage des Laserfokus wurden verschiedene Ansätze vorgestellt [55, 54, 56]. Hierbei wird eine zusätzliche Lichtquelle (kollimiertes Licht einer Laserdiode bzw. eines Helium-Neon-Lasers) mit derselben Fokussieroptik wie der Arbeitsstrahl auf das Werkstück abgebildet. Der reflektierte Teil des Lichts wird durch die gleiche Optik geführt und ausgekoppelt. Daraufhin passiert der Lichtstrahl eine Fokussierlinse, welche den Strahl auf einen Sensor fokussiert. Zum Teil [54, 56] wird zwischen Linse und Sensor zusätzlich eine Blende eingebracht.

Befindet sich das Werkstück nun im Fokus der Optik, so wird der Lichtstrahl nach der Reflexion am Werkstück durch die Bearbeitungsoptik wieder kollimiert. Ist das Werkstück nicht im Fokus platziert, so ist der Lichtstrahl nach Passieren der Bearbeitungsoptik divergent bzw. konvergent. Dieser Unterschied wird mit dem Sensor erfasst. Durch eine Korrektur der Lage des Werkstücks wird hier ein Autofokus realisiert.

Voraussetzung hierfür ist, dass die Werkstückoberfläche als Spiegel genutzt werden kann. Somit ergibt sich eine starke Abhängigkeit von der Rauigkeit und auch der Ausrichtung der Werkstückoberfläche, da sie senkrecht zum einfallenden Laserstrahl stehen muss.

Aus diesen Gründen ist dieses Verfahren nicht für das Bohren von stark gekrümmten Bauteilen geeignet oder wenn die Bohrung unter einem Winkel eingebracht werden soll.

3 Experimenteller Aufbau

3.1 Optischer Aufbau

Die Experimente wurden auf einer Versuchsanlage zum Präzisionsbohren durchgeführt. Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist in Bild 3.1 zu sehen. Der Strahlengang ist in [3] näher beschrieben.

Als Laser dient ein diodengepumpter Nd:YAG-Laser. Die Repetitionsfrequenz ist einstellbar zwischen 1 und 2 kHz. Die Pulslänge hängt von der Puls wiederholrate ab und beträgt 20 ns bei 2 kHz. Die mittlere Leistung liegt bei 6–8 W. Der Laserstrahl passiert zunächst ein Teleskop, mit dem Strahldurchmesser und -divergenz eingestellt werden können, und danach eine Wendelbohroptik. Mit mehreren Umlenkspiegeln wird er in einen Bearbeitungskopf eingekoppelt. Hierin wird er durch einen Spiegel umgelenkt,

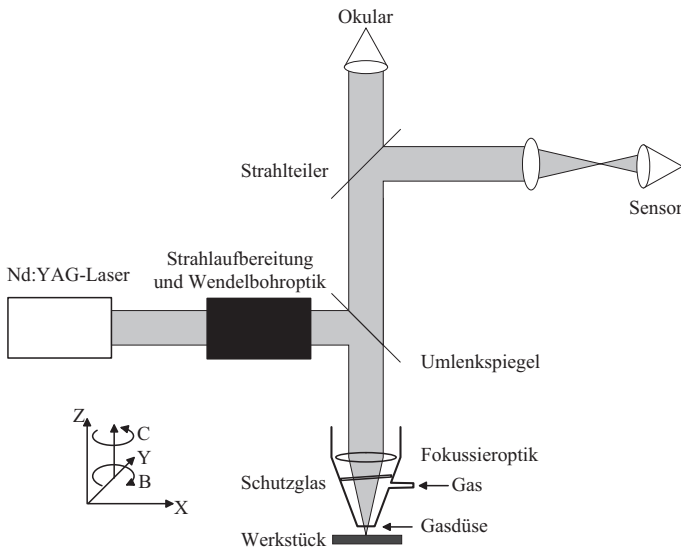


Bild 3.1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Strahlengangs (Erläuterungen siehe Text).

um anschließend mit einer höhenverstellbaren Linse der Brennweite $f = 100$ mm auf das Bauteil fokussiert zu werden. Die Spiegel sind für die Laserwellenlänge hochreflektierend beschichtet.

Die Wendelbohroptik besteht aus zwei Keilplatten, die sich mit einem vorgewählten Winkelversatz um die optische Achse drehen (s. Bild 3.2). Bei einem Versatz um 180° ergibt sich lediglich ein Parallelversatz des Laserstrahls. Die Abweichung des Winkelversatzes von 180° wird im Folgenden als Verdrehwinkel α_v bezeichnet. Bei $\alpha_v \neq 0^\circ$ weicht der Laserstrahl von der optischen Achse ab. In Abhängigkeit vom Abstand zur Fokussierlinse und der Brennweite der Fokussierlinse ergibt sich der Wendeldurchmesser als Abstand des Laserstrahls von der optischen Achse auf dem Werkstück. Erhält man bei $\alpha_v = 180^\circ$ einen maximalen Durchmesser von $d_{w,\max}$, so gilt nach [3]:

$$d_w = \left| d_{w,\max} \cdot \sin \frac{\alpha_v}{2} \right|. \quad (3.1)$$

Für die in den Versuchen verwendete Wendelbohroptik ist dieser Zusammenhang in Bild 3.3 dargestellt.

Bei Verwendung dieser Wendelbohroptik wird nur der Auftreffpunkt und -winkel des Laserstrahls auf dem Werkstück verändert. Die Orientierung der Leistungsverteilung, also auch die Polarisierung, bleibt unverändert. Wie in [3] beschrieben, wird durch den Einsatz eines $\lambda/4$ -Plättchens die Polarisierung weitgehend zirkular eingestellt (vgl. Tabelle 3.2). Hierdurch ist es nicht nötig den Laserstrahl um sich selbst zu drehen, um die polarisationsabhängige Einkopplung zu kompensieren (vgl. [32]).

Die Fokussierlinse wird durch ein Schutzglas vor Funken und Dämpfen geschützt. Unterhalb des Schutzglases kann Gas zugeführt werden, welches durch eine Gasdüse koaxial zum Laserstrahl auf das Werkstück strömt. Dieses Gas hat mehrere Funktionen:

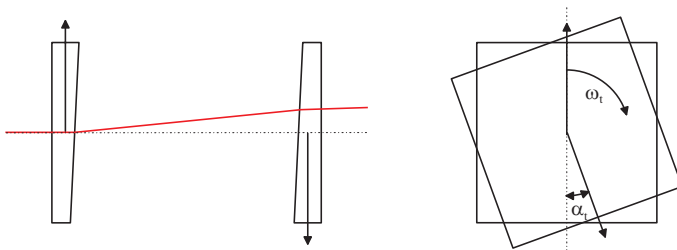


Bild 3.2: Schematischer Aufbau der Wendelbohroptik: Zwei Keilplatten sind um den Winkel $180^\circ - \alpha_v$ gegeneinander verdreht. Sie rotieren mit der Kreisfrequenz ω_t . Dies führt zu einem Parallelversatz und einer Auslenkung des Laserstrahls.

- Schutz der Optik bzw. des Schutzglases vor Staub und Metaldampf,
- Abtransport von Metaldampf und -tropfen aus der Wechselwirkungsregion,
- Beeinflussung des Abtragsprozesses durch Wechselwirkung mit dem Plasma (s. Abschnitt 2.2.3).

Dabei spielen besonders für die beiden letzten Punkte die Gasart, der Gasdruck und die Strömungsdynamik eine entscheidende Rolle [35, 36, 38].

Die für die Prozesskontrolle wichtigen Komponenten sind in der rechten Hälfte von Bild 3.1 dargestellt. Der Prozess kann durch ein Okular beobachtet werden, welches auf den Laserkopf aufgesetzt wird. Die Strahlung gelangt hierzu durch den Umlenkspiegel, der für Wellenlängen ungleich der Laserwellenlänge nur ca. 4% reflektiert. Es besteht die Möglichkeit, alternativ zur visuellen Beobachtung ein Umlenkprisma einzuschieben, mit dem die Strahlung über eine weitere Linse auf einen Sensor abgebildet wird. Mit geeigneten Strahlteilern können an dieser Stelle auch mehrere Sensoren angeordnet werden (vgl. S. 53, 82).

Das Bauteil ist auf einer 5-Achsanlage montiert. In X- und Y-Richtung wird ein Schlitten mit Linearmotoren bewegt, in Z-Richtung mit einem Spindelantrieb. Eine Drehachse (B) parallel zur Y-Achse sowie eine hierauf senkrecht stehende Achse (C), welche bei Nulllage der B-Achse parallel zur Z-Achse ausgerichtet ist, ermöglichen eine beliebige Positionierung des Bauteils bezüglich des Laserstrahls. Hervorzuheben ist die hohe Genauigkeit der Linearachsen: Sie erreichen eine Wiederholgenauigkeit von 1 μm und bieten somit die Voraussetzung für eine extrem genaue Platzierung der Bohrlöcher. Um

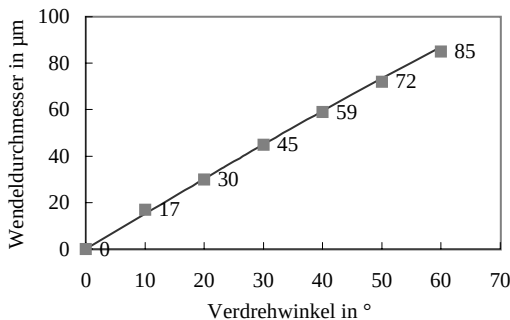


Bild 3.3: Wendeldurchmesser d_w in Abhängigkeit vom Verdrehwinkel α_v nach [3]. Eingezeichnet sind die einzelnen Messwerte, sowie eine Kurve nach Gleichung 3.1 mit $d_{w,\max} = 87 \mu\text{m}$.

den Einfluss von Temperaturschwankungen auf den Laser und das Positioniersystem zu minimieren, befindet sich die Anlage in einem klimatisierten Raum.

3.2 Sensoren

Prozessemissionen werden mit einem Sensor (s. Bild 3.1) erfasst. Dieser besteht aus einer Photodiode, die mit Linse vorjustiert geliefert wird. Das Signal wird verstärkt und in die Datenauswertung übertragen. Optional kann über einen zusätzlichen, dem Sensor vorgeschalteten Strahlteiler ein weiterer Sensor angekoppelt werden.

Der Überwachungsbereich beträgt ca. $6 \times 6 \text{ mm}^2$. Vorversuche haben gezeigt, dass das Prozessleuchten im Bereich von $\lambda < 1000 \text{ nm}$ sich am besten für die Durchbrucherkennung eignet. Deshalb wird zur Detektion der Prozessemissionen dem Sensor ein optischer Filter vorgesetzt, welcher Strahlung mit Wellenlängen von $\lambda > 1000 \text{ nm}$ abblockt. Um die Rückreflexe des Laserstrahls effizient zu eliminieren, ist zusätzlich ein für $\lambda = 1064 \text{ nm}$ hochreflektierend beschichteter Spiegel vor dem Sensor montiert.

3.3 Kamera

Zur Abstandsmessung wird eine intelligente Kamera eingesetzt (s. Bild 3.4). Diese ist neben dem Werkstück angebracht und senkrecht zum Bearbeitungsstrahl in Y-Richtung ausgerichtet. In ihrem Blickfeld liegt der untere Bereich der Gasdüse sowie der obere Bereich des Werkstücks. Das Werkstück sollte hierbei unter der Gasdüse eine Kante aufweisen, so dass in der Beobachtungsebene der Kamera eine scharfe Kontur zu erkennen ist. Gegenüber der Kamera ist ein Leuchtdiodenfeld angebracht, so dass die Kamera die Objekte im kontrastreichen Gegenlicht sieht. Um die Kamera vor Beschädigung durch gestreute Laserstrahlung und Prozessleuchten zu schützen, ist vor dem Objektiv ein Bandfilter angebracht, welcher im Bereich der Wellenlänge der Leuchtdioden (640 nm) durchlässig ist. Die Anpassung des Helligkeitskontrastes erfolgt über die Einstellung der Helligkeit des Leuchtdiodenarrays sowie die Blende des Kameraobjektivs. Für eine gute Tiefenschärfe wird die Blende möglichst klein gewählt. Die Helligkeitswerte werden durch die Kamera mit einer Auflösung von 8 Bit digitalisiert, das Sichtfeld der Kamera beträgt ca. $5 \times 7 \text{ mm}$. Neben dem CCD-Chip zur Bilderfassung befindet sich in der Kamera auch ein Rechenchip, auf dem das Bild verarbeitet wird. Hiermit können über Helligkeitsunterschiede im eingespeisten Bild die Kanten der beobachteten

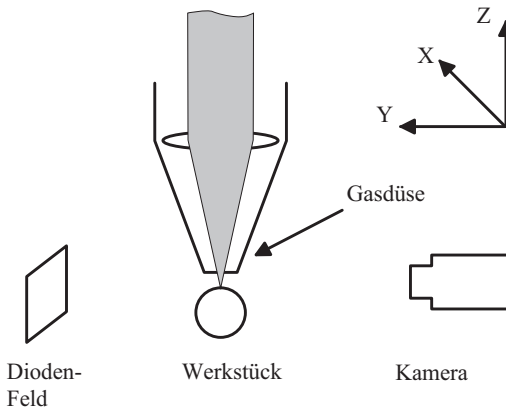


Bild 3.4: Anordnung der intelligenten Kamera: Die Blickrichtung der Kamera liegt senkrecht zum Laserstrahl. Das Drehteil ist mittig zur Gasdüse ausgerichtet, so dass die Kante des Bauteils und die Gasdüse in der Bildebene der Kamera liegen.

Elemente erkannt werden. Durch Grauererkennung und Subpixelnäherung wird die räumliche Auflösung auf etwa ein Zehntel der Pixelgröße verbessert.

Über vier digitale Ein- und Ausgänge vermag die intelligente Kamera mit der Maschinensteuerung zu kommunizieren. Weiterhin ist sie über eine serielle Schnittstelle mit der Maschinensteuerung verbunden, um Messwerte zu übermitteln. Das aufgabenangepasste Bildverarbeitungsprogramm wird in einer Programmierungsumgebung auf einem PC erstellt und über die serielle Schnittstelle in die Kamera übertragen.

3.4 Strahlanalyse-System

Zum Vermessen des Strahlparameterprodukts dient ein Strahlanalysesystem, welches am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart aufgebaut wurde. In dieses wird der Laserstrahl entweder direkt nach dem Laser oder in der Bearbeitungsstation hinter der Fokussieroptik eingekoppelt. Somit kann einerseits die Strahlquelle und andererseits das Strahlführungssystem beurteilt werden.

Der Aufbau des Systems ist in Bild 3.5 dargestellt [57]. Auf einer Schiene (1) befinden sich ein Umlenker (3) und ein Prisma zum Abschwächen der Intensität (5). Beim Vermessen eines fokussierten Strahls wird zusätzlich eine Kollimationslinse (4) eingesetzt. Der Umlenker (3) und das Abschwächprisma (5) bilden eine 4-Achsen-Justierung, so

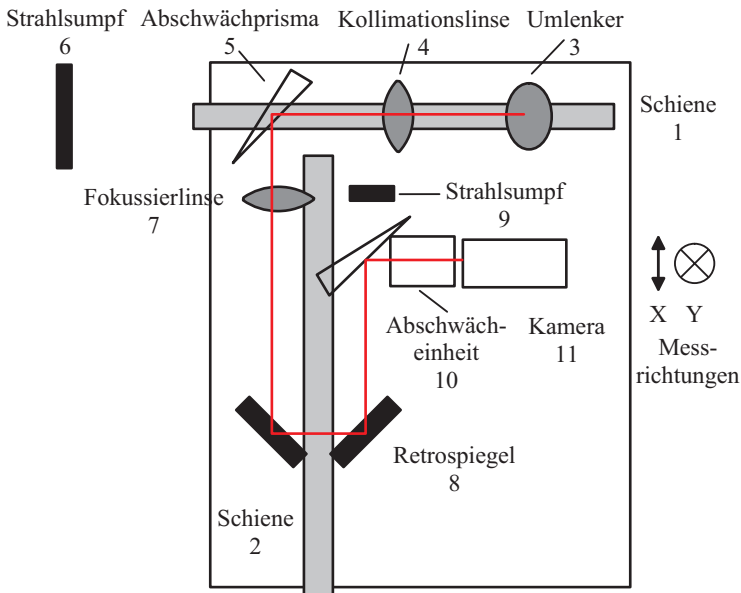


Bild 3.5: Schematische Darstellung des optischen Aufbaus des verwendeten Strahlanalyse-Systems (Erläuterungen siehe Text).

dass der Laserstrahl senkrecht und mittig auf die Fokussierlinse (7) eingestellt werden kann. Der Strahlsumpf (6) dient der Absorption des durch das Abschwächprisma (5) transmittierten Strahls (ca. 92 % der gesamten Laserleistung). Ein weiteres Prisma ist in der Abschwächereinheit (10) vor der Kamera angebracht. Die hierdurch transmittierte Strahlung wird ebenfalls durch einen Strahlsumpf (9) absorbiert.

Mit der Fokussierlinse (7) wird eine Strahlkaustik erzeugt. Durch die Verschiebung der Retrospiegel (8) auf der Schiene (2) kann die Länge des optischen Weges zwischen der Fokussierlinse (7) und der Kamera (11) verändert werden. Dabei kann der ganze Bereich vom Nahfeld bis zum Fernfeld durchfahren werden. Zum Ablesen der Position der Retrospiegel ist an der Schiene ein Maßstab angebracht. Mittels der Abschwächereinheit (10) wird dabei die maximal auftretende Leistungsdichte auf den Arbeitsbereich der Kamera angepasst.

Das von der Kamera erfasste Bild des Strahlquerschnitts wird mit einer speziellen Software ausgewertet. Bei ausgeschaltetem Laser wird zunächst ein Referenzbild aufgenommen um das Hintergrundsignal, welches bedingt ist durch Umgebungslicht und Rau-

schen (vgl. [5]), zu erfassen. Dieses wird bei der Berechnung des Strahlquerschnitts berücksichtigt. Zur Berechnung des Strahlquerschnitts kann ein 86%-Querschnitt oder das Verfahren der bewegten Messerschneide (knife-edge-Methode) gewählt werden (vgl. [11]). Die Strahlqualität kann in zwei zueinander senkrechten Ebenen gemessen werden: Die X-Z-Ebene beinhaltet die optische Achse des Laserstrahls und ist parallel zu der Arbeitsplatte, die Y-Z-Ebene beinhaltet ebenso die optische Achse und ist senkrecht zur X-Z-Ebene.

Nachdem die Strahlqualität einmal ermittelt wurde, kann sie aber auch mit einfacheren Mitteln überwacht werden. Durch Einsatz eines teildurchlässigen Spiegels in dem Bearbeitungskopf kann mit einer Messung am ausgekoppelten Strahl mit einer CCD-Kamera die Intensitätsverteilung in einer Schnittebene des Laserstrahls ermittelt werden. Hierdurch lassen sich bereits Veränderungen in den davor liegenden optischen Elementen erkennen.

3.5 Messtechnik und Datenauswertung

Der Datenfluss der Versuchsanlage ist in Bild 3.6 schematisch dargestellt. Das Signal der Sensoren wird zunächst durch den mitgelieferten Verstärker geleitet. Da zwischen der Repetitionsrate der Laserpulse und der Abtastrate der Steuerungssoftware mehrere Größenordnungen liegen, wird das Sensorsignal danach durch ein elektronisches Verzögerungsglied (Anstiegszeit = 1 μ s, Abfallzeit = 10 ms) geleitet. Das so aufbereitete

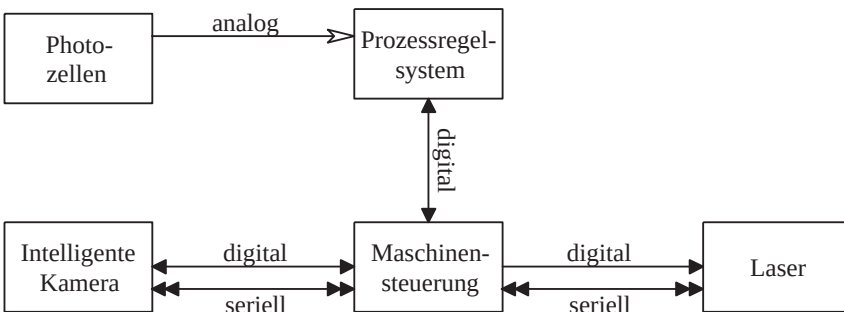


Bild 3.6: Schematische Darstellung des Datenflusses in der Versuchsanlage. Sensoren (Photozellen und intelligente Kamera), Messrechner und Maschinensteuerung sowie der Laser sind miteinander vernetzt. Die Art der Verbindung ist dem Diagramm zu entnehmen.

Messsignal wird von einem A/D-Wandler in einem handelsüblichen Industrie-PC ausgelesen.

Zur Verarbeitung der Messdaten dient ein Prozessregelsystem. Auf Hardwareseite verfügt es über digitale und analoge Ein- und Ausgänge. Softwareseitig kann ein Prozess mit graphischer Programmierung dargestellt werden. Die Eingangssignale können gefiltert und mathematisch verarbeitet werden. Mit einer graphischen Bedienoberfläche werden die Daten angezeigt und Interaktionen des Benutzers erfasst. Das System erlaubt Regelprozesse mit bis zu einem Kilohertz und Datenaufzeichnung mit bis zu 300 kHz. Da die Laserfrequenz im Bereich 1–2 kHz liegt, wird in der Regel mit der Abtastrate von 1 kHz gearbeitet und geregelt.

3.6 Maschinensteuerung

Das 5-Achsen-System wird von einer Steuerung auf einem Industrie-PC gesteuert. Hierin werden die Ablaufprogramme mit einer NC-Sprache programmiert. Die Anzeige kann zum Teil an die Anforderungen der Bearbeitungsmaschine angepasst werden, um mit numerischer Eingabe oder Funktionstasten den Programmablauf zu beeinflussen. Die Steuerung ist mit digitalen Ein- und Ausgängen versehen, um mit der Peripherie zu kommunizieren. Zusätzlich können die seriellen Schnittstellen des PC angesprochen werden.

Die Achsensteuerung wird als zentrale Steuereinheit eingesetzt. So kann mit den Bearbeitungsprogrammen nicht nur das Werkstück positioniert werden, sondern es werden auch Laser und Prozessgas geschaltet, Signale mit dem Prozessregelsystem ausgetauscht und die intelligente Kamera ausgelesen. Die Kommunikation mit der Kamera wird in Abschnitt 4.2.4.2 näher beschrieben.

3.7 Charakterisierung der verwendeten Strahlquelle

3.7.1 Laserleistung

Die Leistung des verwendeten diodengepumpten Nd:YAG-Lasers wird als Prozentsatz der Maximalleistung eingestellt. Die nicht benötigte Leistung wird im Lasersystem auf einen Strahlsumpf abgelenkt [58]. Mit einem Leistungsmesskopf direkt hinter der Strahlquelle wird eine kontinuierliche Messung der Laserleistung durchgeführt, um die

Genauigkeit der Leistungsabgabe zu ermitteln. Dabei nimmt nach dem Einschalten des Versorgungsgeräts des Lasers, das heißt, das Lasersystem ist auf Raumtemperatur, die Laserleistung um ca. 3 % innerhalb der ersten 30 Minuten ab (s. Bild 3.7). Auch nach dem Warmlaufen treten noch Kurzzeitschwankungen von ca. 1 % auf.

Zur Erfassung der Leistungsabnahme durch Alterung der Pumpdioden und des Laserkristalls sollten in regelmäßigen Abständen Leistungsmessungen durchgeführt werden. Möglich ist auch eine interne Leistungsmessung des Lasers an einem ausgekoppelten Teilstrahl, so dass die Leistung geregelt werden kann. Dieses wird in anderen Lasersystemen sowie in Nachfolgemodellen des verwendeten Lasersystems bereits berücksichtigt.

Weiterhin kann durch eine interne Leistungsregelung die Gefahr der Fehlbedienung bei der Leistungswahl verringert werden. Der geregelte Versorgungsstrom der Pumpdioden führt je nach Alter und Ausrichtung der Pumpdioden sowie Justage und Temperatur des Oszillators zu einer anderen tatsächlich emittierten Leistung, wobei die Leistung nicht ganz linear mit der Eingabe des Bedieners skaliert. Durch eine interne Leistungsmessung kann die Leistungswahl in Watt erfolgen, so dass durch den internen Regelkreis der Diodenstrom oder der auf den Strahlsumpf abgelenkete Teil der Strahlung so lange angepasst wird, bis die gewünschte Ausgangsleistung erreicht ist. Gerade für den Einsatz der Strahlquelle in der Fertigung ist eine einfache Leistungseinstellung von Vorteil.

Zusätzlich muss allerdings die Laserleistung an der Position des Werkstücks ermittelt

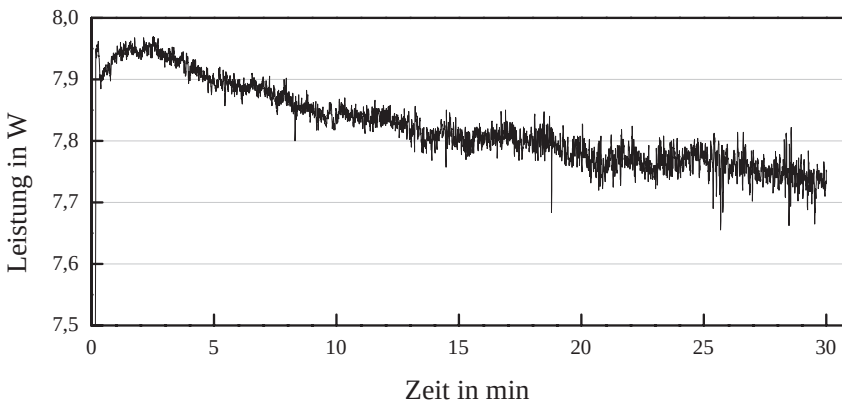


Bild 3.7: Nach Einschalten des Lasers bei kaltem Oszillator nimmt die Laserleistung in einem Zeitraum von 30 Minuten um ca. 3 % ab.

werden. Durch die optischen Komponenten wie Wendelbohroptik, Spiegel, Aufweiter und Linsen kommt es zu Verlusten. An unbeschichteten Grenzflächen zwischen Glas und Luft werden ca. 4 % der Laserleistung reflektiert. Durch beschichtete Oberflächen lassen sich diese Verluste auf weniger als 0,1 % je Oberfläche reduzieren. Um den Einfluss der optischen Komponenten zu erfassen, wird deshalb in der Regel neben der Ausgangsleistung des Lasers auch die Leistung am Werkstück angegeben.

3.7.2 Pulsdauer

Die Pulsdauer der Laserpulse wirkt sich einerseits auf die Schmelzfilmdicke aus (vgl. Gleichung 2.36), andererseits über die Leistungsdichte (s. Gl. 2.37) auch auf die Absorption der Laserenergie im Metaldampfplasma (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Mit Hilfe einer schnellen Photodiode (Anstiegszeit 500 ps) kann am abgeschwächten Strahl die Pulsdauer gemessen werden. Hierbei wurde bei einer Pulswiederholrate von 2 kHz eine Pulsdauer von 17 ns ermittelt unabhängig von der gewählten Leistung (s. Bild 3.8). Die Pulsdauer des betrachteten Lasers hängt hierbei von der Repetitionsrate ab. Bei einem Modell, dessen Pulswiederholrate zwischen 2 kHz und 3 kHz gewählt werden konnte, stieg die Pulsdauer von 17 ns bei 2 kHz auf 30 ns bei 3 kHz an [3].

3.7.3 Messen der Strahlqualität

Zur Bestimmung der Beugungsmaßzahl des verwendeten Lasersystems wurde der in Abschnitt 3.4 beschriebene Aufbau mit einer Fokussierlinse mit $f = 500$ mm verwendet.

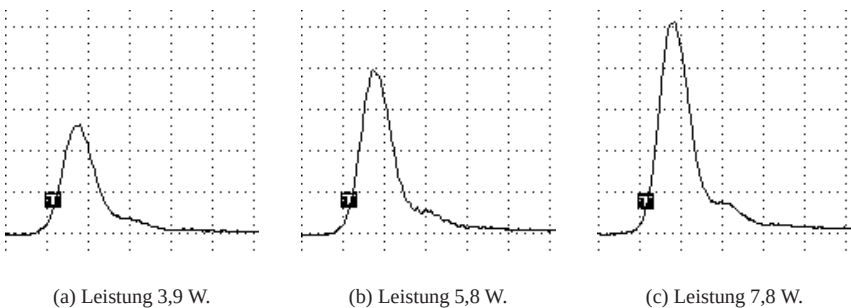


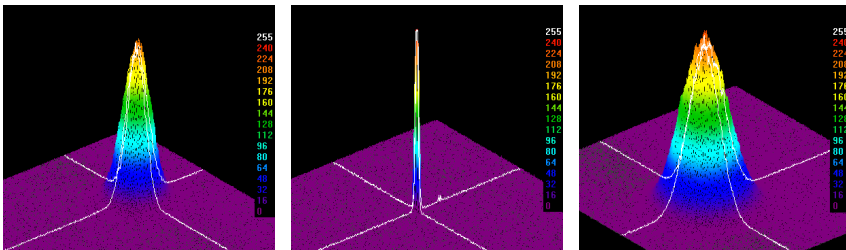
Bild 3.8: Die Mittlere Pulsdauer des Lasers bei einer Repetitionsrate von 2 kHz beträgt über einen weiten Einstellbereich der Laserleistung stets 17 ns.

	Horizontal (X)	Vertikal (Y)
Taillenlage [mm]	514	517
Tailendurchmesser [μm]	185	180
Divergenz [mrad]	7,97	8,23
Rayleighlänge [mm]	23,2	21,9
K-Zahl	0,920	0,916
M^2	1,1	1,1

Tabelle 3.1: Strahlparameter bei 100 % Leistung und 2 kHz Pulswiederholrate, aufgenommen mit einer Messlinse mit $f=500$ mm in zwei zueinander senkrechten Ebenen.

Die Messung der Strahlqualität kann an verschiedenen Stellen erfolgen. Wird der Laserstrahl direkt hinter der Strahlquelle analysiert, so kann der Zustand der Strahlquelle erfasst werden und eine Aussage über die kleinstmögliche Beugungsmaßzahl der Laserbearbeitungsmaschine gemacht werden. Erfasst die Messung den Laserstrahl hingegen in der Bearbeitungsmaschine an der Stelle des Werkstücks, so ergibt sich die für das Bohren tatsächlich verfügbare Strahlqualität, die durch die verschiedenen optischen Elemente beeinflusst werden kann [5].

Das Lasersystem wurde am Freistrahldirekt hinter dem Laser mit einer Leistung von



(a) Position: -155 mm

(b) +5 mm

(c) +245 mm

Bild 3.9: Das Strahlprofil des eingesetzten Lasers, dargestellt an drei verschiedenen Positionen im Fernfeld vor dem Fokus, sehr nah am Fokus sowie im Fernfeld hinter dem Fokus, ist annähernd ein Gauß-Profil.

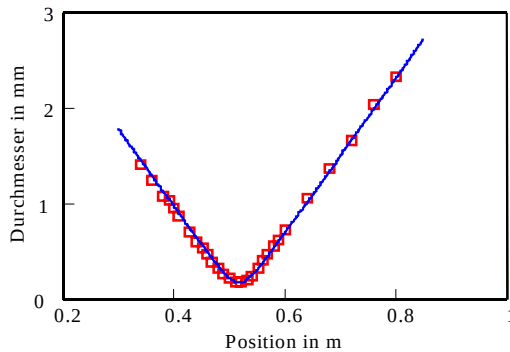


Bild 3.10: Die Strahlkaustik zeigt für den Laserstrahl des eingesetzten Lasers mit $M^2 = 1,1$ eine ausgezeichnete Fokussierbarkeit. Aufgetragen sind die Messwerte für den Strahldurchmesser über dem Abstand der Kamera zur Fokussierlinse sowie die an die Messwerte angepasste berechnete Hyperbel.

100 % vermessen. Hieraus ergaben sich die in Tabelle 3.1 dargestellten Daten. Die Beugungsmaßzahl von $M^2 = 1,1$ belegt die sehr gute Strahlqualität mit einem Profil, das annähernd gaußförmig ist (s. Bild 3.9). Die Kaustik des Laserstrahls zeigt Bild 3.10.

Die Wichtigkeit der Strahlanalyse hinsichtlich Fehleranalyse und Qualitätssicherung wird durch Messungen an verschiedenen Lasersystemen in Abschnitt 4.1 aufgezeigt.

3.8 Prozessparameter

Die Prozessparameter, mit denen in den Versuchen gearbeitet wurde, sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Mit diesen Parametern wurden in metallischen Werkstücken mit 1 mm Wandstärke zylindrische Bohrungen mit einem Durchmesser von ca. 100 μm erzeugt.

Lasertyp: diodengepumpter Nd:YAG	
Wellenlänge λ :	1064 nm
Beugungsmaßzahl M^2 :	1,2
Polarisation p :	Zirkular 80 %
Brennweite der Fokussierlinse f :	100 mm
F-Zahl:	20
Fokuslage z_f :	+0,15 mm
Fokusedurchmesser d_f :	ca. 40 μm
Wendeldurchmesser d_w :	38 μm
Verdrehwinkel α_v :	25 °
Leistung P_{av} :	5,9 W
Leistungsvorwahl:	100 %
Pulsdauer τ_H :	20 ns
Pulsfolgefrequenz f_P :	1800 Hz
Prozessgas:	Stickstoff
Gasdruck p_g :	6 bar

Tabelle 3.2: In der Regel wurde mit den aufgelisteten Prozessparametern gearbeitet, mit denen zylindrische Bohrungen hergestellt wurden.

4 Lösungsansätze und experimentelle Umsetzung

Wie in Kapitel 2 gezeigt, hängt die erzielte Lochgeometrie und -qualität von vielen Parametern ab. Nur ein Teil dieser Parameter ist mit der herkömmlichen Messtechnik gut zu überwachen.

Konkreter Handlungsbedarf ergab sich für folgende Parameter:

- Die Fokussierbarkeit des Laserstrahls hängt von dessen Strahlparameterprodukt ab. Ein Verfahren zur Charakterisierung des Laserstrahls war bereitzustellen.
- Durch äußere Einflüsse wie Wandstärkeltoleranzen oder die Werkstückaufnahme (s. Abschnitt 4.2) wird die Position des Laserfokus zum Bauteil verändert. Deshalb wurden Methoden erarbeitet, um die Position des Bauteils automatisch zu korrigieren.
- Auf Grund von Wandstärkeltoleranzen des Bauteils, Leistungsschwankungen des Lasers oder Schwankungen beim Prozessgas variiert die Zeit bis zum Durchbohren des Bauteils. Dies machte ein Verfahren zur Durchbrucherkennung erforderlich.

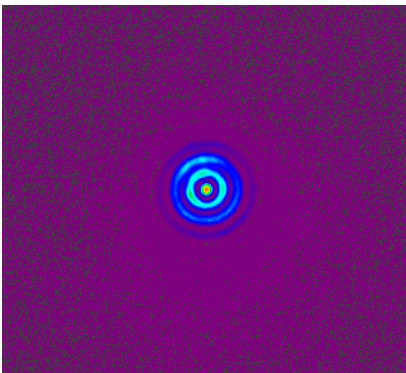
Hiermit sollen in der Mengenfertigung die Schwankungen der Kenngrößen Lochdurchmesser, Konizität und Durchfluss die geforderten Toleranzen einhalten, so dass das Wendelbohren in die Fertigung eingeführt werden kann.

4.1 Strahlvermessung zur Qualitätssicherung

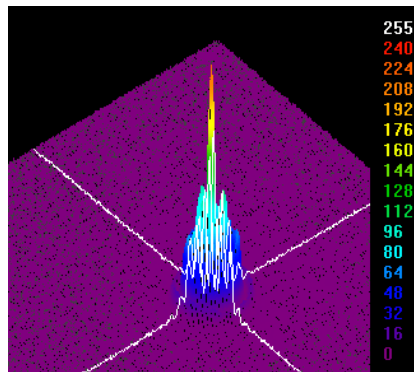
Im Rahmen der mit Wawra [3] durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Lasersysteme analysiert, die beim Präzisionsbohren Verwendung fanden. Hierbei konnte mit Messungen direkt hinter der Strahlquelle oder in einer Bearbeitungsstation nach der Fokussieroptik die Beugungsmaßzahl des Lasers und der Bearbeitungsstation bestimmt werden, um die experimentellen Ergebnisse zu vergleichen und in einigen Fällen Fehler im Lasersystem aufzuzeigen.

In einem optischen Aufbau wurde zusätzlich zu den in Bild 3.1 dargestellten Komponenten vor dem letzten Spiegel ein Teleskop installiert, um den Durchmesser des Laserstrahls auf der Fokussierlinse, und damit auch den Durchmesser der Strahltaille am Werkstück einstellen zu können (vgl. Gleichung 2.19). Bei einer 2-fachen Aufweitung des Laserstrahls mit diesem Teleskop blieb die Strahlqualität mit einer Beugungsmaßzahl von 1,2 noch weitgehend erhalten. Wurde mit dem Teleskop der Laserstrahl auf den 4-fachen Durchmesser erhöht, so verschlechterte sich die Beugungsmaßzahl in zwei zueinander senkrechten Messebenen auf 1,4 bzw. 1,8. Durch die starke Aufweitung wurde hier der Strahl so groß, dass er durch die Aperturen der nachfolgenden optischen Elemente beschnitten wurde. Die Verschlechterung des Strahlprofils ist auch an der Intensitätsverteilung in Bild 4.1 zu erkennen. Hier diente die Strahlanalyse dem Erkennen von Fehlern in dem optischen Aufbau der Laserbearbeitungsmaschine. Hierdurch würde nicht nur die Bohrungsgeometrie verschlechtert werden. Durch die auf die Aperturen treffende Laserstrahlung könnten diese aufgewärmt werden, was bis zur Zerstörung der Bearbeitungsoptik führen kann.

Während sich solche Fehler im optischen Aufbau auch mit einer Leistungsmessung detektieren lassen, wird die Zuordnung des Leistungsverlusts zu einer bestimmten Ursache durch die Messung der Leistungsdichteverteilung erleichtert. Darüber hinaus gibt es Effekte, die ausschließlich mittels Strahlanalyse festgestellt werden können.



(a) 2-D-Intensitätsprofil.



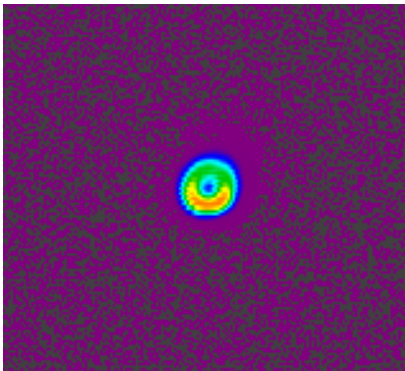
(b) 3-D-Intensitätsprofil.

Bild 4.1: Durch zu starke Aufweitung des Laserstrahls wurde dieser an Aperturen in der Bearbeitungsoptik gebeugt. Hierdurch wird die Strahlqualität verschlechtert und der Fokus vergrößert.

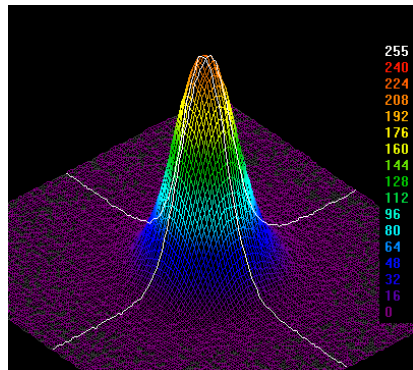
Beim Einsatz eines frequenzverdoppelten diodengepumpten Nd:YAG-Lasers kam es zum Anschwingen einer höheren Mode und damit zu einem Ringprofil (s. Bild 4.2(a)). Daraufhin musste der Laser vom Hersteller überarbeitet werden. Durch bessere Justage des Oszillators und des Frequenzverdopplers konnte die Grundmode auch bei höherer Leistung stabil gehalten werden (s. Bild 4.2(b)).

Bei einem Laser mit der fundamentalen Wellenlänge von 1064 nm kam es ebenfalls zu einer Störung des Strahlprofils. Hierbei lag aber eine Intensitätsverteilung mit zwei annähernd gleich hohen Intensitätsspitzen vor (s. Bild 4.3).

Hervorzuheben ist, dass diese ungewünschten Strahlprofile nicht nur im laufenden Betrieb entstanden, sondern überwiegend nach Auslieferung des Lasers an den Kunden oder nach dem Umrüsten auf die Emissionswellenlänge 532 nm beobachtet wurden. Somit wurden die Laser entweder bei der Justage im Werk nur auf Leistung optimiert, oder beim Transport leicht dejustiert. In jedem Fall empfiehlt es sich dringend, die Strahlqualität vor und nach dem Einbau in eine Bearbeitungsmaschine zu überprüfen.



(a) Intensitätsverteilung der Ringmode



(b) Gauß-Profil im Fernfeld

Bild 4.2: Bei einem frequenzverdoppelten diodengepumpten Nd:YAG-Laser kam es zum Anschwingen einer Ringmode, sobald die Leistung auf mehr als 60 % eingestellt wurde (links). Nach korrekter Justage wurde auch bei dieser Wellenlänge ein Gauß-Profil erreicht (rechts). Beide Aufnahmen erfolgten mit 80 % Leistung.

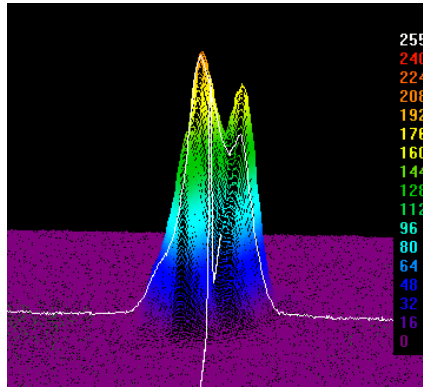


Bild 4.3: Bei diesem Laser wurde bei 1064 nm eine Intensitätsverteilung mit zwei annähernd gleich hohen Spitzen gemessen (Repetitionsrate 1,5 kHz, 30 % Leistung).

4.2 Sicherstellen der Fokusslage

Wie in Abschnitt 2.2.4.2 ausgeführt wurde, hängt die Lochgeometrie insbesondere von der Fokusslage ab. Die Fokusslage z_f bezeichnet den Abstand der Laserstrahltaile von der Werkstückoberfläche. Die Fokusslage lässt sich mit den etablierten Messmethoden in einer Produktionsanlage nicht überwachen. Im Folgenden werden die Ursachen für Fokusslagenänderungen sowie die erarbeiteten Lösungswege aufgezeigt.

4.2.1 Ursachen für Änderungen der Fokusslage

Da die Fokusslage den Abstand zwischen Strahltaile und Werkstückoberfläche bezeichnet, kann sie durch Lageänderung jeder dieser Teile beeinflusst werden. Die Position des Laserfokus hat sich allerdings in den bisherigen Untersuchungen als sehr stabil erwiesen. Darum werden zunächst die Ursachen, die zur Lageänderung eines Bauteils führen können, erläutert.

4.2.1.1 Teiletoleranzen

Mikrolöcher in dem Größenbereich, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, werden auch für Einspritzkomponenten benötigt. Da für das Strömungsbild die Position

des Loches bezüglich der kraftstoffgefüllten Innenform der Einspritzkomponente wichtig ist, wird hier die Position relativ zu einer inneren Kontur bemaßt. Darum wird das Bauteil auch an der inneren Kontur aufgenommen und relativ zum Laser positioniert.

Da der Laserstrahl nur bis zu der dem Laser zugewandten Werkstückoberfläche ungehindert propagieren kann, ist die Lage der Strahltaile zu dieser Oberfläche besonders wichtig. Sind nun die Maße des Werkstücks fertigungsbedingt mit Toleranzen versehen, so ergibt eine Änderung der Werkstückdicke automatisch eine Fokuslagenänderung (s. Bild 4.4).

4.2.1.2 Werkstückaufnahme

Zu den Bauteiltoleranzen kommt eine weitere Abweichung hinzu. Werden mehrere Löcher auf dem Umfang einer Einspritzkomponente eingebracht, so wird das Bauteil zweckmäßigerweise auf einer Drehachse gehalten. Wie oben erwähnt, muss das Bauteil über seine Innenkontur gehalten werden. Hierzu bietet sich ein Dorn an, auf den das Bauteil aufgesetzt wird. Kommt es nun beim Härten des Dorns zu einem Verzug oder wird der Dorn durch mechanische Einflüsse leicht verbogen, so weicht er von der Drehachse der Maschine ab (s. Bild 4.5). Bei einer Abweichung von 1° und einem Abstand

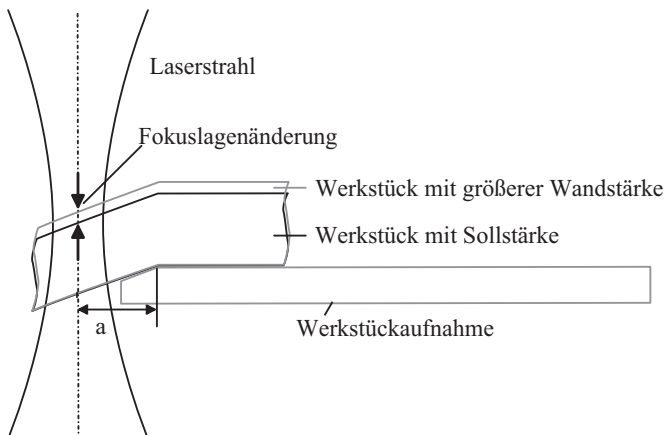


Bild 4.4: Auswirkung der Bauteil-Toleranzen auf die Fokuslage. Bei Bemaßung der Lochposition zu einer Innenkontur, wie im Beispiel der Abstand a zur Kante in der Bauteilwand, ist es zweckmäßig, das Bauteil an der Innenseite aufzunehmen. Bei verschiedenen Wandstärken der Bauteile ergibt sich eine bauteilabhängige Fokuslage.

l vom Drehpunkt von beispielsweise 43 mm ergibt sich für die Fokuslage bereits eine Abweichung von

$$\Delta z_f = 43 \text{ mm} \cdot \tan 1^\circ = 0,75 \text{ mm.} \quad (4.1)$$

Hierdurch würde die Form der Bohrung bereits deutlich verändert werden.

4.2.2 Sicherstellen der Fokuslage durch externe Sensoren

In Abschnitt 2.3.4 wurde ein Verfahren beschrieben, mit dem der Fokus des Bearbeitungslasers mit einer Hilfslichtquelle zum Bauteil positioniert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde darüber hinaus ein Verfahren benötigt, mit dem auch an stark gekrümmten Werkstücken die Lage der Strahltaile zum Werkstück sicher gestellt wird. Die Abweichung von der gewünschten Fokuslage soll im Allgemeinen klein gegenüber der Rayleighlänge z_R sein. Diese beträgt für den in Tabelle 3.1 beschriebenen Laser mit einer Bearbeitungsoptik mit einer Brennweite von $f = 150 \text{ mm}$ ca. $z_R \approx 2 \text{ mm}$. Wie in Abschnitt 2.2.4.2 ausgeführt wurde, soll für die hier behandelten Präzisionsbohrungen die Abweichung auf kleiner $30 \mu\text{m}$ beschränkt werden.

Da die stärksten Störungen sich auf die Lage des Bauteils auswirken, reicht es aus, des-

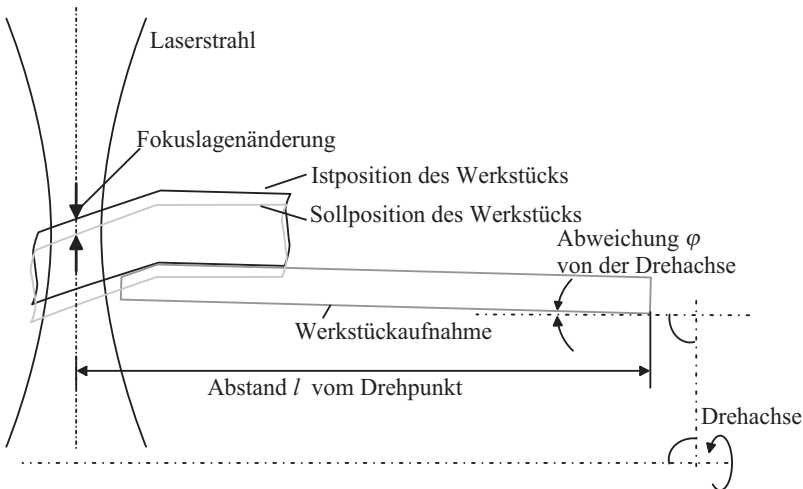


Bild 4.5: Auswirkung der Werkstückaufnahme auf die Fokuslage: Eine Fehlorientierung des Dorns zur Werkstückpositionierung bezüglich der Drehachse führt zu einer Taumelbewegung und somit zu einer Fokuslagenänderung.

sen Lage zu erfassen und zu korrigieren. Die Erfahrungen an der Versuchsanlage zeigten, dass die Position des Laserfokus bezüglich des Bearbeitungskopfs konstant bleibt.

4.2.3 Bauteile mit ebener Oberfläche

Bei Bauteilen mit ebener Oberfläche wurden zwei Möglichkeiten untersucht:

- Mit einem Triangulationssensor wird die Lage des Bauteils erfasst. Mit einem vorher bestimmten Offset des Sensors zum Laserkopf wird dann das Bauteil positioniert.
- Mit einem kapazitiven Sensor wird der Abstand des Bauteils vom Laserkopf gemessen.

Die Möglichkeiten und Grenzen dieser Verfahren werden im Folgenden aufgezeigt.

4.2.3.1 Lasertriangulation an einfachen Bauteilen

Zum berührungslosen Messen der Werkstückposition kann ein Triangulationssensor verwendet werden (s. Bild 4.6). Hierbei fällt ein Laserstrahl auf das Messobjekt. Das diffus reflektierte Licht wird durch eine Linse auf einen positionssensitiven Sensor abgebildet. Der Abstand zum Messobjekt wird hiermit in eine bestimmte Position auf dem Sensor umgesetzt und an einer Auswerteeinheit angezeigt. Die Triangulationssensoren unterscheiden sich hauptsächlich im Messbereich und Arbeitsabstand.

Für die Positionierung des Sensors gibt es zwei Möglichkeiten:

- Wird der Sensor neben dem Laserkopf angeordnet, so wird das Bauteil vor dem Bohren unter den Triangulator gebracht. Der Messstrahl wird parallel zur Z-Achse ausgerichtet. In dieser Konstellation wird die Lage des Werkstücks mit einer Sollposition verglichen und die Abweichung bei der Positionierung unter dem Laserkopf berücksichtigt.
- Um zusätzliche Positioniervorgänge zu vermeiden, kann der Sensor auch so angebracht werden, dass er unterhalb des Laserkopfes misst. Der Winkel zwischen der Messrichtung und dem Bearbeitungsstrahl muss bei der Auswertung des gemessenen Abstands berücksichtigt werden.

Untersuchungen wurden mit einem Triangulationssensor mit einem Messbereich von 20 mm bei einem Arbeitsabstand von 50 mm durchgeführt, der neben dem Laserkopf

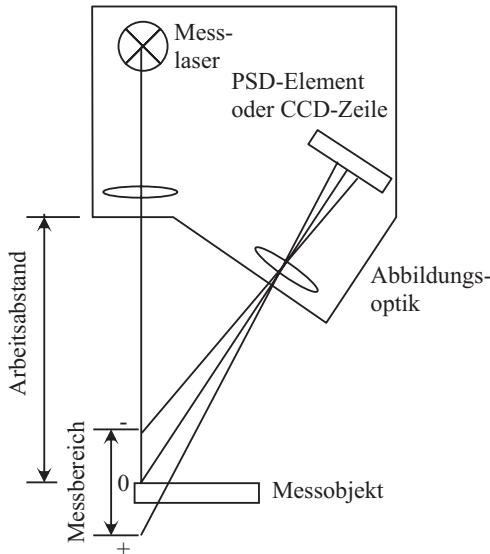


Bild 4.6: Prinzip eines Lasertriangulations-Sensors. Der Laserstrahl wird vom Messobjekt in Abhängigkeit vom Abstand des Messobjekts zum Triangulator an unterschiedliche Stellen eines positionsempfindlichen Sensors reflektiert (aus [59]).

montiert war. Bei einem Messobjekt aus Stahl mit einer polierten Oberfläche konnte bei senkrechtem Einfall des Messstrahls problemlos gemessen werden. Sollen jedoch Bohrlöcher unter einem Einfallswinkel α_e ungleich Null eingebracht werden, so trifft das Licht des Triangulationssensors unter demselben Winkel auf das Werkstück. Bei einer polierten Stahloberfläche führt dies bereits unter einem Einfallswinkel von $\alpha_e = 15^\circ$ zu Schwierigkeiten (s. Bild 4.7): Die Anzeige schwankt um $\pm 15 \mu\text{m}$ und ist somit maschinell nur schwer verwertbar. Durch eine Mittelung über mehrere Messungen kann der Einfluss der Schwankungen minimiert werden, so dass eine gute Positionierung möglich ist. Auf einer matten Oberfläche ist hingegen auch unter $\alpha_e = 40^\circ$ noch eine Messung möglich (s. Bild 4.8). Die Ursache hierfür liegt darin, dass nur das diffus reflektierte Licht zur Messung verwendet wird. Bei der polierten Oberfläche überwiegt jedoch die gerichtete Reflexion, so dass die Intensität des diffus gerichteten Lichtes nicht mehr für eine verlässliche Auswertung reicht.

Wie bereits angesprochen, kann prinzipiell der Triangulationssensor auch so angebracht werden, dass er direkt unter dem Bearbeitungskopf misst. Hierbei wird in der Sollposition des Werkstücks der Messwert $a_{t,\text{sol}}$ ermittelt. Wird dann bei einem anderen Bauteil

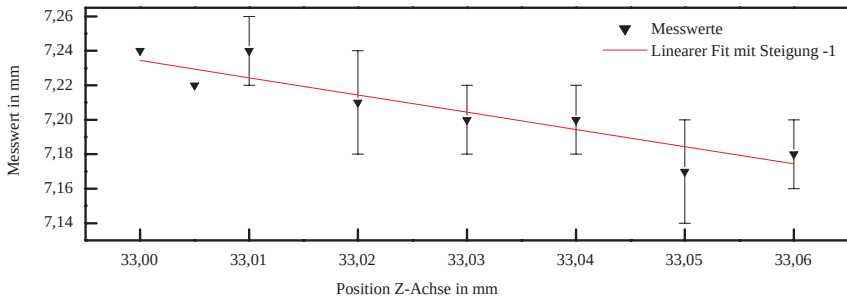


Bild 4.7: Lasertriangulation an polierter Metalloberfläche: Die Messung erfolgt unter einem Winkel von $\alpha_e = 15^\circ$ zur Flächennormalen. Die Fehlerbalken geben wieder, in welchem Bereich die Anzeige schwankt.

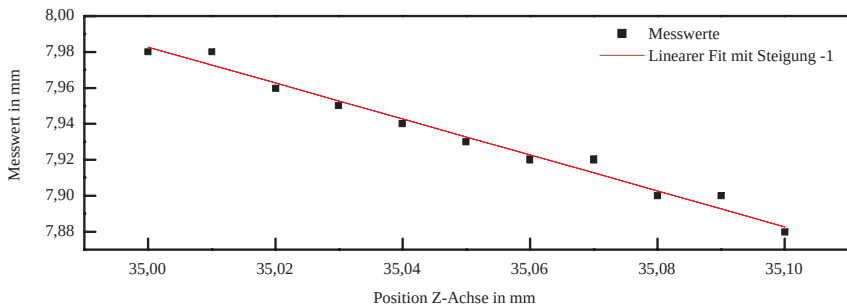


Bild 4.8: Lasertriangulation an mattierter Metalloberfläche: Selbst unter einem Winkel von $\alpha_e = 40^\circ$ zur Flächennormalen ist eine Messung mit konstanter Anzeige möglich.

der Abstand $a_{t,ist}$ gemessen, so muss eine Höhenkorrektur um $\Delta Z = \frac{a_{t,soll} - a_{t,ist}}{\cos \psi}$ erfolgen (s. Bild 4.9).

Hiermit kann für ebene Bauteile ein Lasertriangulator verwendet werden, um die Werkstückposition zu ermitteln und zu korrigieren. Die Messgenauigkeit liegt im Bereich von 10–20 μm und ist damit auch für Präzisionsbohren mit dem Wendelbohren geeignet. Dieses Verfahren stößt jedoch an Grenzen, wenn der Messstrahl nicht mehr gleichmäßig diffus gestreut wird. So ergibt sich bei gedrehten Teilen, wie in Bild 4.10 zu sehen ist, eine nicht realistische Messkurve: Vermutlich durch Riefen auf der Oberfläche wird die diffuse Streuung durch gerichtete Reflexion überlagert und der Sensor ermittelt einen falschen Messwert. Dem Messwert ist nicht mehr eindeutig ein bestimmter Abstand zuzuordnen. Somit ergibt sich eine Ungenauigkeit für die Positionsbestimmung von einigen 100 μm .

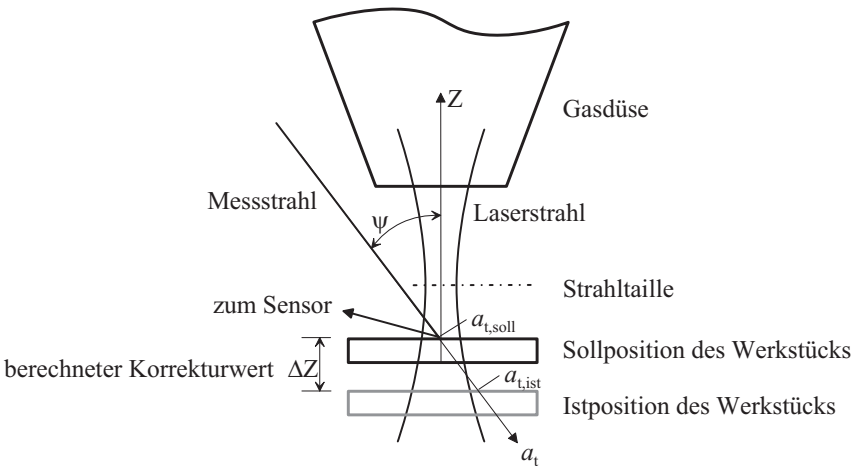


Bild 4.9: Bei der Abstandsmessung unter dem Laserkopf strahlt der Messstrahl unter einem Winkel ψ zum Bearbeitungsstrahl ein. Aus dem Sollwert $a_{t,soll}$ und dem aktuellen Messwert $a_{t,ist}$ ergibt sich die Höhenkorrektur $\Delta Z = \frac{a_{t,soll} - a_{t,ist}}{\cos \psi}$.

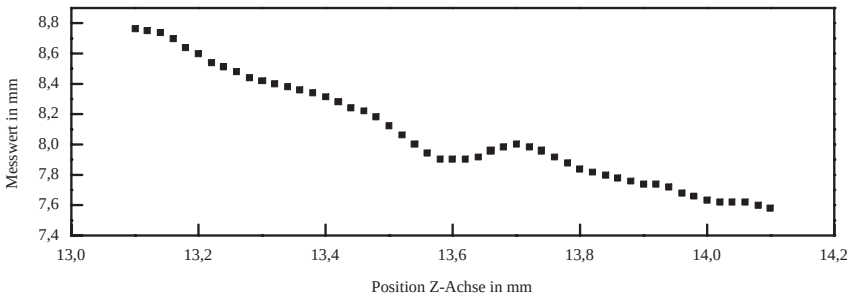


Bild 4.10: Bei der Lasertriangulation an einem gedrehten Bauteil kann der Sensor einen falschen Messwert anzeigen. An verschiedenen Positionen (z. B. $Z = 13,54$ und $Z = 13,7$) wird der gleiche Messwert angezeigt, was zu einer Fehlpositionierung des Bauteils führen kann.

4.2.3.2 Abstandsmessung mit kapazitivem Sensor

Beim Laserschneiden metallischer Bauteile wird ein kapazitiver Sensor eingesetzt. Hierbei wird die normale Gasdüse des Bearbeitungskopfes durch eine entsprechend geformte Elektrode ersetzt (s. Bild 4.11). Gegenüber dem geerdeten Bauteil wird die Kapazität gemessen und in einem Auswertegerät in einen Wert für den Abstand umgewandelt.

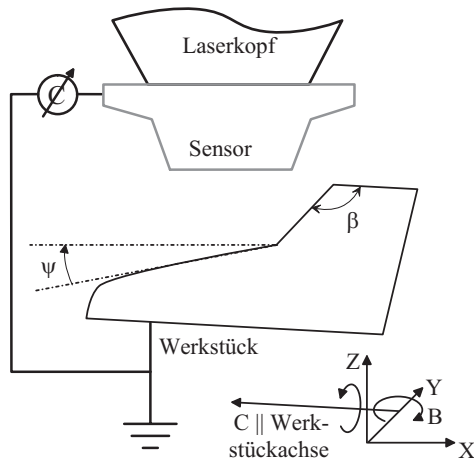


Bild 4.11: Die Skizze zeigt das Prinzip der kapazitiven Abstandsmessung. Zwischen der Elektrode, die am Laserkopf befestigt wird, und dem Werkstück wird die Kapazität gemessen. Diese dient als Maß für den Abstand dieser Elemente. Hat das Bauteil in der Nähe der Elektrode eine Kante, so hat diese einen starken Einfluss auf die Kapazität.

Für diese Umwandlung werden zunächst in einem Einlernprozess die Messwerte an frei wählbaren Stützstellen ermittelt. Diese werden so bestimmt, dass sie um die Sollposition herum möglichst dicht liegen.

Für das Bohren wurde dieser Sensor an einem Drehteil mit einer Kante getestet (s. Bild 4.11). Auf einem kleinen Durchmesser des Bauteils soll die Bohrung eingebracht werden. Nur wenige Millimeter daneben nimmt der Durchmesser zu, um in eine zylindrische Form überzuführen. Hierdurch gibt es eine Kante, die einen besonders großen Einfluss auf die Kapazität hat: Die Ladungsdichte und das elektrische Feld können in einer 2-dimensionalen Näherung abgeschätzt werden [28]. Bei einem Abstand ρ von der Kante und einem Winkel β an der Kante verhält sich die Ladungsdichte an der Oberfläche gemäß

$$\sigma_e \propto \rho^{\frac{\pi}{2\pi-\beta}-1}, \quad \text{mit } \beta = 120^\circ \quad \text{ergibt sich}$$

$$\sigma_e \propto \rho^{-\frac{1}{4}}.$$

Die Ladungsdichte an der Kante hat also einen größeren Einfluss auf die Kapazität, je näher sie an die andere Elektrode heranreicht.

Sollen in diesem Bauteil mehrere Löcher auf einem Kreisumfang gebohrt werden, so verändern sich Abstand und Kapazität nicht. Bei einem Sollabstand von 3 mm wurden

beim Einlernprozess die Stützstellen bei sehr kleinen Abständen (Kollisionsgefahr) und beim Sollabstand im Abstand von 0,1 mm gewählt, im übrigen Bereich bis 4 mm im Abstand von 0,2 mm. Im Rest des Messbereichs wurde ein größerer Abstand zugelassen, da auf größere Entfernung auch der Einfluss der Bauteilform nachlässt. Hiermit wurde eine Genauigkeit von bis zu 20 μm erreicht (s. Bild 4.12).

Schwieriger stellt sich die Situation dar, wenn an unterschiedlichen axialen Positionen und unter verschiedenen Einfallswinkeln ψ Löcher gebohrt werden sollen. Hierdurch ändert sich der Abstand der Bauteilkante zu der Elektrode bzw. der Winkel zwischen der Elektrodenunterseite und der Bauteiloberfläche (identisch mit ψ). Da hiermit die Kapazität von Bauteil und Elektrode verändert wird, stimmt die zuvor in der Auswerteeinheit hinterlegte Zuordnung von Kapazität zu Abstand nicht mehr. Wie Bild 4.13 zeigt, gibt es bereits bei einer kleinen lateralen Lageänderung (Bewegung in X-Richtung) Messfehler von 50 μm , bei Kippen des Bauteils (Drehen um die B-Achse) sogar mehrere 100 μm .

Um diese Messfehler zu vermeiden, müsste für jede Lochposition der Einlernprozess wiederholt werden. Die damit ermittelten Kennlinien müssten im Auswertegerät hinterlegt und für die Lochpositionen abgerufen werden. Alternativ kann der Messfehler für jede Lochposition ermittelt und in einer Korrekturabelle abgelegt werden. Die NC-Steuerung würde dann den Abstand des Bauteils zur Gasdüse so einstellen, dass der um den Messfehler korrigierte Sollabstand erreicht wird.

Dadurch ist der Einsatz eines solchen kapazitiven Sensors auf Anwendungen beschränkt, bei denen entweder flache Bauteile durchbohrt werden sollen oder aber komplexere Bau-

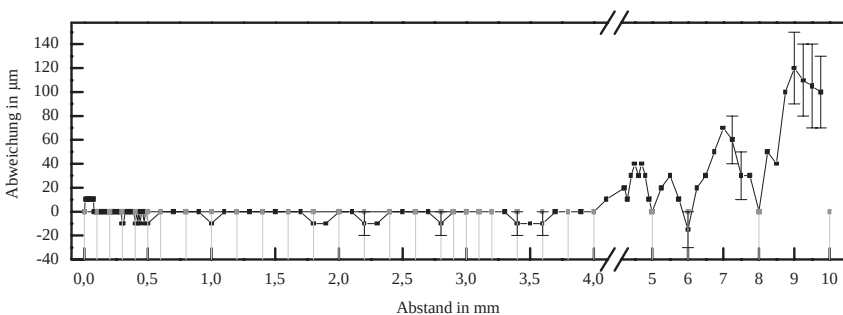


Bild 4.12: Mit dem kapazitiven Sensor wird bei einem Abstand der Stützstellen von 100 μm bei einem Drehteil eine Messgenauigkeit von 20 μm erreicht. Dargestellt ist die Abweichung des angezeigten Abstandes vom tatsächlichen Abstand. Die Fehlerbalken zeigen an, wie weit die Anzeige in der letzten Ziffer schwankt. Die Stützstellen sind mit grauen Linien markiert.

teile in hoher Stückzahl mit den gleichen Lochpositionen gefertigt werden, so dass der Einrichtaufwand gerechtfertigt ist.

4.2.4 Abstandsregelung an Bauteilen mit gekrümmter Oberfläche mit intelligenter Kamera

Ein Beispiel für Drehteile, die für Präzisionsbohrungen in Betracht kommen, sind Einspritzdüsen. In diese sollen die Löcher unter verschiedenen Winkeln und an verschiedenen axialen Positionen eingebracht werden, um das Sprühbild dem Zylinderinnenraum anpassen zu können. Auf Grund der Oberflächenkrümmung und -rauigkeit kann ihre Lage zum Bearbeitungskopf nicht mit den zuvor genannten Methoden ermittelt werden. Deshalb wurde speziell für solche Drehteile eine neue Methode zur Abstandsmessung entwickelt.

Kernkomponente dieses Verfahrens ist eine intelligente Kamera (s. Abschnitt 3.3). Intelligente Kameras wurden bisher verwendet, um die Ausrichtung von Teilen sowie die Geometrie von Werkstücken zu überprüfen. Bei der Abstandsmessung hingegen werden die Kanten zweier verschiedener Bauteile erfasst [60].

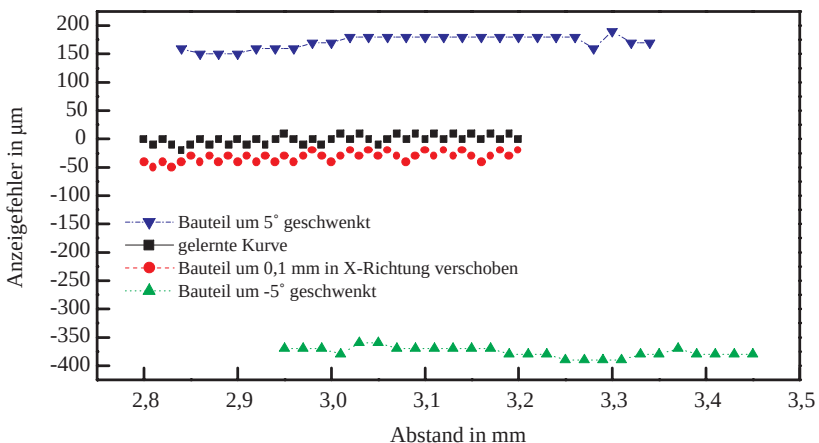


Bild 4.13: Wird die Lage des Bauteils durch Verschieben in X-Richtung oder Drehen um die B-Achse verändert, so ergeben sich große Messfehler des kapazitiven Abstandssensors. Deshalb wäre bei jeder Änderung der axialen Lochposition oder des Einfalls winkels ein erneutes Einlernen des Sensors nötig.

4.2.4.1 Bildauswertung

In dem von der Kamera erfassten Bild (s. Bild 4.14(a)) sind sowohl das Werkstück als auch die Gasdüse zu erkennen. Durch die in der Kamera ablaufende Bildverarbeitung werden folgende Merkmale ermittelt:

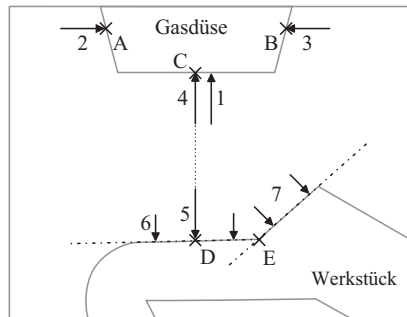
1. untere Kante der Gasdüse: In der Bildmitte wird von unten nach oben ein starker Helligkeitskontrast gesucht und als Position der Kante ermittelt,
2. Punkt A: linke Kante der Gasdüse, angetastet von links, in einer vorgegebenen Höhe bzgl. der unteren Kante,
3. Punkt B: rechte Kante der Gasdüse, Suchrichtung von rechts, analog zu 2,
4. Punkt C: Kante der Gasdüse, Suchrichtung von unten, mittig zu A und B,
5. Punkt D: Kante des Werkstücks, Suchrichtung von oben, mittig zu A und B,
6. Kante des Werkstücks als Ausgleichsgerade mehrerer Punkte, die um den Punkt D herum ermittelt werden,
7. Kante des Werkstücks nach dem Knick,
8. Punkt E: Schnittpunkt der unter 6. und 7. erkannten Kanten.

Mit diesen Merkmalen lassen sich drei geometrische Kenngrößen für den Prozess bzw. das Bohrloch bestimmen:

1. Abstand des Werkstücks von der Gasdüse,



(a) Im Blickfeld der Kamera liegen die Gasdüse (oben) sowie das Werkstück.



(b) Durch das Erfassen von Kanten mittels Grauwertgradienten wird der Abstand bestimmt.

Bild 4.14: Abstandsmessung mit der intelligenten Kamera. Dargestellt ist das Bild, welches von der Kamera ausgewertet wird und die Konturen, die hiermit ermittelt werden (Erläuterungen siehe Text).

2. Neigungswinkel des Bauteils und
3. Abstand der Punkte D und E.

Während der Neigungswinkel den Einfallswinkel des Laserstrahls wiedergibt, ist der Abstand der Punkte D und E ein Maß für die axiale Position des Bohrlochs.

Der Bildausschnitt ist so gewählt, dass bis zu Bearbeitungsabständen von 4 mm das Erkennen der Kanten funktioniert. Durch die Bildauswertung in Subpixeltechnik entspricht ein Abstand von 1 mm einem Messwert von ca. 1000. Diese Skalierung wird bei Inbetriebnahme der Kamera ermittelt und der Skalierungsfaktor in der Maschinensteuerung hinterlegt.

4.2.4.2 Konzept zur schnellen und robusten Abstandsregelung

Zur Einstellung des Abstands wurde ein schnelles und robustes Regelkonzept entwickelt. Wie in Bild 3.6 gezeigt, sind intelligente Kamera und Messrechner über mehrere digitale und eine serielle Datenleitung miteinander verbunden.

Nachdem das Werkstück positioniert wurde, wird in dem NC-Programm auf der Maschinensteuerung eine Subroutine aufgerufen, in der folgende Schritte ausgeführt werden (s. Bild 4.15): So lange in der Kamera kein Bild ausgewertet wird, meldet die Kamera über einen digitalen Ausgang, dass sie für eine Messung bereit ist. Die Maschinensteuerung prüft, ob dieses digitale Signal anliegt und gibt dann über einen digitalen Ausgang die Anforderung für die Messung an die Kamera. Kann die Bildverarbeitung in der intelligenten Kamera alle Messwerte erfassen, so meldet sie dies über einen digitalen Ausgang und übermittelt dann die Messwerte über die serielle Datenleitung.

Durch die Abstimmung von Maschinensteuerung und intelligenter Kamera über die digitale Schnittstelle ist also sichergestellt, dass die ASCII-Daten, welche über die serielle Schnittstelle übertragen werden, richtig empfangen und den Messgrößen zugeordnet werden.

Die Abstände werden dabei noch als Anzahl der Pixel übermittelt. In der NC-Steuerung werden sie in Millimeter skaliert. Dieser Wert für den Abstand des Werkstücks von der Gasdüse wird dann mit dem Sollwert verglichen und der Verfahrensweg für die Z-Achse berechnet. Dem Benutzer werden Messwerte und Verfahrensweg angezeigt und optional in eine Datei geschrieben. Nach dem Verfahren des Werkstücks wird der gesamte Vorgang so lange wiederholt, bis der Verfahrensweg kleiner 5 μm wird. Diese Regelschleife ist notwendig, da Objektfehler und inhomogene Ausleuchtung des Messfeldes einen

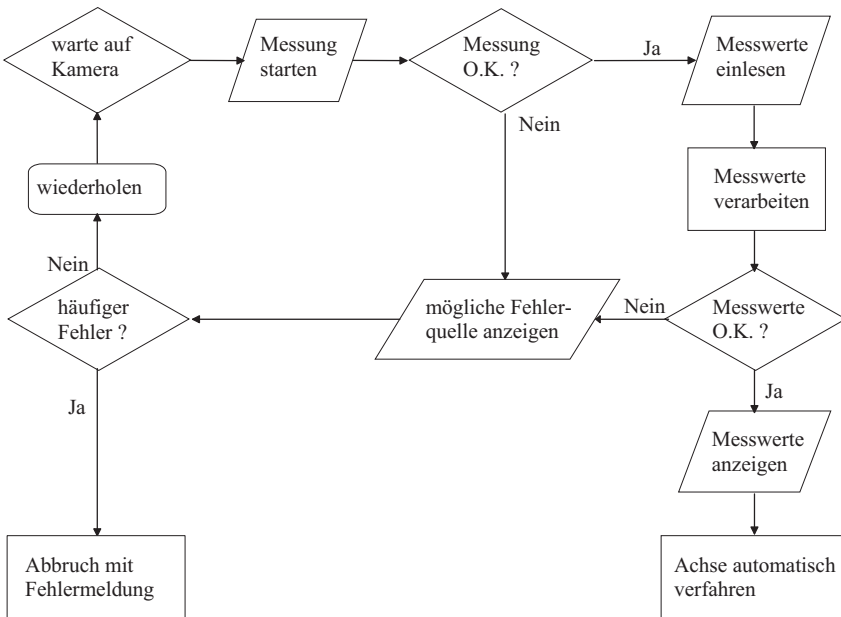


Bild 4.15: Auf der Maschinensteuerung läuft die dargestellte Regelschleife. Durch die Abstimmung über digitale Leitungen wird der Zeitablauf in Messrechner und Kamera synchronisiert.

Einfluss auf die Messung haben. Weiterhin hängt der berechnete Verfahrensweg von dem Skalierungsfaktor ab. Durch diese Einflüsse ist der Messwert nicht unbedingt linear mit dem Abstand, so dass eine einzige Korrektur nicht ausreicht.

In der Versuchsanlage wurden verschiedene Fehler beobachtet, die durch die NC-Steuerung abgefangen werden. Je nach Symptom werden an den Benutzer unterschiedliche Fehlermeldungen ausgegeben, die in Tabelle 4.1 aufgeführt sind.

Fehlt das „Bereit“-Signal der Kamera oder ist die Datenübertragung über die serielle Schnittstelle vorübergehend gestört, so wird die Messanforderung durch die NC-Steuerung wiederholt, so dass doch noch eine gültige Messung erfolgen kann. Erst nach einer einstellbaren Anzahl von fehlerhaften Versuchen wird mit einer Fehlermeldung abgebrochen. Ist jedoch der Abstand kleiner als ein vordefinierter Mindestwert, so wird das Programm mit einer entsprechenden Meldung abgebrochen, um eine Kollision zu vermeiden.

Ursache	Symptom	Wiederholung der Messung	angezeigte Fehlermeldung
Kamera nicht eingeschaltet	„Bereit“-Meldung der Kamera fehlt	ja	Kamera ist nicht bereit
Beleuchtung ausgefallen	Kamera meldet Messfehler	ja	Messwert fehlerhaft
kein Werkstück vorhanden	Kamera meldet Messfehler	ja	Messwert fehlerhaft
Werkstück falsch eingesetzt	Kamera meldet Messfehler	ja	Messwert fehlerhaft
Werkstück falsch eingesetzt	Abstand kleiner als Mindestwert (z. B. 1 mm)	nein	Abstand zum Laser kleiner als 1 mm gemessen.
Werkstückhalterung beschädigt	Messwerte schwanken stark an einem Bauteil	nein	Justage überprüfen
falsche Positionierung des Werkstücks	Abstand kleiner als Mindestwert (z. B. 1 mm)	nein	Abstand zum Laser kleiner als 1 mm gemessen.
geringfügig falsche Positionierung des Werkstücks	Korrekturweg größer 0,5 mm	nein	Verfahrweg > 0,5 mm! Justage des Werkstücks überprüfen!

Tabelle 4.1: Fehler in der Versuchsanlage führen zu verschiedenen Fehlermeldungen der intelligenten Kamera, wodurch ein Eingriff des Bedieners ausgelöst wird.

4.2.4.3 Vorteile des Messverfahrens

Mit dem aufgezeigten Messverfahren kann die Lage des Werkstücks mit einer Genauigkeit von $\pm 25 \mu\text{m}$ geregelt werden. Hiermit wird die Fokusslage hinreichend genau eingestellt, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Auf Grund der Auflösung des CCD-Chips und des Blickfelds der Kamera kann der Sollabstand zwischen Gasdüse und Werkstück bis zu 4 mm betragen.

Da die Messung im Gegenlicht erfolgt und nur die Kante des Werkstücks erfasst, ist sie unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks. Wechselnde Reflektivität und Rauigkeit stellen, im Gegensatz zur Lasertriangulation, kein Problem dar.

Diese Technik lässt sich auch nutzen, um die Programmierung der Werkstückpositio-

nierung zu vereinfachen. Wie bereits zuvor erwähnt (s. Abschnitt 4.2.1.2), werden die Lochpositionen auf Konturen im Inneren des Bauteils bezogen. Hierfür reicht es im Allgemeinen aus, die axiale Lochposition, gekennzeichnet durch den Schnittpunkt der Lochachse mit der Bauteilachse, den Einfallswinkel und den Winkel auf dem Umfang anzugeben. Soll die Lochposition in axialer Richtung verschoben werden, muss das Bauteil gegenüber dem Laser in X-Richtung verschoben werden (vgl. Bild 4.16). Steht nun die Oberfläche des Werkstücks nicht senkrecht zum Laserstrahl, so bedeutet dies auch eine Änderung der Fokusslage. Diese müsste nun durch entsprechende Änderung der Z-Koordinate ausgeglichen werden. Mit der Abstandsregelung durch die intelligente Kamera erfolgt diese Korrektur automatisch, so lange das Bauteil nicht aus dem Sichtbereich der Kamera bewegt wird.

Ebenso kann der Einfallswinkel eingestellt werden, ohne die Form des Bauteils zu berücksichtigen. Hierfür ist es sinnvoll, in der Maschinensteuerung den Schnittpunkt von der Lochachse mit der Bauteilachse als Drehpunkt anzunehmen. Über eine Koordinatentransformation werden aus einer Drehung des Bauteils um diesen Drehpunkt die Bewegungen des Achssystems für X-, Z- und B-Achse bestimmt. Zum Einstellen des Einfallswinkels der Bohrung reicht es dann, die Drehung um den genannten Schnittpunkt durchzuführen. Dadurch bewegt sich praktisch der Laserfokus auf einem Kreis um den fiktiven Drehpunkt (s. Bild 4.16). Die dadurch verursachte Fokusslagenänderung wird wiederum automatisch kompensiert.

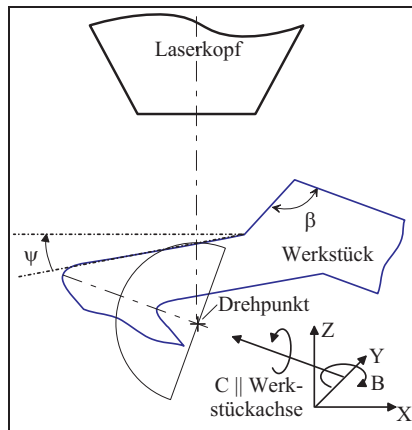


Bild 4.16: Bei Änderung des Einfallswinkels kann die Werkstückoberfläche durch einen Halbkreis angenähert werden.

Die soeben genannten Punkte vereinfachen die Programmierung erheblich. Andernfalls müssten mit Kenntnis der Außenkontur des jeweiligen Bauteils die Algorithmen programmiert werden, welche die Einhaltung der Fokusslage über die Werkstückpositionierung sicherstellen.

Weit wichtiger ist die Abstandsregelung bei den nicht bezifferbaren Abweichungen von der geforderten Fokusslage. Wie in Abschnitt 4.2.1.2 erläutert, kann ein verformter Dorn leicht dazu führen, dass der Abstand zwischen Werkstück und Gasdüse schwankt. Dies

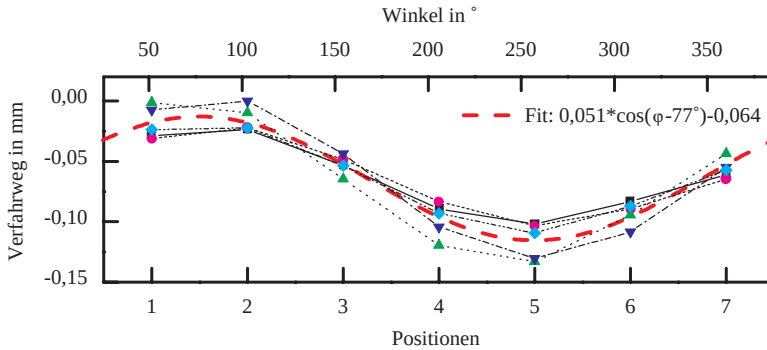


Bild 4.17: An Drehteilen wurden 7 auf dem Umfang verteilte Positionen angefahren. Dargestellt sind die Werte für 5 Bauteile. Der Verfahrweg ist der Weg, um den das Bauteil zur Regelung des Abstands verfahren wird. Ein negativer Verfahrweg bedeutet, dass das Werkstück zu nah am Laserkopf positioniert wurde und die Abstandsregelung das Bauteil in negativer Z-Richtung bewegt.

kann beispielsweise an Drehteilen beobachtet werden, bei denen über den Umfang verteilt 7 Positionen angefahren werden. Bild 4.17 zeigt die Verfahrwege für 5 verschiedene Bauteile, sowie eine Cosinusfunktion als Ausgleichskurve. Diese stellt die Formel $\Delta Z = 0,051 \cdot \cos(\phi - 77^\circ) - 0,064$ dar. Das bedeutet, dass die Bauteilachse von der Drehachse $51 \mu\text{m}$ abweicht. Nach Gleichung 4.1 entspricht das mit der hier gegebenen Bauteillänge einem Winkel von $0,068^\circ$. Die maximale Abweichung liegt bei einem Winkel von 77° . Weiterhin erkennt man hieran, dass in diesem Fall die Werkstückaufnahme $64 \mu\text{m}$ zu hoch positioniert wird.

4.3 Durchbrucherkennung beim Wendelbohren

Das dritte Element der Prozesssicherung ist die Durchbrucherkennung. Wie in Abschnitt 2.2.4.4 ausgeführt wurde, müssen Schwankungen in der Bohrzeit, bedingt durch Toleranzen der Bauteile und Schwankungen der Prozessparameter, erkannt werden. In einem bestimmten zeitlichen Abstand nach Erreichen des Durchbruches muss der Laser abgeschaltet werden, um Qualitätseinbußen der Präzisionsbohrung zu vermeiden.

4.3.1 Bestimmung einer geeigneten Messgröße

Bei anderen Lasermaterialbearbeitungsverfahren, wie beispielsweise dem Laserschweißen, werden verschiedene Sensoren zur Prozessüberwachung eingesetzt, überwiegend zum Erfassen von elektromagnetischer Strahlung. Je nach Wellenlänge, die durch den Sensor erfasst wird, unterscheidet man in

- Rückreflexsensor zur Messung der verwendeten Laserwellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$,
- Temperatursensor mit einem Messbereich von 1200–2200 nm und
- Plasmasensor mit einem Messbereich von 400–1000 nm.

Während des Bohrprozesses mit Nanosekunden-Laserpulsen ist von Anfang an über dem Bohrloch ein starkes Leuchten zu erkennen, das auch mit den genannten Sensoren erfasst werden kann. Das Leuchten geht vom Metaldampfplasma aus, das durch aufgeheizten, hochionisierten Metaldampf gebildet wird, und möglicherweise auch durch partikelgezündetes Plasma(vgl. Abschnitt 2.2.3). Der Metaldampf wird während der Dauer des Laserpulses auf mehrere 1000° C aufgeheizt [29].

Die Strahlungsemission ist während der Phasen I bis III des Bohrprozesses zu erkennen. Im Moment des Durchbruchs, also des vollständigen Durchbohrens des Werkstücks, ändern sich die Bedingungen für die Ausbildung der Metaldampfes schlagartig:

- Nach dem Durchbruch ist am Bohrlochgrund kein Material mehr vorhanden, so dass Laserstrahlung durch die Öffnung hindurch tritt. Diese kann nicht mehr zum Abtrag beitragen.
- Am Rand des Bohrlochgrunds trifft der Laserstrahl im spitzen Winkel auf die Wandung. Dadurch wird die Einkopplung deutlich verringert.
- Das verdampfte Metall kann nun nicht mehr nur in Richtung der Laserstrahlquelle abströmen, sondern auch durch den Strahlaustritt. Dieses Material wird nicht in dem Bereich hoher Intensitäten durch den Laserstrahl weiter aufgeheizt, sondern strömt hinter der Plasmawolke, die bereits einen Teil der Laserstrahlung absorbiert, in den Raum hinter der Bohrung. Dadurch wird der Metaldampf weniger stark aufgeheizt.

Somit werden Druck und Temperatur in Metaldampf im Moment des Durchbruchs deutlich verringert. In diesem Moment kann man auch eine deutliche Abnahme des Leuchtens erkennen.

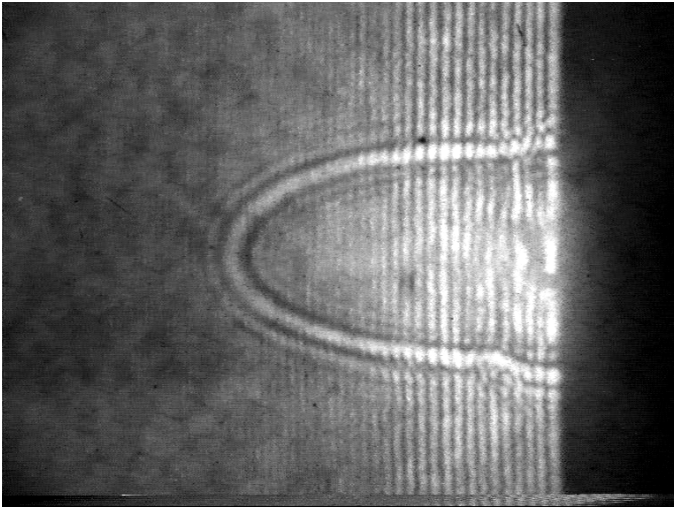


Bild 4.18: Beim Ausdehnen der Metaldampfwolke entsteht eine Stoßwelle. Die Ausdehnung dieser Stoßwelle ist im Schattenbild über dem Bohrloch zu erkennen. Die Aufnahme erfolgte ca. 30 ns nach Beginn des Laserpulses (vgl. [30, 2, 53]).

Bei Verwendung der Grundwellenlänge des Nd:YAG-Lasers¹ dehnt sich die Stoßwelle von der Oberfläche des Werkstücks in Richtung zur Strahlquelle aus. Sie hat eine Ausdehnung von einigen 100 μm bis zu einigen Millimetern in der Richtung des Laserstrahls. Quer zur Richtung des Laserstrahls ist die Ausdehnung deutlich kleiner, so dass sich eine schmale Stoßwelle ausbildet. Direkt hinter der Grenzfläche von Metaldampf zur Umgebungsatmosphäre wird das Laserlicht stark absorbiert. Im Bohrloch selbst ist die Wolke zusätzlich durch die Wandung beschränkt und verbreitert sich erst nach dem Ausströmen durch die Lochöffnung [53].

Durch die starke Aufheizung des Metaldampfs verschiebt sich dessen Wärmestrahlung bis in den sichtbaren Bereich. Im Moment des Durchbruchs verringert sich dann einerseits die Menge des ablatierten Materials, also die Menge der abstrahlenden Materie, andererseits die Temperatur des Metaldampfs. Dadurch kommt es zu einer Abnahme der emittierten Strahlung, die als Indiz für den Durchbruch verwendet werden kann.

Da im Moment des Durchbruchs die Laserstrahlung durch die Öffnung hindurchtreten kann, wird ab diesem Moment auch weniger Strahlung am Bohrungsgrund reflektiert.

¹Absorptionsmechanismen und die daraus resultierende Stoßwellenform werden für verschiedene Wellenlängen in [53, 26] näher erläutert.

Somit könnte auch das reflektierte Laserlicht als Indiz für den Durchbruch dienen.

Vergleichsmessungen mit den drei Sensoren haben gezeigt, dass im Wellenlängenbereich von 400–1000 nm der stärkste Signalabfall zu beobachten ist. Deshalb wird im Folgenden das Signal des so genannten „Plasmasensors“ betrachtet.

4.3.2 Funktionsprinzip der Durchbrucherkennung

Zum Erfassen des Durchbruchzeitpunkts wird das Leuchten des Metaldampfplasmas mit Photodioden gemessen (s. Abschnitt 3.2, [61, 62]). Dabei werden die Prozessemissionen koaxial zum Laserstrahl erfasst. Diese Anordnung der Messsensorik hat wesentliche Vorteile:

- Auch in tiefen Bohrlöchern erfolgt, im Gegensatz zur Messung mit einem seitlich angebrachten Sensor, keine Abschattung.
- Der Sensor ist weit entfernt von der Bearbeitungsstelle und wird somit nicht verschmutzt.
- Die bei der Mengenfertigung nötigen Absaugvorrichtungen behindern nicht die Detektion des Plasmaleuchtens.

In Bild 4.19 ist der Signalverlauf während eines Bohrprozesses zu sehen. Hierbei wurde eine Durchgangsbohrung mit ca. 100 μm Durchmesser und zylindrischer Form erzeugt. Nach einem starken Leuchten in der Anfangsphase und einem leichten Abfall des Signals erkennt man über einen längeren Zeitraum ein konstantes Signalniveau. Dies kann mit den ersten beiden Phasen des Hirschegg-Modells erklärt werden (vgl. S. 35). Während der ersten Phase ist der Abtrag am höchsten, so dass auch viel Metaldampf entsteht und das Messsignal groß ist. Zur zweiten Phase nimmt der Abtrag ab und bleibt konstant.

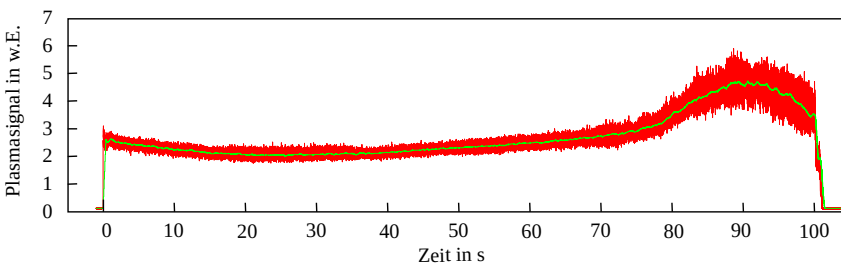


Bild 4.19: Plasmaemissionen während einer Bohrung (Beschreibung siehe Text).

Der Abfall im Messsignal ist kleiner als auf Grund des geringeren Bohrfortschritts zu erwarten wäre (vgl. [3]). Dies liegt möglicherweise daran, dass in der zweiten Phase die Ausbreitung des Plasmas durch die Wand der Bohrung eingeschränkt wird, so dass ein Großteil des Plasmas im Detektionsbereich des Sensors liegt.

Gegen Ende des Prozesses wird das Signal wesentlich unruhiger und steigt vorübergehend an. Eine Ursache dieses Signalanstiegs könnte die vermehrte Entstehung von partikelgezündetem Plasma in der Bohrung sein (vgl. S. 36). Mit zunehmender Bohrtiefe wird der Weg für das abgetragene Material länger, so dass es zunehmend wahrscheinlicher wird, dass bei dem folgenden Laserpuls noch ausreichend Partikel in der Bohrung vorhanden sind, um ein solches Plasma zu zünden (vgl. S. 88).

Schließlich fällt das Signal sehr schnell ab. Wird der Laser direkt nach dem Signalabfall abgeschaltet, so wird eine sehr gute Lochqualität erreicht, wie sie in Bild 2.10(b) gezeigt wird. In Kombination mit den sich ändernden Bedingungen für die Entstehung des Metaldampfplasmas (s. S. 82) und des Leuchtens kann der Signalabfall als Indiz für den Durchbruch verwendet werden.

Zur Abschaltung des Lasers wird das Messsignal des Plasmasensors ständig mit einem Schwellwert verglichen. Dieser Schwellwert kann entweder fest gewählt werden, wie beispielsweise „1,5“ in der gezeigten Messkurve, oder aber dynamisch, also beispielsweise 50 % des Maximums der Messkurve. Da die absolute Signalthöhe von verschiedenen Prozessparametern abhängt, muss ein fester Schwellwert immer dem der Lochgeometrie adaptierten Prozess angepasst werden. Mit einem dynamischen Schwellwert ist man hingegen weitgehend unabhängig von der Lochgeometrie.

4.3.3 Vorteile der Abschaltautomatik

Mit den in Tabelle 3.2 aufgeführten Prozessparametern beträgt die Bohrzeit $t_B = 103,8 \pm 2,5$ s (Standardabweichung), wobei Werte zwischen 99 s und 115 s auftreten. Ohne die automatische Durchbrucherkennung müsste folglich der Laser für 115 s eingeschaltet werden, um bei allen Löchern das Material vollständig zu durchbohren. Durch das Erkennen des Durchbruchs wird also, neben der Sicherung der Bohrungsqualität (s. Abschnitt 2.2.4.4), auch eine deutliche Reduzierung der mittleren Prozesszeit erreicht.

Bei Löchern mit diesem Durchmesser sind das mit dem gezeigten Verfahren typische Prozesszeiten. Für die Fertigung sind diese Bohrzeiten jedoch sehr lang. Deshalb ist es Ziel der laufenden Prozessentwicklung, durch Einsatz von weiter entwickelten La-

sersystemen oder Änderungen der Prozessführung eine Verkürzung der Prozesszeit zu erreichen [21, 37, 38].

In dem Rückraum der Bohrung ist nur wenig Platz, um das Backingmaterial zu platzieren. Deshalb hat dieses sehr kleine Abmessungen und muss präzise gefertigt werden. Das bedeutet einerseits, dass es nach kurzer Wechselwirkungszeit zerstört ist, andererseits, dass es in der Herstellung aufwändig ist. So kostet ein Backingteil ca. 0,50 €.

Das Backingmaterial versagt bereits nach wenigen Sekunden, so dass der Rückraum der Bohrung nicht mehr wirkungsvoll vor Beschädigungen und Verschmutzungen geschützt wird. Mit der Abschaltautomatik können ca. 40 Löcher gebohrt werden, bevor eine Schädigung im Innenraum des Bauteils entsteht. Bei einer Reaktionszeit der Durchbrucherkennung von 0,2 s bedeutet dies für das Backing eine Bestrahlungszeit von 8 s. Somit müsste ohne Abschaltautomatik nach jedem Loch das Backingmaterial gewechselt werden, was zu längerer Taktzeit führen würde. Für die Materialkosten ergibt sich die in Tabelle 4.2 dargestellte Kostenbetrachtung.

	ohne Durchbrucherkennung	mit Durchbrucherkennung
Bohrzeit	115 s	variabel 99–115 s
Bestrahlung des Backings	0–16 s	ca. 0,2 s
Versagen des Backings	nach 1–2 Löchern	nach 40 Löchern
Kosten bei 10^6 Löchern	500 Tsd €	25 Tsd €

Tabelle 4.2: Die Kosten des Backingmaterials werden bei Einsatz der Durchbrucherkennung durch Beenden des Prozesses nach Erreichen des Durchbruchs verringert.

Die Verwendung des Backings verhindert zwar die Beschädigung des Werkstücks hinter der einzubringenden Bohrung, kann sich aber auch nachteilig auf die Qualität der Bohrung auswirken. Einerseits kann an der Oberfläche des Backings Laserstrahlung reflektiert werden, wodurch die Verrundung der Austrittskante der Bohrung vergrößert werden kann. Weiterhin können durch Ablatieren des Backings auch Ablagerungen in der Bohrung oder an umgebenden Werkstückoberflächen entstehen. Um diese Effekte zu minimieren, ist eine kürzestmögliche Bestrahlendauer des Backings nötig, wie sie durch die Abschaltautomatik realisiert ist.

Ohne Verwendung von Backing dominieren als Vorteile der Abschaltautomatik die Reduzierung der Prozesszeit, die Sicherung der Oberflächenqualität und der Scharfkantigkeit der Bohrung am Austritt sowie der Schutz der hinter der Bohrung liegenden Werkstückoberflächen vor der Schädigung durch den Laserstrahl, der durch die fertiggestellte Bohrung tritt (vgl. S. 40).

4.4 Weitere Aussagen aus Höhe und Verlauf des Plasmasignals

Mit dem in Abschnitt 4.3 gezeigten Verfahren ist es gelungen, durch Überwachung des Prozessleuchtens das vollständige Durchbohren des Werkstücks zu erkennen und hiermit die Qualität der lasergebohrten Präzisionslöcher sicher zu stellen. Hierin liegt der eigentliche Verwendungszweck des Plasmasensors.

Ergänzend wurde untersucht, ob weitere Prozessparameter durch Beobachten der optischen Emissionen überwacht werden können. Hiermit sollen Fehlfunktionen des Lasers, Fehler in der Strahlformung sowie falsche Einstellungen durch den Bediener erkannt werden. Hierzu wurden gezielt die Parameter in geringem Maß verändert, um Störungen im System zu simulieren. Aus den Messkurven wurde einerseits die Bohrzeit ermittelt, die auch mit einfacheren Messgeräten gemessen werden kann, andererseits eine Reihe von Kennzahlen, welche die Form des Messsignals beschreiben:

- Bohrzeit: Zeit zwischen dem Ein- und Ausschalten des Lasers. Hierbei wird der Laser durch die Prozessüberwachung ausgeschaltet, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben.
- Maximum des geglätteten Signals.
- Mittelwert: Mittelwert des Messsignals während der Bohrzeit.
- Quadratischer Mittelwert: Quadratischer Mittelwert des Messsignals während der Bohrzeit.

Gegen Ende der Bohrzeit werden die Schwankungen des Signals größer (s. Bild 4.19). Um dies zu erfassen, werden außerdem folgende Kennwerte ermittelt:

- Maximale Schwankungsbreite: Maximaler Abstand der oberen und unteren Hüllkurven einer Messkurve. Die Hüllkurven verbinden die Extrema in Zeitintervallen mit einer Länge von 2% der Messdauer.
- Zeitpunkt der Schwankungszunahme: Der Zeitpunkt, zu dem die Schwankungen des Signals eine Schwelle von x Prozent der maximalen Schwankungsbreite erreichen. Dieser Zeitpunkt wird relativ zur Bohrzeit in Prozent angegeben.

Die Schwankungen können auf folgende Faktoren zurückzuführen sein:

- Die mit den Sensoren gelieferten Verstärker sind nicht auf die kurzen Laserpulse abgestimmt. Die von den Photodioden abgegebenen Signale, die im Wesentlichen

nur während des Laserpulses vorliegen, führen in den Verstärkern zu einem kurzen Signal, das im Abklingen von Oszillationen überlagert ist.

- Die Abtastfrequenz des Messsystems beträgt 1 kHz. Dabei ist das Messsystem nicht mit dem Laser synchronisiert. Um die kurzen Pulse mit dem Messsystem zu erfassen, wurde ein elektronisches Verzögerungsglied integriert (s. Abschnitt 3.5). Jedoch kann nicht bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt zwischen 2 Laserpulsen das Messsystem das Signal ausliest. Hierdurch kommt es zu Schwankungen im Messsignal, die aber für die Detektion des Durchbruchs nicht kritisch sind.
- Die Emissionen des Metaldampfplasmas hängen stark von der Dichte und der Temperatur des Plasmas ab. Beides wird durch Druck und Zusammensetzung der umgebenden Atmosphäre beeinflusst. Gerade in der tiefer werdenden Bohrung ist der Druck des Prozessgases nicht konstant. Vielmehr hängt der Druck von der Gasströmung ab, welche sich über dem Bohrloch ausbildet (vgl. Bild 4.33).
- Die Zusammensetzung des Plasmas, insbesondere des partikelgezündeten Plasmas (vgl. S. 36), hängt auch davon ab, wie viel gas- und dampfförmiges Material noch vom Abtragsvorgang beim vorhergehenden Laserpuls in der Bohrung vorhanden ist. Ein starkes Plasma schirmt viel Laserstrahlung ab, so dass am Bohrungsgrund weniger Abtrag erfolgt. Andererseits kommt es durch das heiße Plasma in anderen Bereichen der Bohrung zu verstärktem Abtrag. Kann dieses Material besser aus der Bohrung ausströmen als Material vom Grund des Loches, so ist beim nächsten Laserpuls weniger Material in der Atmosphäre, wodurch die Schwelle zu Entstehung des Plasmas erhöht wird. Hierdurch kommt es erst später zur Bildung des Plasmas und somit zu weniger Abschirmung.

Da die starken Schwankungen nur in einem bestimmten Abschnitt des Prozesses auftreten, sind die ersten beiden Faktoren praktisch auszuschließen. Der letzte Punkt ist wahrscheinlich die Ursache für die in Abschnitt 4.4.4 aufgezeigten Effekte.

Ein anderer Grund für eine Instabilität des Prozesses könnte das Erreichen der 4. Phase des Bohrprozesses nach dem Hirscheegg-Modell sein. In dieser Phase kommt es aber zum Abknicken des Bohrlochs, was bei Untersuchungen an Keramikproben beobachtet wurde [63]. Dieses Phänomen tritt jedoch bei den hier betrachteten Bohrungen nicht auf, da die Pulsenergie stets ausreicht, um die Werkstücke vollständig zu durchbohren.

Auch ein partielles Durchbohren des Werkstücks entfällt als Ursache für die Instabilität des Prozesses. Bei einem partiellen Durchbruch würde die Bohrung am Austritt allmählich weiter aufgeweitet werden, wie es auch beim Laserbohren mit der Wellenlänge 532 nm beobachtet wird [3]. Damit wäre der plötzliche Signalabfall am Ende des Prozesses nicht zu erklären.

4.4.1 Erkennen von Leistungsschwankungen anhand des Signalverlaufs im Plasmasignal

Die Eigenschaften der am Werkstück ankommenden Laserstrahlung können sich auf verschiedene Weise ändern:

- Alterung oder Beschädigung des Laserkristalls,
- Veränderung der Temperatur im Laserkopf,
- Alterung oder Verschmutzung von optischen Komponenten,
- falsche Leistungswahl durch den Bediener.

Dabei können sich sowohl das Strahlprofil als auch die Laserleistung verändern. Da die gewünschte Lochform erst bei der maximal einzustellenden Laserleistung erreicht wurde, liegt der Sollwert bei 100 %, so dass nur eine Abweichung zu niedrigerer Leistung simuliert werden konnte.

Der Einfluss der Laserleistung auf das Messsignal ist im Bereich kleiner Änderungen allerdings gering. So lässt sich eine Änderung der Laserleistung um bis zu 5 % an den formbezogenen Kennwerten des Plasmasignals nicht erkennen (s. Bild 4.20).

Lediglich die Bohrzeit ist bedingt aussagekräftig. Betrachtet man die Statistik über mehrere Bauteile, so ist auf Grund der großen Standardabweichung der Messwerte kaum

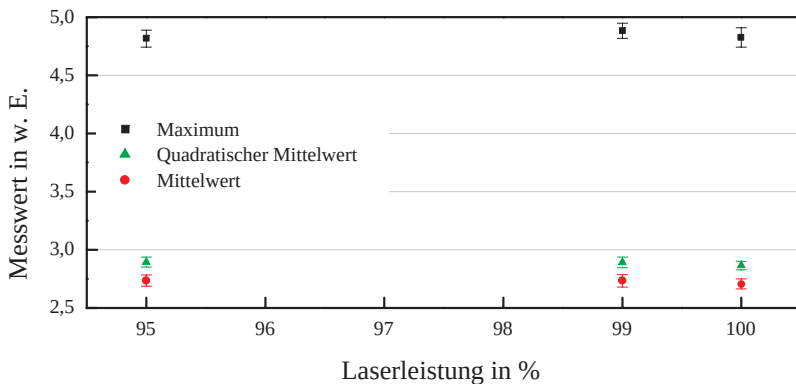


Bild 4.20: Dargestellt sind Formkennzahlen (s. S. 87) für die Messkurven bei unterschiedlicher Laserleistung. Bei einem Abfall der Laserleistung um bis zu 5 % kann man keine Unterschiede in der Form des Signalverlaufs erkennen.

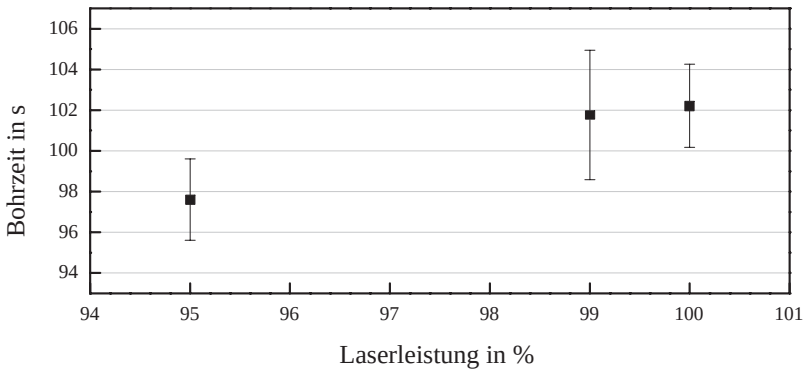


Bild 4.21: Durch relativ große Schwankungen der Bohrzeit kann eine Änderung der Laserleistung nicht mit Sicherheit erkannt werden. Die Abnahme der Bohrzeit kommt von einer Verkleinerung der Bohrung, insbesondere am Bohrungsaustritt.

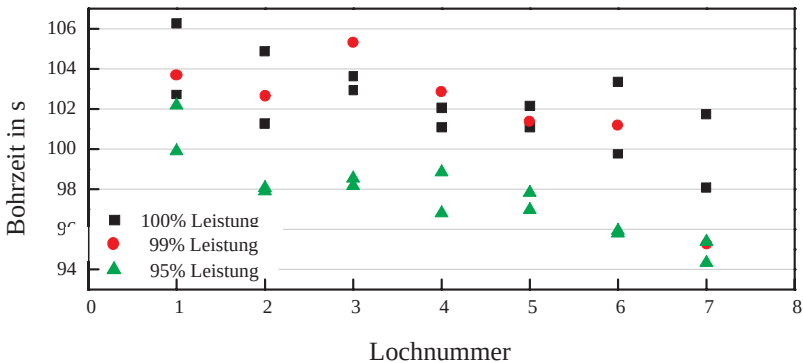


Bild 4.22: Die Schwankungen der Bohrzeit (s. S. 87) werden durch statistische und systematische Änderungen bedingt. Betrachtet man die Bohrzeit für die einzelnen Lochpositionen auf dem Umfang des Bauteils, so kann man tendenziell eine Abnahme von Loch zu Loch feststellen. An den einzelnen Lochpositionen wird eine Leistungsabnahme von 5 % durch eine Abnahme der Bohrzeit erkannt.

eine Aussage möglich (s. Bild 4.21). Hierbei spielen jedoch statistische Fehler und systematische Schwankungen zusammen. Betrachtet man die Bohrzeit für die einzelnen Lochpositionen auf dem Umfang des Bauteils, so sieht man eine Abnahme der Bohrzeit von Loch zu Loch (s. Abbildung 4.22). Diese systematische Änderung wurde bei einer Vielzahl von Einstellungen beobachtet. Die Ursache kann darin liegen, dass die Handlingzeiten zwischen zwei Bauteilen wesentlich länger sind als zwischen zwei Löchern

auf dem selben Bauteil. Somit variieren auch die Zeiten, in denen der Laserstrahl ein- bzw. ausgeschaltet ist. Somit könnte eine Änderung des thermischen Gleichgewichts im Laserkopf oder eine Temperaturänderung von Strahlführungskomponenten eine Rolle spielen.

Bezogen auf die einzelnen Lochpositionen erkennt man eine Abnahme der Bohrzeit, wenn die eingestellte Laserleistung um 5 % abweicht (s. Bild 4.22). Dies ist dadurch zu erklären, dass mit abnehmender Laserleistung auch die Größe der Bohrung abnimmt. Die Zunahme der Signalfluktuationen ist in dem betrachteten Bereich im Rahmen der Messgenauigkeit unabhängig von der Laserleistung.

4.4.2 Aussage über die Fokusslage

Eine Abweichung von der eingestellten Fokusslage lässt sich anhand der Formkennzahlen kaum erkennen. Erst bei einer positiven Abweichung der Fokusslage um 0,1 mm gibt es einen deutlichen Signalanstieg (s. Bild 4.23).

Die Schwankungsbreite verhält sich mit Maximum und Mittelwerten analog dem Messsignal. Jedoch ändert sich der Zeitpunkt der Schwankungszunahme auch bei negativer Abweichung der Fokusslage um 0,1 mm, wenn die Schwelle auf 35 % gesetzt wird (s. Bild 4.24). Auch eine positive Abweichung der Fokusslage um 0,05 mm kann durch die Zunahme der Schwankungen erkannt werden, wenn als Schwelle 50 % der Schwankungsbreite gewählt wird.

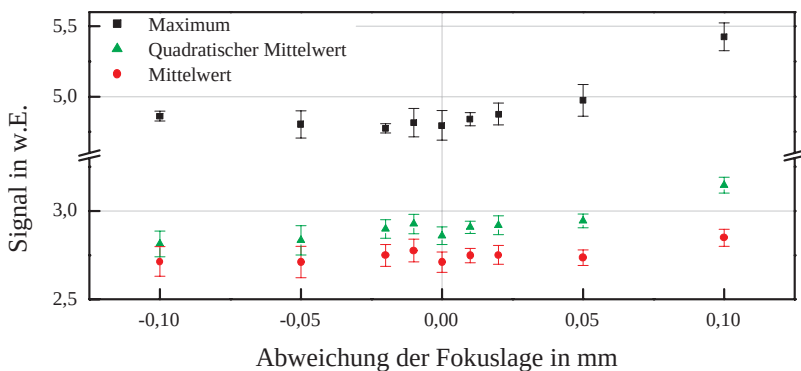


Bild 4.23: Die Kennwerte des Messsignals sind in einem weiten Bereich unabhängig von der Fokusslage. Erst bei einer positiven Abweichung 0,1 mm ist ein Signalanstieg zu erkennen, der über die Fluktuationen hinausgeht.

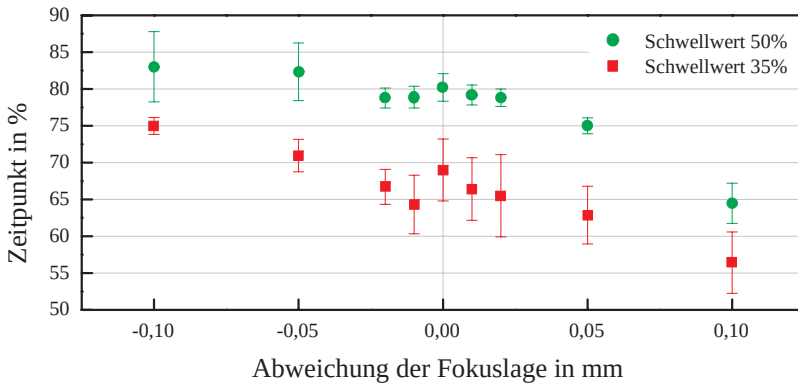


Bild 4.24: Bei einer Abweichung der Fokusslage verschiebt sich der Zeitpunkt (s. S. 87), an dem die Signalschwankungen zunehmen. Bei geeigneter Wahl der Schwelle, wie beispielsweise 35 %, können Abweichungen der Fokusslage um -0,1 mm oder +0,05 mm erkannt werden.

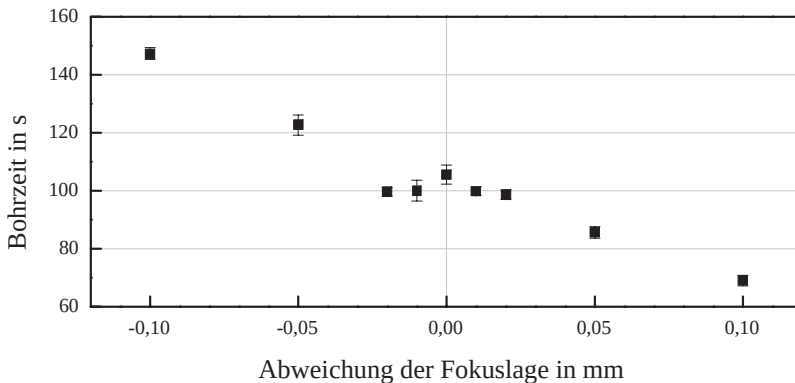


Bild 4.25: Bei Abweichung der Fokusslage um $\geq 0,05$ mm ändert sich die Bohrzeit signifikant. Somit lässt sich durch Überwachen der Bohrzeit eine falsche Position der Fokussierlinse erkennen.

Einen wesentlich deutlicheren Indikator stellt hingegen die Bohrzeit dar. Bei einer Änderung der Fokusslage um $\pm 0,05$ mm weicht die Bohrzeit um mehr als 15 % vom Standardwert ab (s. Bild 4.25). Das leichte Plateau um den Sollwert herum kann geometrisch erklärt werden: Bei der gewählten Fokusslage ist die Bohrung zylindrisch; sobald die Fokusslage verändert wird, wird aus dem Zylinder ein Kegelstumpf, wodurch das Volumen abnimmt. Größere Änderungen der Fokusslage haben sowohl einen Einfluss

auf das abgetragene Volumen als auch auf die Prozess-Effizienz, wodurch die deutlich unterschiedlichen Bohrzeiten verursacht werden. Da hier nur die Abweichung von den Sollparametern erkannt werden sollte, wurde auf das Vermessen der einzelnen Löcher verzichtet. Eine Änderung der Fokusslage um $\pm 0,05$ mm würde in jedem Fall zu einem Ausschussteil führen, da Lochdurchmesser und -form außerhalb der Toleranz liegen, wie Parameterstudien gezeigt haben [3].

4.4.3 Rückschlüsse auf den Gasdruck

Das Prozessgas hat, wie in Abschnitt 2.2.4.6 ausgeführt, einen großen Einfluss auf den Bohrprozess. Bei einem gewählten Gasdruck von 6 bar (s. Tabelle 3.2) wurden die übrigen Prozessparameter optimiert, um die gewünschte Lochgeometrie zu erzeugen. Dieser Druck wurde an der Gasflasche mit Hilfe eines Druckminderers eingestellt. Der Gasdruck im Werkstück hängt darüber hinaus von Länge und Durchmesser der verwendeten Gasleitungen und der Form des Bearbeitungskopfes sowie der Gasdüse ab. Ein genauer Vergleich zweier verschiedener Bearbeitungsstationen kann mit Hilfe einer ortsauflösenden Gasdruckmessung durchgeführt werden (vgl Bild 4.33(b)).

Weicht nun der Gasdruck vom Sollwert ab, so beobachtet man über den gesamten Bohrprozess ein stärkeres Leuchten, also einen größeren Mittelwert des Plasmasignals (s. Bild 4.26). Wie in Bild 4.27 zu erkennen ist, nehmen dabei die Fluktuationen deutlich früher zu.

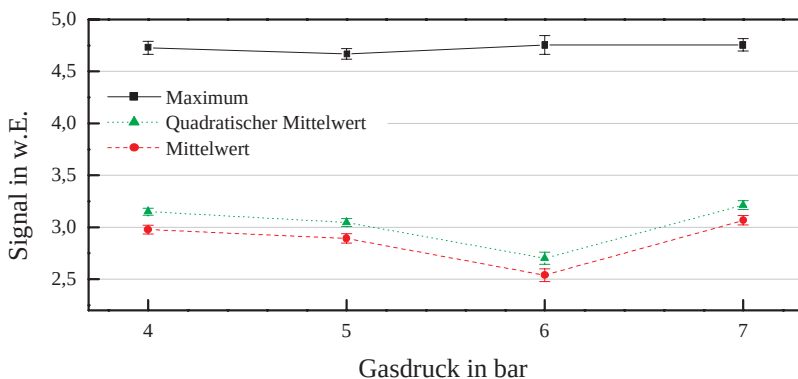


Bild 4.26: Während das Maximum des Plasmasignals fast unverändert bleibt, nehmen Mittelwert und quadratischer Mittelwert deutlich zu (Erläuterungen siehe Text).

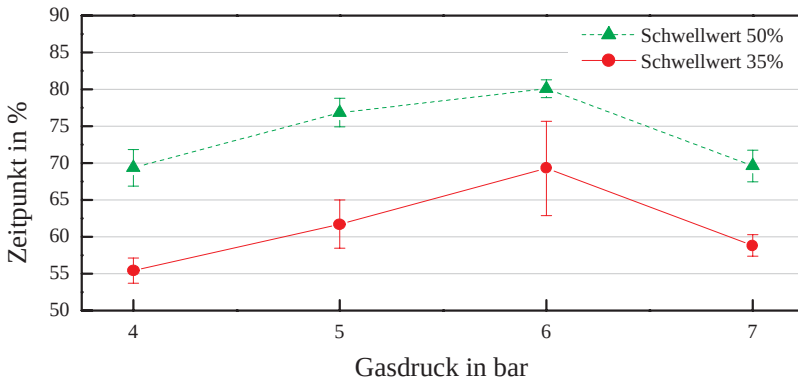


Bild 4.27: Die starken Fluktuationen des Plasmasignals setzen deutlich früher ein, wenn der Gasdruck nicht dem Sollwert von 6 bar entspricht.

Eine mögliche Ursache ist die sich ändernde Gasströmung bei Variation des Gasdrucks. Hierauf wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

Die Bohrzeit verhält sich gegenläufig zum Plasmasignal (s. Bild 4.28): Bei dem Gasdruck $p_g = 6$ bar sind die Prozessemissionen klein, jedoch die Bohrzeit sehr lang, bei den anderen Drücken sind die Prozessemissionen größer, aber die Bohrzeit kürzer. Somit korreliert hier die Höhe des Prozesssignals mit dem Bohrfortschritt.

Der Gasdruck bietet eine Möglichkeit, die Prozesszeit zu optimieren und wird in weiteren Arbeiten näher untersucht [37, 38].

4.4.4 Korrelation des Abstands zwischen Werkstück und Gasdüse zum Plasmasignal

In dem Maschinenaufbau wird die Fokusslage durch die Abstandsmessung mit einer intelligenten Kamera sicher gestellt (s. Abschnitt 4.2.4). Ob eine Abweichung des Abstands anhand des Plasmasignals erkannt werden kann, soll im Folgenden betrachtet werden.

Verändert sich der Abstand des Werkstücks zur Gasdüse, so ändert sich einerseits die Fokusslage, andererseits aber auch die Gasströmung. Um beide Effekte zu trennen, wurde einmal nur die Fokusslage verändert (s. Abschnitt 4.4.2), hier hingegen nur der Abstand

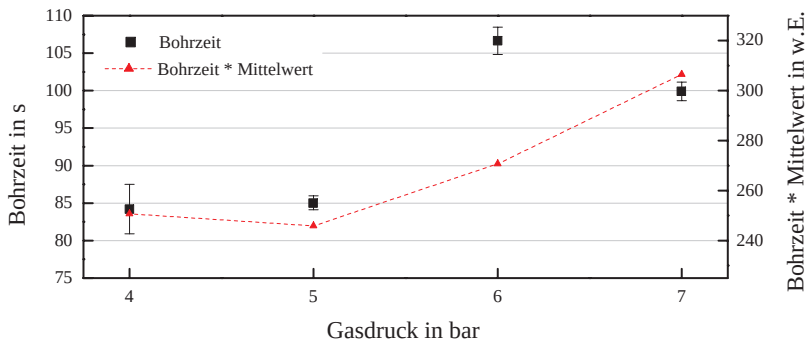


Bild 4.28: Bei Veränderung des Gasdrucks verhält sich die Bohrzeit gegenläufig zum Mittelwert des Plasmasignals. Jedoch ist das Produkt aus Bohrzeit und Mittelwert, also das Integral des Plasmasignals über die Zeit, nicht konstant.

des Werkstücks zur Gasdüse, wobei durch das Nachführen der Fokussierlinse die Fokusslage konstant blieb.

Ausgehend von einem Sollabstand von 1,0 mm zwischen Gasdüse und Werkstück zeigt Bild 4.29 die Auswirkungen auf das Plasmasignal, wenn dieser Abstand um bis zu $\pm 0,2$ mm verändert wird. Während das Maximum sich nur unwesentlich ändert, erkennt man am Mittelwert eine deutliche Zunahme des Signals bei zunehmendem Abstand. Hierbei sind wieder systematische Schwankungen zu erkennen, so dass die Signaländerung deutlicher wird, wenn man die einzelnen Lochpositionen betrachtet (s. Bild 4.30).

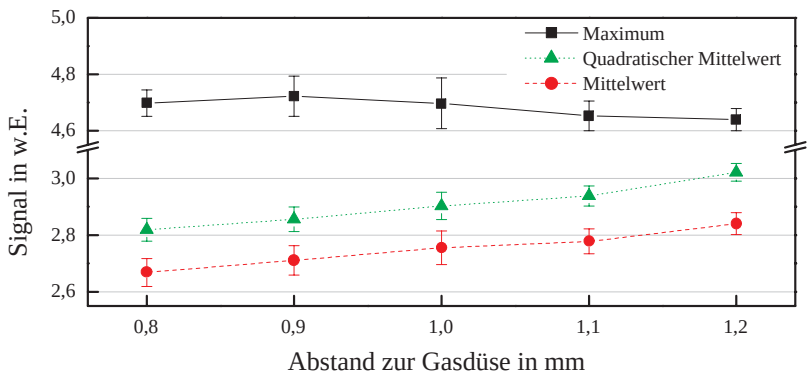


Bild 4.29: Vergrößert man den Abstand zwischen Gasdüse und Werkstück, so nimmt das Plasmasignal zu.

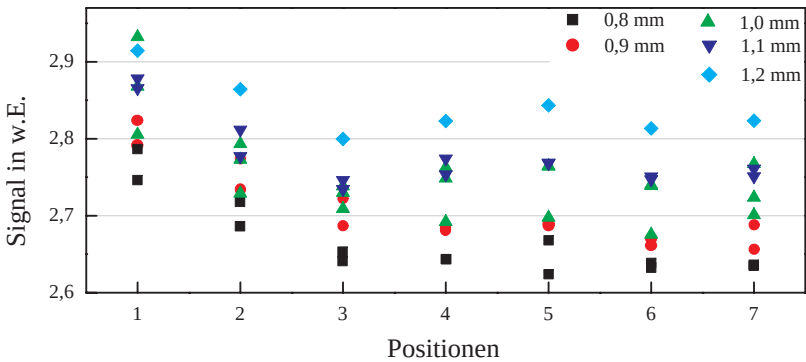


Bild 4.30: Bezogen auf die einzelnen Lochpositionen wird die Änderung des Plasmasignals etwas deutlicher. Dargestellt ist hier der Mittelwert des Plasmasignals für verschiedene Abstände zwischen Gasdüse und Werkstück.

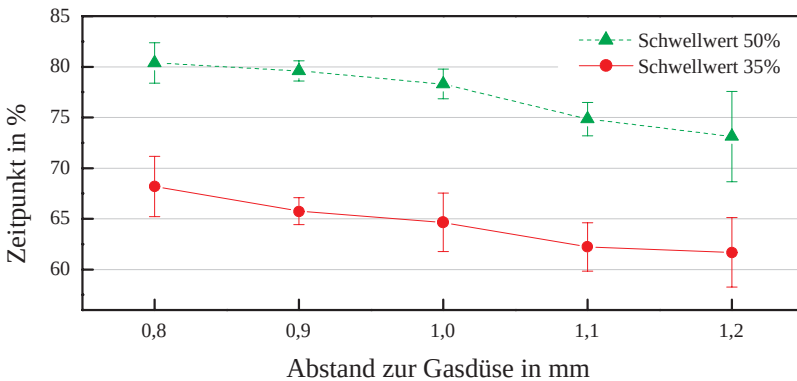


Bild 4.31: Durch Vergrößern des Zwischenraumes zwischen Werkstück und Laserkopf setzen die Signalschwankungen früher ein.

Gleichzeitig verschiebt sich der Zeitpunkt, an dem die Signalschwankungen zunehmen, zu früheren Zeiten (s. Bild 4.31).

Auch bei dieser Abweichung von den Sollwerten ist die Bohrzeit wieder der stärkste Indikator. Sie nimmt mit zunehmendem Abstand deutlich ab (s. Bild 4.32). Hier ergibt sich noch Potenzial zur Prozessoptimierung.

Die Ursache dieser Signaländerungen liegt in der Änderung der Strömungsbedingungen des Prozessgases. Bild 4.33 zeigt exemplarisch die Messung des Drucks unter der Gas-

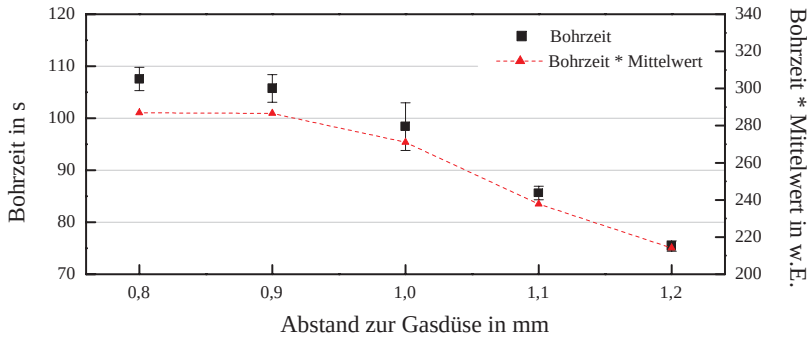


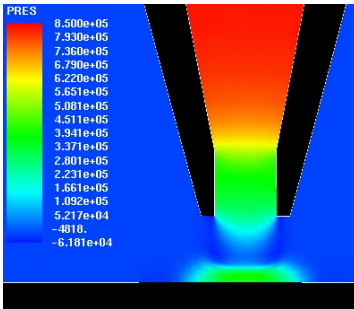
Bild 4.32: Die Bohrzeit wird deutlich verkürzt, wenn der Abstand zwischen Gasdüse und Werkstück zunimmt. Da hierbei die Plasmaemissionen sich nur wenig ändern, folgt das Produkt aus Bohrzeit und dem Mittelwert des Plasmasignals im Wesentlichen der Form der Bohrzeit-Kurve.

düse bei einem Druck von 8 bar [38]. In der Simulation der Gasströmung zwischen der Gasdüse und einem flachen Werkstück sieht man, dass der Druck direkt hinter der Düse stark abnimmt und erst am Werkstück wieder aufgebaut wird. Hierbei hängt der Druckverlauf auch von dem Austrittsdurchmesser der Gasdüse ab (Bild 4.33(b)). Je breiter die Gasdüse, desto weiter kann der Druck aufrecht erhalten werden.

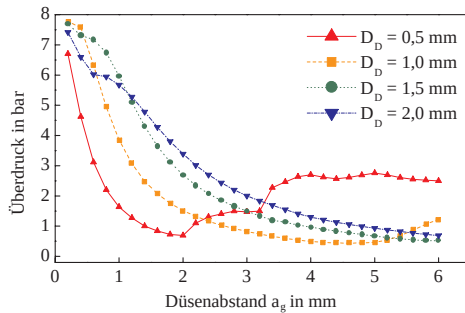
Neben dem Druck des Prozessgases wirkt auch das Strömungsbild auf den Bohrprozess ein. Deshalb sind die Ergebnisse nicht direkt mit der Änderung des Gasdrucks vergleichbar. Bei vergrößertem Abstand nimmt der Gasdruck ab, wobei weniger Plasmasignal und eine verkürzte Bohrzeit zu beobachten sind. Hierin findet sich eine Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen beim Ändern des Gasdrucks und Ändern des Abstands zur Gasdüse. Beim Verkleinern des Abstands sollte aber in gleichem Maße der Druck zunehmen, wobei an anderer Stelle (s. Bild 4.28) die Bohrzeit ebenfalls abnahm. Möglicherweise kommt es hier zu einer Änderung im Strömungsbild. Wie in Bild 4.33(b) zu sehen, kommt es bei der Strömung gegen einen flachen Messkopf zu nicht monotonen Druckänderungen, wie bei einem Abstand von 2 mm von der Gasdüse mit Durchmesser 0,5 mm. Durch die Kegelform der Werkstückspitze weicht das Strömungsbild allerdings von dem in dieser Simulation betrachteten Verlauf ab.

4.4.5 Detektion von Abweichungen des Wendeldurchmessers

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird der Wendelradius über den Verdrehwinkel der Keilplatten eingestellt. Er kann gemessen werden, indem der Einbrand des Laserstrahls



(a) Strömungssimulation bei einem Gasdruck von 8 bar, wobei der Gasstrom auf eine flache Platte trifft.



(b) Gemessener Druck an einem flachen Messkopf hinter Düsen mit unterschiedlichem Durchmesser D_D bei Variation des Abstands zwischen Messkopf und Gasdüse.

Bild 4.33: Der Gasdruck am Werkstück wird durch die Form von Gasdüse und Werkstück sowie den Abstand zwischen Werkstück und Düse beeinflusst.

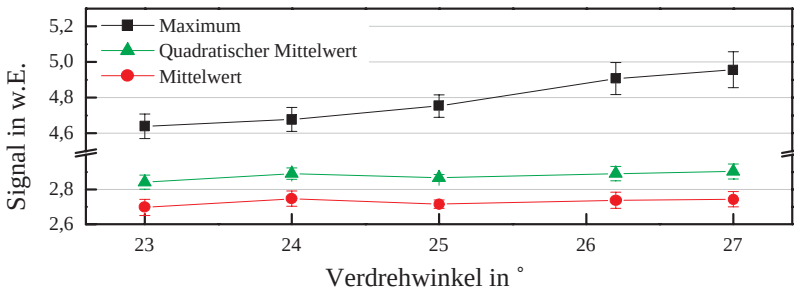


Bild 4.34: Das Verändern des Verdrehwinkels und somit auch des Wendeldurchmessers, verändert das Plasmasignal im Mittel nicht. Das Maximum, welches gegen Ende des Bohrprozesses auftritt, nimmt mit wachsendem Verdrehwinkel zu.

auf einer mit Aluminium beschichteten Glasplatte vermessen wird [3]. Da der resultierende Lochradius neben dem Wendelradius auch von einer Vielzahl weiterer Prozessparameter abhängt, wird der für einen geforderten Lochdurchmesser nötige Verdrehwinkel empirisch ermittelt und der Wendelradius als Zwischengröße nicht in jedem Fall ermittelt. Deshalb ist in den folgenden Bildern der Verdrehwinkel angegeben.

Wird der Verdrehwinkel verändert, so bleibt das Plasmasignal im Mittel fast unverändert (s. Bild 4.34). Im Bereich der durchgeführten Änderungen des Wendeldurchmessers

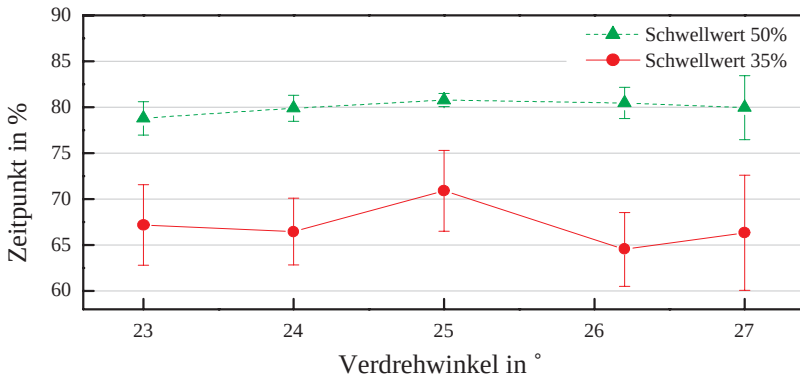


Bild 4.35: Dargestellt ist der Zeitpunkt (s. S. 87), an dem die Schwankungen des Signals zunehmen, mit Schwellwerten von 35 % bzw. 50 % der jeweiligen maximalen Schwankungsbreite. Durch die starken Loch-zu-Loch-Schwankungen kann keine wesentliche Abhängigkeit vom Verdrehwinkel erkannt werden.

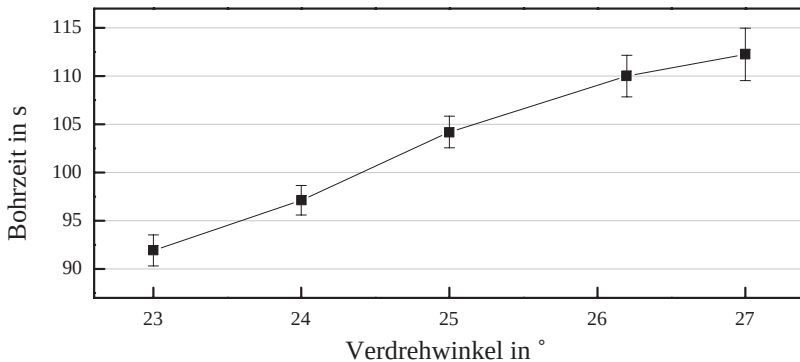


Bild 4.36: Durch den steigenden Verdrehwinkel nehmen der Wendeldurchmesser und damit auch das abzutragende Volumen zu, was zu einer längeren Bohrzeit führt.

ist also das Plasmaleuchten nahezu konstant, wobei das Maximum, welches gegen Ende des Bohrprozesses auftritt, bei steigendem Verdrehwinkel zunimmt. Der Zeitpunkt, an dem die Signalschwankungen zunehmen, ist im Rahmen der auftretenden Loch-zu-Loch-Schwankungen unverändert (s. Bild 4.35).

Mit zunehmendem Verdrehwinkel der Wendelbohreroptik nimmt der Wendelradius und damit der Eintrittsdurchmesser zu [3]. Wie Bild 4.36 zeigt, führt dies auch zu einer längeren Bohrzeit.

4.4.6 Zusammenfassende Beurteilung der Aussagen des Plasmaleuchtens

Als wesentliche Aussage des Plasmaleuchtens wird der Zeitpunkt des Durchbruchs verwendet, der eine Abnahme des Signals um mehr als eine Größenordnung verursacht. Die darauf aufbauende Abschaltautomatik für den Laserprozess ist bereits in den ersten Lasermaterialbearbeitungsstationen für das Präzisionsbohren implementiert.

Weitere Parameter lassen sich hingegen nur schwer aus dem Signal ablesen. Meist werden nur größere Veränderungen erkannt, obwohl auch geringere Fehleinstellungen bereits zu falschen Prozessergebnissen führen. Selbst bei der Fokuslage wird erst eine Abweichung von 0,05 mm erkannt, wobei die Akzeptanzschwelle bei 0,025 mm anzusetzen ist.

Die Bohrzeit scheint ein Indikator für viele Prozessparameter zu sein, wobei eine Änderung der Bohrzeit nicht direkt auf einen einzelnen Parameter schließen lässt. Auch sind kleine Schwankungen der Bohrzeit auf Grund wechselnder Wandstärken noch kein Indiz für eine fehlerhafte Lochgeometrie.

Die deutliche Verkürzung der Bohrzeit bei Veränderung der Strömungsverhältnisse des Prozessgases bietet einen Anhaltspunkt für weitere Prozessoptimierungen. Hierzu werden bereits weiterführende Untersuchungen, sowohl zum Wendelbohren als auch zum Einzelpulsbohren, durchgeführt [37, 38].

5 Zusammenfassung

Für die Herstellung von Bohrungen in metallischen Bauteilen mit Durchmessern kleiner als 120 μm werden verschiedene Laserbohrverfahren eingesetzt. Bei Bohrungen, welche neben dem Durchfluss auch das Sprühbild eines Fluids bestimmen sollen, werden Durchmesser und Form der Bohrung mit Abweichungen von wenigen Mikrometern spezifiziert. Diesen Anforderungen wird als einziges Laserbohrverfahren das Wendelbohren gerecht, welches in den letzten Jahren entwickelt wurde. In metallischen Bauteilen werden Durchmesser mit einer Genauigkeit von $\pm 3 \mu\text{m}$ im Durchmesser und $\pm 1 \mu\text{m}$ in der Form erzeugt.

Um dieses Verfahren in der Mengenfertigung einzusetzen, muss eine hohe Reproduzierbarkeit der Bohrungsgeometrie und -qualität gewährleistet sein und die Prozesszeit eine wirtschaftliche Fertigung erlauben. Die notwendigen Lasersysteme mit Pulsenergien von mehreren Millijoule sollen Pulswiederholfrequenzen von einigen Kilohertz liefern können, um Prozesszeiten von wenigen Sekunden zu erreichen. Solche Systeme mit einer Leistungsstabilität von 1–2 % stehen inzwischen am Markt zur Verfügung.

Weiterhin müssen die Prozessparameter, die einen wesentlichen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis haben, kontinuierlich überwacht und teilweise geregelt werden. Hierfür wurden im Rahmen dieser Arbeit Verfahrens- und Systemkomponenten entwickelt, welche erfolgreich in die Fertigung eingeführt wurden. Zur Überwachung des Lasersystems wird vor Inbetriebnahme des Lasers und in regelmäßigen Wartungsintervallen das Vermessen der Strahlqualität empfohlen. Damit werden Fokusedurchmesser und Rayleighlänge des Laserstrahls erfasst und dokumentiert und Beschädigungen des Lasers beim Transport sowie fehlerhafte Auslegung oder Justage der Strahlführungskomponenten aufgedeckt.

Durch fertigungsbedingte Toleranzen der Werkstücke und Werkstückaufnahme ist eine Regelung des Abstands zwischen Laserfokus und Werkstück nötig. Hierzu wurde festgestellt, dass bei der gegebenen Stabilität des Lasersystems der Laserfokus räumlich konstant bleibt, und eine Regelung des Abstands zwischen Werkstück und der Gasdüse, welche das Prozessgas zuführt, die Forderung nach konstanter Fokusslage erfüllt. Hierfür wurden verschiedene Sensoren getestet. Während für Werkstücke mit ebener Oberfläche Triangulationssensoren und kapazitive Sensoren erhältlich sind, waren für Bauteile mit

gedrehter, gekrümmter Oberfläche keine Systeme verfügbar. In dem entwickelten Messverfahren wird eine intelligente Kamera verwendet, in deren Blickfeld das Werkstück und die Gasdüse im kontrastreichen Gegenlicht erscheinen. Durch Bildverarbeitung werden die Konturen von Gasdüse und Werkstück erfasst und deren Abstand ermittelt. Die Kamera wurde mit der Steuerung der Bearbeitungsstation verkettet. Hierdurch ist es möglich, durch Bewegen des Werkstücks mittels Linearachsen den Abstand zu regeln. Mit dieser vollautomatischen Abstandsregelung wird für einen Sollabstand von bis zu 4 mm eine Genauigkeit von $\pm 0,025$ mm erreicht.

Eine weitere Auswirkung der Bauteiltoleranzen ist eine schwankende zu durchbohrende Wandstärke. Mit den Leistungsschwankungen des Lasersystems ergeben sich hieraus wechselnde Durchbruchzeiten. Da eine weitere Energieeinbringung durch den Laserstrahl nach Durchbohren des Werkstücks die Oberflächenqualität der Bohrungswandung verschlechtert und im Rückraum der Bohrung zur Bauteilbeschädigung führen kann, ist es erforderlich, den Zeitpunkt des Durchbruchs zu erkennen. Mittels koaxial messender Photosensoren werden Prozessemissionen, welche von aufgeheiztem Metaldampf und Plasma ausgehen, erfasst und ausgewertet. Der Durchbruch des Laserstrahls wird durch einen starken Abfall des Messsignals erkannt. Durch Kommunikation der signalverarbeitenden Komponenten mit der Maschinensteuerung wird der Laser abgeschaltet und der Bohrprozess beendet. Daraufhin kann das Werkstück für den nächsten Bohrprozess positioniert werden. Durch die hiermit realisierte Abschaltautomatik werden Prozesszeiten optimiert und die Lebensdauer des Backingmaterials, welches hinter der Bohrung zum Schutz des Rückraums positioniert ist, deutlich verlängert.

Die entwickelten Methoden und Regelmechanismen werden bereits in der Fertigung der Robert Bosch GmbH eingesetzt, um Einspritzkomponenten prozesssicher herzustellen. Zukünftig müssen sie an die Entwicklung des Bohrverfahrens angepasst werden. Da für die Fertigung kürzere Prozesszeiten angestrebt werden, wird hier ein Lasersystem mit höherer Pulswiederholrate eingesetzt, das inzwischen am Markt verfügbar ist. Bei einer Entwicklung hin zu höheren Pulswiederholraten sind kaum Anpassungen der gezeigten Prozesssicherungskonzepte nötig, da die physikalischen Wechselwirkungen und somit die Form des Bohrfortschritts erhalten bleiben.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lasergebohrte Düsenspannschraube.	21
2.2	Geometrische Kenngrößen einer Bohrung.	22
2.3	Bemaßung am Locheintritt.	23
2.4	Fokussierung Gaußscher Strahlen.	26
2.5	Messpositionen bei Bestimmung des Strahlpropagationsfaktors.	29
2.6	Vergleich der Laserbohrverfahren.	32
2.7	Strahlprofil und Ablationsschwelle.	33
2.8	Bohrungsdurchmesser in Abhängigkeit von Fokuslage und Laserleistung.	39
2.9	Bohrungsdurchmesser in Abhängigkeit von Fokuslage und Wendel- durchmesser.	41
2.10	Aussehen des Bohrgrundes beim Nachbohren.	42
2.11	Durchbruchzeiten bei unterschiedlichen Prozessgasen.	43
2.12	Experimenteller Aufbau bei [46].	45
2.13	Prinzipskizze des Strahlengangs für einen Autofokus.	48
3.1	Prinzipskizze des Versuchsaufbaus.	50
3.2	Schematischer Aufbau der Wendelbohroptik.	51
3.3	Wendeldurchmesser in Abhängigkeit vom Verdrehwinkel.	52
3.4	Anordnung der intelligenten Kamera.	54
3.5	Aufbau des Strahlanalyse-Systems.	55
3.6	Schematische Darstellung des Datenflusses in der Versuchsanlage.	56
3.7	Leistungsverlauf des Lasers.	58
3.8	Pulsdauer des Lasers bei verschiedenen Leistungseinstellungen.	59
3.9	Strahlprofil des eingesetzten Lasers.	60
3.10	Strahlkaustik eines Lasers mit $M^2 = 1,1$	61
4.1	Beugung des Laserstrahls an Aperturen.	64
4.2	Ringprofil eines diodengepumpten Nd:YAG-Lasers bei 532 nm.	65
4.3	Strahlprofil eines Lasers mit zwei Spitzen.	66
4.4	Auswirkung der Bauteil-Toleranzen auf die Fokuslage.	67
4.5	Auswirkung der Werkstückaufnahme auf die Fokuslage.	68
4.6	Prinzip eines Lasertriangulations-Sensors.	70
4.7	Lasertriangulation an polierter Metalloberfläche.	71

4.8	Lasertriangulation an mattierter Metalloberfläche.	71
4.9	Triangulation unter dem Laserkopf.	72
4.10	Lasertriangulation an gedrehtem Bauteil.	72
4.11	Prinzip der kapazitiven Abstandsmessung.	73
4.12	Messgenauigkeit des kapazitiven Sensors an einem Drehteil.	74
4.13	Messgenauigkeit des kapazitiven Sensors an einem Drehteil nach Lage- änderung.	75
4.14	Abstandsmessung mit der intelligenten Kamera.	76
4.15	Ablaufdiagramm der Abstandsregelung.	78
4.16	Annäherung der Oberfläche durch einen Halbkreis.	80
4.17	Ausgleich von Fokusalagschwankungen mit der Abstandsregelung. . .	81
4.18	Stoßwelle über dem Bohrloch.	83
4.19	Plasmaemissionen während einer Bohrung.	84
4.20	Signaländerung bei Abnahme der Laserleistung.	89
4.21	Änderung der Bohrzeit bei Abnahme der Laserleistung.	90
4.22	Bohrzeit bezogen auf die Lochpositionen bei Abnahme der Laserleistung.	90
4.23	Signal bei Abweichung der Fokuslage.	91
4.24	Zunahme der Schwankungsbreite bei Fokuslagenänderung.	92
4.25	Änderung der Bohrzeit bei Fokuslagenänderung.	92
4.26	Plasmasignal bei Variation des Gasdrucks.	93
4.27	Fluktuation des Signals bei Variation des Gasdrucks.	94
4.28	Bohrzeit bei Variation des Gasdrucks.	95
4.29	Plasmasignal beim Verändern des Abstands zur Gasdüse.	95
4.30	Plasmasignal an den verschiedenen Lochpositionen beim Verändern des Abstands zur Gasdüse.	96
4.31	Schwankungen des Signals beim Verändern des Abstands zur Gasdüse.	96
4.32	Bohrzeit beim Verändern des Abstands zur Gasdüse.	97
4.33	Abhängigkeit des Gasdrucks am Werkstück von Abstand und Form der Gasdüse.	98
4.34	Plasmasignal bei Variation des Verdrehwinkels.	98
4.35	Schwankungen des Signals bei Variation des Verdrehwinkels.	99
4.36	Bohrzeit bei Variation des Verdrehwinkels.	99

Tabellenverzeichnis

3.1	Strahlparameter des Rohstrahls bei 2 kHz.	60
3.2	Prozessparameter bei Bohrversuchen.	62
4.1	Fehlermeldungen der intelligenten Kamera.	79
4.2	Kosten des Backingmaterials.	86

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] DE PAOLI, A.; RAPP, J. M.: *Laseranwendung in der Kraftstoffeinspritztechnik*. In: Dausinger, F.; Hügel, H.; Opower, H. (Hrsg.): *Proceedings der Stuttgarter Lasertage 1999 (SLT '99)*, Stuttgart. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 1999, S. 8–11.
- [2] DAUSINGER, F.; ABELN, T.; BREITLING, D.; KONOV, V.; KLIMENTOV, S.; KONONENKO, T.; TSARKOVA, O.: *Bohren keramischer Werkstoffe mit Kurzpuls-Festkörperlasern*. *LaserOpto* **31** (1999) Nr. 3, S. 78–85.
- [3] WAWRA, T.: *Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung*. Universität Stuttgart, Dissertation, in Vorbereitung.
- [4] VDI-TECHNOLOGIEZENTRUM PHYSIKALISCHE TECHNOLOGIEN: *Präzise Optische Bearbeitung von Festkörpern*. VDI-Verlag, 1996.
- [5] BAHNMÜLLER, J.: *Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren*. München: Utz Verlag Wissenschaft, 2000. Universität Stuttgart, Dissertation, 2000 (Reihe Laser in der Materialbearbeitung).
- [6] *BMB+F Verbundtreffen : Laserinduzierte Fertigungsverfahren - Abtragen mit Laserphotonen*. Verbundtreffen, September 1997.
- [7] TÖNSHOFF, H. K.; VON ALVENSLEBEN, F.; GRAUMANN, C.; WAGNER, T.: *Schlagbohren von Mikrolöchern in Keramik mit Excimerlaserstrahlung*. *Laser und Optoelektronik* **30** (1998) Nr. 6, S. 41.
- [8] NORM DIN PREN ISO 11145:1998. *Optik und optische Instrumente - Laser und Laseranlagen - Begriffe und Formelzeichen (Entwurf)*.
- [9] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser : Eine Einführung*. Stuttgart: Teubner, 1992 (Teubner Studienbücher Maschinenbau).
- [10] GERTHSEN, C.; KNESER, H. O.; VOGEL, H.: *Physik*. Berlin: Springer, 1989.
- [11] NORM EN ISO 11146:1999. *Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlparameter - Strahlabmessungen, Divergenzwinkel und Strahlpropagationsfaktor*.
- [12] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Stuttgart: Teubner Verlag Wissenschaft, 1995. Universität Stuttgart, Habilitation, 1995 (Reihe Laser in der Materialbearbeitung).
- [13] ABELN, T.: *Interaction at Ultra-Short Pulse Duration*. In: Proc. of the Russian-German Workshop on Fundamentals of Ablation and Drilling with Short Pulsed

- Solid State Lasers. Stuttgart. Institut für Strahlwerkzeuge, 30.01.–03.02. 1999.
- [14] KÖRNER, C.: *Theoretische Untersuchungen zur Wechselwirkung von ultrakurzen Laserpulsen mit Metallen*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1997.
- [15] ROCKSTROH, T. J.; CHEN, X.; LOTSHAW, W. T.: *Influence of Laser Pulse Duration on Laser Drilled Hole Quality in Nickel Based Super Alloy*. In: Duley, W. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 1996. Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 1996, Section C, S. 113–140 (LIA Vol. 81).
- [16] CHEN, X.; ORTIZ, A. L.; STAVAR, P. R.; STAVAR, P. R.; LOTSHAW, W. T.; ROCKSTROH, T. J.; MCLAUGHLIN, M. H.: *Improved hole drilling using a high peak power Nd:YAG laser at the second harmonic wavelength*. J. Laser Appl. **9** (1997) Nr. 6, S. 287–290.
- [17] KNOWLES, M. R. H.; RUTHERFORD, R.; BELL, A. I.; ANDREWS, A. J.; FOSTER-TURNER, G.; KEARSLEY, A. J.; COUTTS, D. W.; KAPITAN, D.; WEBB, C. E.: *Sub-micron and high precision micro-machining using nanosecond lasers*. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 1998. Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 1998, Section E, S. 112–120 (LIA Vol. 85).
- [18] CHEN, X.; LIU, X.: *Short pulsed laser machining: How short is short enough?* J. Laser Appl. **11** (1999) Nr. 6, S. 268–272.
- [19] NOLTE, S.; KAMLAGE, G.; KORTE, F.; OSTENDORF, A.; VON ALVENSLEBEN, F.: *Mikrostrukturierung mit Femtosekundenlasern*. LaserOpto **31** (1999) Nr. 3, S. 72–76.
- [20] KONONENKO, T. V.; KONOVA, V. I.; DAUSINGER, F.: *Comparative study of the ablation of materials by femtosecond and pico- or nanosecond laser pulses*. Soviet journal of quantum electronics **29** (1999) Nr. 8, S. 724.
- [21] *Präzise Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Strahlquellen (PRIMUS), Projektverband Femtosekundentechnologie*. BMBF-Programm Laser 2000, 1999–2001.
- [22] CALLIES, G.; SCHMITZ, G.; WAWRA, T.; SCHMIDT-SANDTE, T.: *Präzise Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulsstrahlquellen*. In: Dausinger, F.; Hügel, H.; Müller, M.; Weick, J. M. (Hrsg.): Stuttgarter Lasertage 2001 (SLT '01). Stuttgart. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 2001, S. 48–49.
- [23] *Russian-German Workshop on Fundamentals of Ablation and Drilling with Short Pulsed Solid State Lasers*. Stuttgart. Institut für Strahlwerkzeuge, 30.01.–03.02. 1999.
- [24] *International Workshop on Fundamentals of Ablation with Short Pulsed Solid State Lasers*. Stuttgart. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 07.02.–09.02. 2001.

- [25] BREITLING, D.; RUF, A.; DAUSINGER, F.; KLIMENTOV, S.; KONONENKO, T.; KONO, V.; SUZUKI, J.: *Bausteine zum Prozessverständnis beim Laserbohren*. In: Dausinger, F.; Hügel, H.; Müller, M.; Weick, J. M. (Hrsg.): *Stuttgarter Lasertage 2001 (SLT '01)*. Stuttgart. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 2001, S. 50–55.
- [26] RADTKE, J.: *Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung*. München: Utz Verlag Wissenschaft, 2003. Universität Stuttgart, Dissertation, 2003 (Reihe Laser in der Materialbearbeitung).
- [27] CALLIES, G.; SCHITTENHELM, H.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Simulation des Laserabtragens mit 3D-Wärmeleitungsmodell*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H. W.; Sigel, J. (Hrsg.): *Proc. of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96*, Wiesbaden: Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V, 1996, S. 613–620.
- [28] JACKSON, J. D.: *Classical Electrodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [29] CALLIES, G.; SCHITTENHELM, H.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Modeling of the expansion of laser-evaporated matter in argon, helium and nitrogen and the condensation of clusters*. *Appl. Surface Science* **127** (1998), S. 134–141.
- [30] SCHITTENHELM, H.; CALLIES, G.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Two-wavelength interferometry on excimer laser induced vapour/plasma plumes during the laser pulse*. *Appl. Surface Science* **127** (1998), S. 922–927.
- [31] SCHITTENHELM, H.: *Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen*. München: Utz Verlag Wissenschaft, 2000. Universität Stuttgart, Dissertation, 2000 (Reihe Laser in der Materialbearbeitung).
- [32] BAHNMÜLLER, J.; BECK, M.; LINDEN, P.; GIERING, A.: *Verfahren zur Fein- und Mikrobearbeitung von Werkstücken mittels Laserstrahlen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*. Offenlegungsschrift DE 197 45 280 A 1, 1999.
- [33] WAWRA, T.: *Techniques to Increase Accuracy in Drilling*. In: *Proc. of the Russian-German Workshop on Fundamentals of Ablation and Drilling with Short Pulsed Solid State Lasers*. Stuttgart. Institut für Strahlwerkzeuge, 30.01.–03.02. 1999.
- [34] BENZ, G.; SCHNEIDER, R.; EISEMANN, A.; WAWRA, T.: *Verfahren zur Erzeugung definiert konischer Löcher mittels eines Laserstrahls*. Patentschrift DE 199 05 571 C 1, 1999.
- [35] CHAN, W. T.; LEUNG, A. P. K. .; MAO, X. L.; RUSSO, R. E.: *Effects of gas environment on picosecond laser ablation*. *Appl. Surface Science* **127** (1998), S. 269–273.
- [36] MAO, X. L.; CHAN, W. T.; SHANNON, M. A.; RUSSO, R. E.: *Plasma shielding during picosecond laser sampling of solid materials by ablation in He versus Ar atmosphere*. *Journal of Applied Physics* **74** (1993) Nr. 8, S. 4915.

- [37] WILLERT, M.: *Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen*. Universität Jena, Dissertation, 2003.
- [38] DAUNER, A.: *Konzepte zur Debrisreduzierung beim Hochgeschwindigkeitslaserbrehen*. Universität Stuttgart, Dissertation, in Vorbereitung.
- [39] WIESEMANN, W.; JURCA, M.; GRIEBSCH, J.; SCHLICHTERMANN, L.: *Selbstlernende Online-Prozessüberwachung für das Lasertiefschweißen*. Maschinenmarkt **48** (1995).
- [40] MÜLLER, M.; DAUSINGER, F.; GRIEBSCH, J.: *On-Line-Prozeßsicherung beim Laserschweißen*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H. W.; Sigel, J. (Hrsg.): Proc. of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96, Wiesbaden: Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V, 1996, S. 243–250.
- [41] OLSEN, F. O.; JØRGENSEN, H.; BAGGER, C.; KRISTENSEN, T.; GREGERSEN, O.: *Recent Investigations in Sensorics for Adaptive Control of Laser Cutting and Welding*. Proc. of the International Conference on Laser Advanced Materials Processing (1992), S. 405–414.
- [42] REBER, G.; WIEDMAIER, M.: *Verfahren zur Überwachung von Fertigungsprozessen*. Offenlegungsschrift DE 199 62 967 A 1, 1999.
- [43] GRAËN, G.; DECKER, I.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschneiden durch Messung der Lichtemission*. In: 3. Internationale Konferenz Strahltechnik, Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1991, S. 251–255 (DVS-Berichte Band 135).
- [44] KONISHI, Y.; FUKUOKA, R.; KITA, S.: *Basic Study for Relationship between Fractal Dimension of AE Signal and Laser Cutting*. Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. **28** (1994) Nr. 2, S. 129–130.
- [45] MIYAZAKI, T.; TANAKA, Y.: *Monitoring Q-switched YAG Laser Drilling Process by Generated Sound*. Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. **25** (1991) Nr. 2, S. 142–147.
- [46] ROHDE, H.; DAUSINGER, F.: *The Forming Process of a Through Hole Drilled with a Single Laser Pulse*. In: Mazumder, J.; Matsunawa, A.; Magnusson, C. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO 1995. Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 1995, S. 331–340 (LIA Vol. 80).
- [47] ROHDE, H.; DAUSINGER, F.: *Investigation of the dynamical process during the formation of a micro through hole*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H. W.; Sigel, J. (Hrsg.): Proc. of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT 1996, Wiesbaden: Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V, 1996, S. 675–682.
- [48] CHEN, X.: *Method and apparatus for laser drilling*. Patentschrift US 6,054,673, 2000.

- [49] SOMERS, R. M.; COMPTON, D. R.: *Optical Breakthrough Sensor for Laser Drill*. Patentschrift US 5,026,964, 1991.
- [50] JONES, G. D.: *Laser machining apparatus*. Patentanmeldung GB 2 113 592 A, 1983.
- [51] DUFFIN, J. E.: *Laser breakthrough detection*. Patentanmeldung EP 0 937 533 A1, 1999.
- [52] FRENCH, P. W.; HAND, D. P.; PETERS, C.; SHANNON, G. J.; BYRD, P.; STEEN, W. M.: *Investigation of the Nd:YAG laser percussion drilling process using high speed filming*. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I. (Hrsg.): Proc. of the 17th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO 1998. Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 1998. Section B, S. 1–10 (LIA Vol. 85).
- [53] BREITLING, D.; SCHITTENHELM, H.; BERGER, P.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Shadowgraphic and interferometric investigations on Nd:YAG laser-induced vapor/plasma plumes for different processing wavelengths*. In: Lapucci, A.; Ciofini, M. (Hrsg.): Proc. of the XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference. Bellingham (WA): SPIE, 2001, S. 534–538 (SPIE Vol. 4184).
- [54] TÖNSHOFF, H. K.; HECKENJANN, P. B.; OVERMEYER, L.: *Autofokussensor für die Mikrobearbeitung*. Laser und Optoelektronik **25** (1993) Nr. 6, S. 60–65.
- [55] HAND, D. P.; SU, D.; NAEEM, M.; JONES, J. D. C.: *Fibre Optic Delivery and Process Sensing for Precision Cutting and Drilling*. In: Mazumder, J.; Matsunawa, A.; Magnusson, C. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO 1995. Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 1995, S. 341–350 (LIA Vol. 80).
- [56] PETRING, D.; FALK; TREUSCH, H.-G.; NÖLDECHEN, W.; ABELS, P.; LÄSSINGER, P.: *Vorrichtung zum berührungslosen Messen des Abstands von einem Objekt*. Patentschrift DE 40 25 577 C 2, 1999.
- [57] MÄSTLE, R.: *Anleitung zu dem an die Firma Bosch gelieferten Strahlanalysesystem*. 1997.
- [58] *Benutzerhandbuch StarLine*. Göttingen: Lambda Physik AG, 1997.
- [59] SALZBERGER, J.: *Berührungslose Wegsensoren im Vergleich*. F & M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik **106** (1998) Nr. 1/2, S. 70–74.
- [60] FRIE, W.; HONER, M.: *Positioniersystem einer Materialbearbeitungsanlage*. Offenlegungsschrift DE 199 03 884 A 1, 2000.
- [61] HONER, M.: *Signals for Process Monitoring*. In: Proc. of the Russian-German Workshop on Fundamentals of Ablation and Drilling with Short Pulsed Solid State Lasers. Stuttgart. Institut für Strahlwerkzeuge, 30. 01.–03. 02. 1999.

-
- [62] HONER, M.: *Process Monitoring*. In: Proc. of the International Workshop on Fundamentals of Ablation with Short Pulsed Solid State Lasers. Stuttgart. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 07. 02.–09. 02. 2001.
- [63] RADTKE, J.: *Drilling and cutting of ceramics with nanosecond lasers*. In: Proc. of the International Workshop on Fundamentals of Ablation with Short Pulsed Solid State Lasers. Stuttgart. Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 07. 02.–09. 02. 2001.

Danksagung

Zum guten Schluss möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Dissertation besonders beigetragen haben:

- Herrn Prof. F. Dausinger für Betreuung dieser Dissertation und wissenschaftliche Diskussionen, sowie Herrn Prof. H. Kück für die Übernahme des Mitberichts,
- meinen Vorgesetzten Herrn Dr. G. Schmitz, Herrn Dr. R. Schneider und Herrn Dr. J. Rapp für die freundliche Unterstützung meiner Arbeit,
- Herrn A. Eisemann, Herrn Dr. J. Wais und Herrn Dr. G. Callies für die fruchtbare Zusammenarbeit,
- meinem Mitsreiter und Freund Herrn Dr. T. Wawra für die exzellente Zusammenarbeit bei der Verfahrensentwicklung,
- meinen Doktorandenkollegen und Freunden Herrn Dr. A. Herrmann, Herrn Dr. T. Schmidt-Sandte, Herrn P. Jaeckle, Herrn K. Spennemann und Herrn M. Schmidt für das tolle Arbeitsklima,
- Herrn G. Reber für die Unterstützung bei der Softwaregestaltung und Herrn W. Frie für die Umsetzung der Regelung in der Kameraprogrammierung,
- meinen Kollegen am Institut für Strahlwerkzeuge und in der Abteilung FV/PLV für Gedankenaustausch und die angenehme Arbeitsatmosphäre,
- Mike und Letitia für ihren *native language support*,
- meinen Eltern für Ihre Unterstützung und Förderung, wodurch ich das Studium beginnen und bis zur Promotion fortführen konnte,
- meinen Freunden dafür, dass sie lange Zeiten der Funkstille ertragen haben.
- und vor Allem meiner Frau Christiane und meinem Sohn, die mich immer unterstützt haben und viel Zeit ohne mich verbringen mussten. Ihr Verständnis und ihre Motivation haben zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Gerlingen, 14. Oktober 2004

Michael Honer

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Zoske, Uwe

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

Gorritz, Michael

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

Mohr, Ursula

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

Rudlaff, Thomas

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

Borik, Stefan

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

Paul, Rüdiger

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

Wahl, Roland

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

Frederking, Klaus-Dieter

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

Grünewald, Karin M.

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

Shen, Jialin

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

Arnold, Johannes M.

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

Holzwarth, Achim

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

Dausinger, Friedrich

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

Meiners, Eckhard

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

Beck, Markus

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

Breining, Klaus

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

Griebisch, Jürgen

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

Kreputat, Walter

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

Xiao, Min

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

Glumann, Christiane

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

Gross, Herbert

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

Rapp, Jürgen

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

Wittig, Klaus

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

Grünenwald, Bernd

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

Lee, Jae-Hoon

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

Albinus, Uwe N. W.

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

Wiedmaier, Matthias

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

Bloehs, Wolfgang

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

Bea, Martin

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

Stöhr, Michael

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

Plaß, Wilfried

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

Schaller, Markus K. R.

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

Hack, Rüdiger

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

Krupka, René

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

Pfeiffer, Wolfgang

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

Volz, Robert

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

Bartelt-Berger, Lars

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

Müller-Hummel, Peter

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

Rohde, Hansjörg

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

Huonker, Martin

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

Callies, Gert

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

Schubert, Michael E.

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

Kern, Markus

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

Raiber, Armin

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Schittenhelm, Henrik

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

Stewen, Christian

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

Schmitz, Christian

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

Karszewski, Martin

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

Chang, Chin-Lung

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

Haag, Matthias

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

Bahn Müller, Jochen

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

Schellhorn, Martin Carl Johannes

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

Angstenberger, Birgit

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

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlaseren für den Karoseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

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

Mochmann, Gunter

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

Herrmann, Andreas

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

Mästle, Rüdiger

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

Voß, Andreas

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

Müller, Matthias G.

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

Abeln, Tobias

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

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Me-
tallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sy-
stemkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und Ex-
periment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8