

**Jürgen Koch**

**Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe**

# Werkstofftechnik Aktuell

Schriftenreihe aus dem Fakultätsübergreifenden Institut für  
Werkstofftechnik (IWT) an der TU Ilmenau

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Schaaf  
und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edda Rädlein

## Band 5

Die vorliegende Schriftenreihe "Werkstofftechnik Aktuell" berichtet über aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Institut für Werkstofftechnik (IWT) der TU Ilmenau. Die ausgewählten Texte spiegeln die breit gefächerten materialwissenschaftlichen und werkstofftechnischen Themen, die am IWT bearbeitet werden, wieder. Für weitere Informationen und Rückfragen können Sie sich gerne an das Institut ([www.tu-ilmenau.de/wt](http://www.tu-ilmenau.de/wt)) wenden oder das Institut persönlich besuchen. Über Ihre Anregungen, konstruktive Kritik und Ihre Kontaktaufnahme würden wir uns sehr freuen. Das IWT steht wissenschaftlichen Zusammenarbeiten stets aufgeschlossen gegenüber.

# Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe

Jürgen Koch



Universitätsverlag Ilmenau  
2011

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 21. April 2010

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Schaaf  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Edda Radlein  
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Emmel  
(Hochschule Amberg-Weiden)

Tag der Verteidigung: 19. November 2010

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

ISSN 1868-6532 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-939473-95-4 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000500](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000500)

Für Liane, Aurelia, Ailis und Katharina

*„With a Little Help from My Friends“  
Beatles, Sgt. Pepper's Lonely Hearts Club Band  
Composition: John Lennon, Paul McCartney; Vocals: Ringo Starr  
Abbey Road Studios, London 1967*



# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit, Lasereindbearbeitung metallischer Werkstoffe, fasst die Einzelprozesse der abtragenden Mikromaterialbearbeitung von Metallen mit Laserpulsen von ns-Dauer zusammen. Damit werden synergetische Effekte zwischen den Einzelprozessen aufgedeckt, die einer Beschreibung sowohl des stationären Abtrags, d. h. bei der ortsfesten Überlagerung der applizierten Laserpulse, wie auch beim dynamischen Abtrag, also bei Vorherrschen einer Relativbewegung zwischen einfallendem Laserstrahl und Bauteil, dienen. Darüber hinaus finden Untersuchungsergebnisse zur Strahlausbreitung Eingang in die Betrachtungen. Unter Beachtung der Intensitätsverteilung im Strahl gelingt somit die Entwicklung einer Modellvorstellung, die erstmals neben den Abtragmechanismen auch optische Parameter zur Beschreibung der Ergebnisse berücksichtigt. Auf dieser Grundlage wird eine Simulation der Pulsüberlagerung beim flächigen Abtrag erstellt, die eine Vorhersage der Bearbeitungsergebnisse ermöglicht und eine Visualisierung von Optimierungsbemühungen erlaubt.

Ergebnisse eigener experimenteller Untersuchungen sowie aus der Literatur bekannte Daten werden einerseits dazu genutzt, die Modellvorstellung zu entwickeln, andererseits belegen sie auch die Genauigkeit der Vorhersagen. Außerdem dienen die Resultate zur Identifikation und Verifikation der abtragrelevanten Parameter. Beim Perkussionsbohren bestätigen sie die Mechanismen des stationären Abtrags, der überwiegend von Schmelzeantrieb und somit von der Pulsenergie dominiert wird. Durch den Einsatz der statistischen Versuchsplanung zeigen sie beim flächigen Abtrag auf, dass die Mechanismen des stationären Abtrags weiterhin ihre Gültigkeit behalten. Die Laserpulse können als Einzelereignisse aufgefasst werden und das Verhalten beim dynamischen Abtrag entspricht dem von einer freien Oberfläche.

Zur vollständigen Beschreibung des Formabtrags sind jedoch auch die Strahlausbreitung und die daraus resultierende Strahl-Stoff-Wechselwirkung beim überlappenden Einsatz einer Vielzahl an Laserpulsen zu beachten. Dies führt zur Berücksichtigung der Iso-Intensitätslinien entlang der Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung und zur Definition einer Grenzintensität, die von der Abtragschwelle, also den thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, abhängt. Sie ermöglicht u. a. die Beschreibung von Bohrungsgeometrien längs der Bohrachse, die beim Perkussionsbohren durch unterschiedliche Fokuslagen oder die Mitführung des Fokus während der Bearbeitung entstehen.

Schließlich führen Optimierungsergebnisse auf Basis der entwickelten Modellvorstellung zu einer Verkürzung der Prozesskette. Durch Aufteilung des Bearbeitungsprozesses in Schruppen und Schlichten kann die Qualität der gefertigten Oberflächen gesteigert werden. Die Beobachtung von erstarrten Schmelzfilmen auf den Oberflächen hierbei motiviert zusätzlich zu der Erzeugung einer definierten Schmelzschicht. Der Einsatz kontinuierlicher Laserstrahlung, im Wechsel mit dem Schlichten angewendet, lässt so glatte oder glänzende Oberflächen in einer Aufspannung entstehen.



# Summary

The present work, laser finishing of metallic materials, is summarizing the individual processes of ablative micromachining of metals with laser pulses of ns duration. Thus, synergetic effects between these erosive processes are revealed, serving a description of both, the stationary ablation, i.e. the mechanisms of material removal, when laser pulses are applied in a static superposition, as well as the dynamic erosion, i.e. laser machining at a relative motion between incident laser beam and work piece. In addition, investigations on beam propagation find entrance in the considerations. Taking into account the intensity distribution in the beam is leading to the development of a conceptual model that for the first time considers not only ablation mechanisms but also optical parameters at once. On that basis a simulation of pulse superposition for two-dimensional laser processing is created, which allows a prediction of the machining results and a visualization of optimization efforts as well.

Results of own experimental studies and data from literature are used on the one hand to develop the conceptual model and on the other hand to demonstrate the accuracy of the predictions. Moreover, the results serve for identification and verification of predominating parameters on the ablation process. With percussion drilling, they confirm the mechanisms of stationary ablation, which is dominated mainly by melt expulsion and thus by pulse energy. Employing statistical design of experiment they point out with two-dimensional laser processing the mechanisms of stationary ablation continue to remain valid. The laser pulses can be seen as isolated events and the behaviour with dynamic ablation corresponds to one of a free surface.

However, for a complete description of the two-dimensional laser processing, also the radiation propagation and the resulting beam-material interaction are to be considered with respect to the overlapping

use of a multiplicity at laser pulses. This is leading to the consideration of the iso-intensity lines along the propagation direction of the laser radiation and to the definition of a limiting intensity, which depends on the ablation threshold, thus the thermo-physical properties of the material. Among other things, it allows the description of the resulting geometry along the drilling axis of holes produced by use of percussion drilling, even at different focal positions or overlaying a motion of the focus during processing.

Finally, optimization results lead on basis of the developed conceptual model to a shortening of the process chain. By dividing the process in rough and finish machining the quality of the manufactured surfaces can be increased. The observation of solidified melt films on these surfaces motivates additionally to the production of a defined melt layer. Hence, by applying continuous laser radiation in alteration with finish machining smooth or shiny surfaces are obtained in one setting.

# Vorwort

Die Realisierung des ersten Lasers durch Maiman im Jahre 1960 [STEEN, 1998] zog eine große Anzahl weiterer Entwicklungen im Bereich der Photonik mit Bedeutung für viele Branchen nach sich:

- In der Unterhaltungsindustrie
- für die Datentechnik
- in der Messtechnik
- und nicht zuletzt bei den Fertigungstechnologien

um nur einige zu nennen.

Die lasergestützte Materialbearbeitung ist eine der ältesten Disziplinen, die sich um den Einsatz von Laserstrahlung bemüht. Dies belegen die zahlreichen Quellenangaben in einer Arbeit von Afanas'ev und Krokhin aus dem Jahre 1967 [AFANAS'EV & KROKHIN, 1967] über die Verdampfung von Festkörpern unter Einwirkung von Laserstrahlung. Das Interesse lag zunächst auf dem statischen Einsatz der Strahlquellen. Hier werden weder das Bauteil noch der Laserstrahl bewegt, so dass Bohrungen unter der Einwirkung der Strahlung im Werkstück entstehen können. Wohl auch deshalb publizierten im Jahr 1987 Murphy sowie Treusch u. a. [MURPHY, 1987; TREUSCH ET AL., 1987] unabhängig voneinander je eine Einteilung zum Laserstrahlbohren. Die Autoren ordnen verschiedene Lasertypen entsprechend der Absorption ihrer Strahlung den Werkstoffen zu. Demzufolge liegt der überwiegende Einsatzbereich von CO<sub>2</sub>-Lasern auf der Bearbeitung dielektrischer Materialien und der Perforation von Papier, z. B. für die Zigarettenindustrie, sowie dem thermischen Abtrag von Kunststoffen. Für Metalle eignen sich Festkörperlaser wie z. B. die Nd:YAG-Laser. Sie erzielen beim Bohren

Perforationsraten von zunächst weniger als 10 Durchbrüchen pro Minute, später auch wenige 100 pro Sekunde [OLSEN & HECKERMANN, 1991].

Für den steigenden Einsatz der Lasertechnologie spielt die Entwicklung einer erweiterten Prozesstechnik eine entscheidende Rolle. Die Einführung einer Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil ermöglicht beispielsweise die Herstellung von Bohrungen, die einen weitaus größeren Durchmesser aufweisen können, als sich aus der reinen Strahl-Stoff-Wechselwirkung – und damit eng mit dem Strahlquerschnitt verknüpft – ergibt. Bei dem sog. Trepanieren wird das Material zunächst lokal durchdrungen und anschließend der gewünschte Durchmesser ausgeschnitten. Die hierzu eingesetzte kontinuierliche oder auch gepulste Laserstrahlung – mit Pulsen von 10  $\mu$ s bis 1 ms Dauer – legt diesem Mechanismus des Abtrags eine charakteristische Schmelzphase zu Grunde, die durch ein Prozessgas ausgeblasen wird.

Eine stetige Entwicklung der Lasertechnik im Allgemeinen und der Strahlquellen im Besonderen treibt so die Möglichkeiten zum Einsatz von Lasern in der Materialbearbeitung immer weiter voran. Heute sind Laserstrahlschneiden und -schweißen mit gepulst oder kontinuierlich emittierenden Hochleistungslasern gängige Verfahren der industriellen Praxis [MEIJER, 2004].

Die abtragende Lasermikromaterialbearbeitung mit kurz-gepulster Laserstrahlung, also mit Laserpulsen im Nanosekunden-Bereich, auf ihrem Weg zu ähnlicher Bedeutung voranzubringen, ist das Ziel dieser Arbeit. Hierzu werden die verschiedenen Prozesse als *Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe* beispielhaft dargestellt. Einerseits soll damit die Entwicklung einer prozessübergreifenden Beschreibung der Parameterabhängigkeiten und andererseits das Optimierungspotenzial bei einer derartigen Bearbeitung aufgezeigt werden. Als zusätzliche Maßnahme zur Verkürzung der Prozesskette ergänzen Untersuchungen zum Glätten mit Laserstrahlung diese Arbeit. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Bearbeitung in einer Aufspannung. Dadurch kann letztlich ein System aufgebaut werden, das den Anforderungen eines kombinierten Verfahrens, welches sich aus Laserstrahlabtragen und -glätten zusammensetzt, genügt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>19</b>
2.1	Grundlagen der abtragenden Lasermaterialbearbeitung .	19
2.1.1	Absorption . . . . .	19
2.1.2	Wärmeleitung . . . . .	21
2.1.3	Abtragen mit kurz-gepulster Laserstrahlung . . .	23
2.2	Technische Optik . . . . .	29
2.2.1	Telezentrische Strahlausbreitung . . . . .	29
2.2.2	Gaußsche Strahlung . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Ziele und Lösungsweg</b>	<b>39</b>
4.1	Ziele . . . . .	39
4.2	Lösungsweg . . . . .	40
4.3	Konkretisierung der Aufgabenstellung . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Experimentelles Vorgehen</b>	<b>45</b>
5.1	Ausstattung . . . . .	45
5.1.1	Positioniersysteme . . . . .	45
5.1.2	Strahlableitung . . . . .	48
5.1.3	Verwendete Strahlquellen . . . . .	54
5.2	Charakterisierung der Strahlform . . . . .	63
5.3	Analyseverfahren . . . . .	66
5.4	Untersuchte Werkstoffe . . . . .	70
5.5	Durchführung der Abtraguntersuchungen . . . . .	71
5.5.1	Sacklöcher und Durchbrüche . . . . .	73

5.5.2	Formabtrag . . . . .	78
5.5.3	Laserglätten . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Charakterisierung der Einzelprozesse</b>	<b>81</b>
6.1	Strahlausbreitung . . . . .	81
6.1.1	Experimentelle Strahleigenschaften . . . . .	81
6.1.2	Vergleich mit dem telezentrischen Modell . . . . .	87
6.1.3	Vergleich mit dem Gaußschen Modell . . . . .	90
6.1.4	Strahlformung . . . . .	93
6.1.5	Grenzen der Strahlformung . . . . .	98
6.2	Perkussionsbohren . . . . .	99
6.2.1	Einfluss der Pulsleistung . . . . .	99
6.2.2	Einfluss der Fokusalage . . . . .	101
6.3	Einführung der Iso-Intensitätslinien . . . . .	103
6.4	Beeinflussung der Bearbeitungszone . . . . .	109
6.5	Laserstrahlwendelbohren . . . . .	111
6.6	Flächiger Abtrag . . . . .	121
6.6.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	122
6.6.2	Parameterkorrelation . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Optimierungsstrategien</b>	<b>131</b>
7.1	Stationäres Abtragen . . . . .	131
7.1.1	Verringerung der Bearbeitungsdauer . . . . .	131
7.1.2	Debris – Redeposit . . . . .	138
7.1.3	Multilochebleche . . . . .	146
7.2	Abtragalgorithmen bei flächiger Bearbeitung . . . . .	149
7.2.1	Modellierung der Pulsüberlagerung . . . . .	150
7.2.2	Spiralförmiger Abtragweg . . . . .	155
7.2.3	Kreuzschraffur . . . . .	155
7.2.4	Mäander – Bit-Mapping . . . . .	158
7.2.5	Schruppen und Schichten . . . . .	160
7.3	Glätten mit Laserstrahlung . . . . .	163
<b>8</b>	<b>Bewertende Zusammenfassung</b>	<b>173</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>183</b>
<b>A</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>185</b>
<b>B</b>	<b>Berechnungen und Daten</b>	<b>207</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Eine Veröffentlichung der Firma LASAG über den Stand der Anwendungen mit gepulsten Nd:YAG-Lasern [HOLTZ & WESTPHÄLING, 2002] belegt, dass die Erhöhung der Strahlqualität durch optimierte Resonatoren und zweckmäßigere Strahlformungssysteme zu immer besseren Bearbeitungsergebnissen beim Einsatz von Strahlquellen mit Laserpulsen von  $\mu\text{s}$ - bis  $\text{ms}$ -Dauer führt. Dennoch bleibt der Mechanismus des Abtrags mit derartigen Lasersystemen über Schmelzeerzeugung und Ausblasen durch einen Prozessgasstrom erhalten. Ähnliche Ergebnisse, ebenfalls mit Prozessgasunterstützung, erzielt Dickmann bei der Herstellung kreisförmiger Durchbrüche in keramischen Substraten, z. B. an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [DICKMANN ET AL., 1991]. Die Verwendung güte-geschalteter Festkörperlaser oder anderer kurz-gepulster Strahlquellen mit Pulsdauern im Bereich von einigen ns bis wenigen 100 ns im nahen infraroten oder sichtbaren Spektrum ermöglicht bei fortschreitender Miniaturisierung deutliche Verbesserungen durch exzellente Strahlqualität, die hohe Pulsleistung und, damit verbunden, den durch eine Dampfphase unterstützten Abtragmechanismus [MAYERHOFER & WRBA, 2000]. Die wirtschaftliche Herstellung von Löchern, deren Durchmesser größer ist als der Strahldurchmesser, wird durch den Einsatz schneller Strahlableitungen mit dem so genannten Wendelbohren [DAUSINGER ET AL., 1999] erreicht. Dabei ist die Bearbeitung nicht auf kreisförmige Bohrungen beschränkt, wie bei [RADTKE ET AL., 2001], sondern kann auch für beliebige Formen angewendet werden [RAIBER, 1999]. Auf diese Weise hergestellte Durchbrüche zeichnen sich durch geringe Schmelze-

ablagerungen und damit durch eine hohe Qualität aus. Ebenso scheint die Reproduzierbarkeit beim Perkussionsabtrag, d. h. beim Bohren mit einer Folge ortsfest applizierter Laserpulse, deutlich erhöht. Neigetechniken für die Bauteile ermöglichen darüber hinaus die Fertigung von Schrägbohrungen oder Löchern mit vorgegebener Konizität.

Ebenfalls wird über die flächige Bearbeitung seit langem berichtet, z. B. weist Meiners bereits 1995 mit seiner Dissertation [MEINERS, 1995] auf Abtragraten  $A_R$  von bis zu einigen  $100 \text{ mm}^3/\text{min}$  beim Einsatz von  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung hin. Im Speziellen bestätigt er die Einführung von Schruppen und Schlichten als kombiniertem Prozess für den Abtrag mit ms-Pulsen aus Nd:YAG-Festkörperlasern. Jedoch genügt die erzielte Rauheit mit  $Ra > 1 \mu\text{m}$  nicht den Ansprüchen an ein Verfahren für die Strukturierung, etwa im Formenbau. Daher sind dort weiterhin Feinfräsen und Funkenerodieren die bevorzugten Fertigungsverfahren [BLEYS ET AL., 2006]. Auch das bereits 1990 vorgestellte Lasercaving [EBERT & SUTOR, 1990] konnte sich bisher nicht durchsetzen.

Der gezielte Einsatz von Prozessgas erlaubt das Ändern von Stoffeigenschaften, z. B. bei der Herstellung von Schichten oder Schichtsystemen durch das Lasernitrieren von Aluminium oder Eisenwerkstoffen [SCHAAF, 2002]. Im Hinblick auf die abtragende Lasermaterialbearbeitung führt es häufig zu negativen Eigenschaften, wie Rissanfälligkeit bei Abtragraten von  $35 \text{ mm}^3/\text{min}$  und einer Rauheit  $Rz > 10 \mu\text{m}$  [TÖNSHOFF & STÜRMER, 1991]. Und die Entwicklung des Laseroxidspanens bietet keine Alternative – obwohl kleinste Rauheiten von  $Ra \approx 0,3 \mu\text{m}$  erzielt werden können –, da sich diese Fertigungsmethode auf ausgewählte Stähle beschränkt [HANEMANN ET AL., 2000; SCHUBART, 1999].

Eine Reihe weiterer Arbeiten zum Formabtrag durch gepulste Laserstrahlung im nahen infraroten oder sichtbaren Spektralbereich entstanden erst gegen Ende des letzten Jahrtausends. Sie befassen sich mit der Bearbeitung von Keramiken und Hartmetall, z. B. für Prägwerkzeuge [GILLNER ET AL., 1997], dem Trimmen von Präzisionsschleifscheiben [LIU ET AL., 1999], dem Rapid Prototyping [PFLEGING, 1999] oder der Herstellung von Abformwerkzeugen [HEYL ET AL., 2001]. Dabei wurden bereits Anfang der 90er Jahre gute Ergebnisse beim Laserstrahlabtragen von Metallen erzielt. Insbesondere lag die erreichte Abtragrate an Stahl mit mehr als  $3.000 \text{ mm}^3/\text{min}$  über den Werten anderer Fertigungsverfahren. Auch die Rauheit der bearbeiteten Oberflächen wies durch die Nacharbeit mittels Laserglasieren, d. h. Umschmelzen einer Oberflächenschicht, entsprechend gute Werte auf. Allerdings zeigte sich,



dass das Glasieren nur eingeschränkt angewendet werden konnte, da hier ebenfalls je nach Werkstoff eine Neigung zur Rissbildung auftrat [TÖNSHOFF & STÜRMER, 1991]. Weitere Veröffentlichungen zur abtragenden Materialbearbeitung von Metallen mit Laserstrahlung beschränken sich neben Sonderverfahren, wie dem lasergestützten nasschemischen Ätzen [SEPOLD ET AL., 2002], auf das Beschriften und Markieren [BLEHER, 1999; RIZVI & APTE, 2002].

Dagegen sind Laserprozesse mit ultrakurzen Laserpulsen im sub-ps-Bereich seit einigen Jahren Gegenstand der Forschung. So wird über grundlegende Untersuchungen zum Abtrag von Keramik [RAIBER, 1999], Dielektrika [ASHKENASI & ROSENFELD, 1999; ZHAO ET AL., 2001], Glas und Polymer [WELLEGEHAUSEN & CHICHKOV, 1999; ZHANG ET AL., 2002], aber auch von Metallen [IHLEMANN ET AL., 1999], berichtet. Neuere Veröffentlichungen befassen sich zunehmend mit der Effizienzsteigerung [CAMPBELL ET AL., 2007; WU & SHIN, 2009] beim Einsatz derartiger Lasersysteme für die Materialbearbeitung.

Auch industrielle Lösungen zum Abtragen mit gepulster Laserstrahlung werden bereits seit einiger Zeit angeboten, z.B. durch die Fa. Lasertech [SIEBER, 2003], wenn auch die Abtragraten, beispielsweise für ein System mit ns-Pulsen mit  $6 \text{ mm}^3/\text{min}$ , nur für eine kleinflächige Bearbeitung genügen. Die dabei beobachtete Rauheit ist mit  $Ra \approx 1 \mu\text{m}$  sehr hoch, so dass, wie auch bei [GILLNER, 1999], noch eine Nacharbeit durch Schleifen oder Polieren notwendig ist. Dies ist auch als Motivation für das stetige Wiederaufleben vergleichender Untersuchungen zum Einfluss der Wellenlänge bei der Präzisionsbearbeitung von Metallen [TUNNA ET AL., 2001] oder zur Demonstration der Unterschiede beim Abtragen mit Nano-, Piko- und Femtosekunden Laserpulsen [JANDELEIT ET AL., 1998; SEMEROK ET AL., 1999; YOUN ET AL., 2007] zu sehen. Die vorliegende Arbeit reiht sich in diese Untersuchungen ein, allerdings wurde hier ein prozesstechnischer Ansatz gewählt.

Bewährte und experimentelle Strahlquellen sowie Prozesstechnik für den industriellen Einsatz kommen auf den Prüfstand. Den Schwerpunkt bildet jedoch die ganzheitliche Betrachtung der verschiedenen Einzelprozesse der Metallbearbeitung mit ns-Laserpulsen, so dass synergetische Effekte herausgearbeitet werden können. Damit soll die unbefriedigende Fertigungsqualität von Bauteilen systematisch erhöht und die Prozesskette zur Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe durch die Kombination verschiedener Verfahrensansätze verkürzt werden.



# Kapitel 2

## Stand der Technik

### 2.1 Grundlagen der abtragenden Lasermaterialbearbeitung

*Die Zielsetzung dieser Arbeit erfordert für ein besseres Prozessverständnis die Betrachtung theoretischer Aspekte, welche für die abtragende Lasermaterialbearbeitung grundlegend sind. Daher werden in Folgenden Absorption, Wärmeleitung und Abtragemechanismen bei Verwendung kurzgepulster Laserstrahlung beleuchtet.*

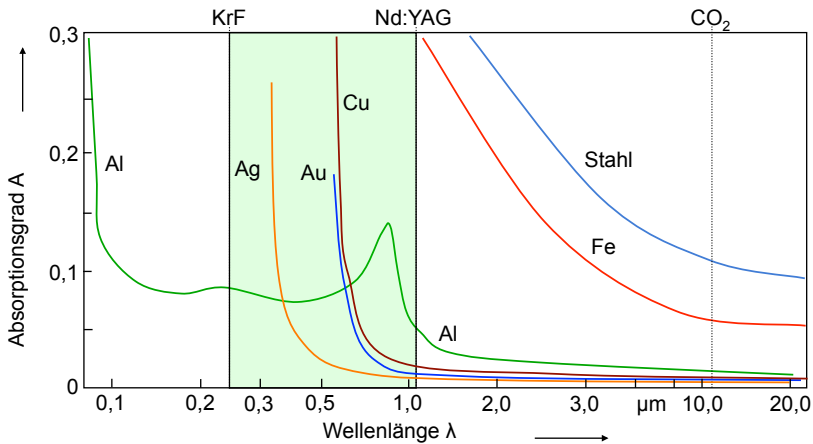
#### 2.1.1 Absorption

Die Bearbeitung eines Werkstoffs mit Laserstrahlung hängt entscheidend von der Einkopplung der Strahlleistung ab. Dabei sinkt die Intensität der in den Werkstoff eingetretenen Strahlung gemäß dem Lambert-Beerschen Gesetz exponentiell:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu s} \quad (2.1)$$

mit  $I$ : Intensität;  $I_0$ : Intensität beim Eintritt in das absorbierende Medium;  $\mu$ : linearer Absorptionskoeffizient;  $s$ : im Werkstück zurückgelegte Strecke

Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischer Welle und Materie sind die Ursache für diese Abnahme. Absorbieren Metalle Laserstrahlung, so wird das gesamte Elektronengas zu Schwingungen angeregt, da nur



**Abbildung 2.1:** Absorptionskurven verschiedener Metalle als Funktion der Wellenlänge bei Raumtemperatur [Quelle: Dr. Otto, Uni Erlangen]

die Elektronen in der Lage sind, den elektromagnetischen Feldern der einfallenden Strahlung zu folgen. Durch die Ladungsverschiebung der Elektronen schwingen die positiv geladenen Atomrümpfe, die Kerne, nach. Bei Laserpulsen im fs- und ps-Bereich sind aufgrund der geringen Wechselwirkungszeiten zwei Temperaturen, die der Elektronen und die des Kristalls, zu betrachten. Im Falle von ns-Pulsen befinden sich Gitter und Elektronen jedoch im thermischen Gleichgewicht, da die Elektronen durch direkte Wechselwirkung mit dem Gitter, z. B. durch Stöße, ihre Energie während des Laserpulses abgeben [KÖRNER ET AL., 1996]. Dieser Energieübergang bewirkt schließlich eine makroskopische Erhöhung der Temperatur des Werkstoffs.

Aber nicht die gesamte Energie der zur Verfügung gestellten Laserstrahlung wird im Werkstoff in Wärme umgewandelt. Neben der Absorption kommt es beim Auftreffen der elektromagnetischen Welle auf die Materie auch zu Reflexion und Transmission. Unter Berücksichtigung der Energieerhaltung summieren sich die Anteile zu 1:

$$1 = A + R + T \quad (2.2)$$

mit  $A$ : Absorptionsgrad,  $R$ : Reflexionsgrad und  $T$ : Transmissionsgrad

Aufgrund der geringen Eindringtiefe der Strahlung in Metalle kann bei technischen Werkstücken der Transmissionsgrad mit Null angesetzt und der Absorptionsgrad direkt aus dem Reflexionsgrad ermittelt werden:

$$A = 1 - R \quad (2.3)$$

Messungen der Absorption bei Raumtemperatur und variiertes Wellenlänge ergeben für verschiedene Werkstoffe charakteristische Kurven [HUMMEL, 1971]. Bild 2.1 zeigt derartige Graphen für ausgewählte Metalle sowie die Emissionslinien typischer Strahlquellen der Lasermaterialbearbeitung. Augenscheinlich eignet sich Laserstrahlung kürzerer Wellenlänge aufgrund des höheren Absorptionsgrades besser für die Materialbearbeitung.

Deckschichten, z. B. Oxide, bewirken jedoch eine Erhöhung der Absorption. Ebenso beeinflusst die Topographie das Einkoppelverhalten. Ihre Auswirkung ist gering, wenn die Struktur der Oberfläche klein gegenüber der Wellenlänge der eingesetzten Laserstrahlung ist. Liegt die Rauheit der belichteten Oberfläche in der Größenordnung der Wellenlänge, tritt Beugung auf. Überschreitet der Wert der Rauheit die Wellenlänge, so kann es zu Mehrfachreflexionen kommen. Dann erfährt der Absorptionsgrad eine deutliche Steigerung, da der Laserstrahl mehrfach absorbiert werden kann [HERZIGER ET AL., 1993]. Die weite Verbreitung von CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Systemen in der Lasermaterialbearbeitung im Vergleich zu Strahlquellen, die Laserstrahlung kürzerer Wellenlänge emittieren, ist aber eher auf die höhere Strahlqualität und die größere verfügbare Leistung zurückzuführen. Darüber hinaus gelten die dargestellten Absorptionskurven nur bei Raumtemperatur. Mit Erhöhung der Temperatur des Materials, z. B. durch Umsetzung von Laserenergie, ändert sich dessen Absorptionsverhalten drastisch, so dass auch Laserstrahlung mit größerer Wellenlänge effizient in den Werkstoff einkoppelt.

## 2.1.2 Wärmeleitung

nach [HOFFMANN & POPRAWE, 2000]

Außer der Absorption ist die Wärmeleitung für die Ausbildung eines Temperaturfeldes im Werkstoff und damit für das Schmelzen und Verdampfen von Bedeutung. Zur Berechnung dieses Temperaturfeldes

kann die Energietransportgleichung verwendet werden:

$$\frac{\partial (\varrho \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} = q_L - \vec{\nabla} (\varrho \cdot c_p \cdot T \cdot \vec{v}) - \vec{\nabla} \vec{q} \quad (2.4)$$

mit  $\varrho$ : Dichte;  $c_p$ : spezifische Wärmekapazität;  $T$ : Temperatur;  $q_L$ : eingekoppelte Energie einer Wärmequelle;  $\vec{q}$ : Wärmeleitungsstrom;  $\vec{v}$ : Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück

Diese Gleichung beschreibt die zeitliche Änderung der inneren Energie als Summe aus der eingekoppelten Energie, der räumlichen Änderungen des konvektiven Wärmestroms und des Wärmeleitungsstroms.

Unter Anwendung des Fourier-Ansatzes für den Wärmeleitungsstrom:

$$\vec{q} = -\vec{\nabla} (\lambda_W \cdot T) \quad (2.5)$$

mit  $\lambda_W$ : Wärmeleitfähigkeit

ergibt sich die Energietransportgleichung zu:

$$\frac{\partial (\varrho \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} = q_L - \vec{\nabla} (\varrho \cdot c_p \cdot T \cdot \vec{v}) + \vec{\nabla} (\lambda_W \cdot T) \quad (2.6)$$

Durch eine eindimensionale Betrachtung kann diese Gleichung vereinfacht werden. Hierzu sind allerdings einige Annahmen zu treffen:

- Der Laserstrahl wird nur in sehr dünnen oberflächennahen Schichten absorbiert, d. h. es existieren keine Wärmequellen im Material:  $\implies q_L = 0$
- Der Strahlradius auf der Werkstoffoberfläche ist sehr viel größer als die Eindringtiefe; damit wird die Wärme eindimensional in das Werkstück eingeleitet
- Zwischen Laserstrahl und Werkstoff existiert keine oder eine nur sehr geringe Relativbewegung:  $\implies v = 0$
- Die physikalischen Eigenschaften sind konstant

Damit erhält man die eindimensionale, instationäre Wärmeleitungsgleichung mit konstanten Stoffwerten:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_W}{\varrho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

Als Lösung der Differentialgleichung geben Hoffmann und Poprawe an:

$$T = \frac{q_L}{\lambda_W} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_W \cdot t}{\varrho \cdot c_p}} \cdot \operatorname{ierfc} \left( \sqrt{\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_W \cdot t}{\varrho \cdot c_p}}}} \right) + T_0 \quad (2.8)$$

mit  $T$ : Temperatur;  $q_L$ : vom Werkstoff absorbierte Energie;  $\lambda_W$ : Wärmeleitfähigkeit;  $t$ : Einwirkzeit;  $\varrho$ : Dichte;  $c_p$ : spezifische Wärmekapazität;  $z$ : Abstand;  $T_0$ : Ausgangstemperatur

Aus dieser Gleichung lässt sich das Temperaturfeld im Inneren eines Werkstoffs berechnen.

### 2.1.3 Abtragen mit kurz-gepulster Laserstrahlung

Die Arbeiten zum Abtragen mit kurz-gepulster Laserstrahlung beschränken sich weitestgehend auf die Beschreibung der Beobachtungen bei der Herstellung von kreisförmigen Durchbrüchen, dem Laserstrahlbohren, in verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Strahlparametern, wie Wellenlänge [TUNNA ET AL., 2001] oder Pulsdauer [SEMEROK ET AL., 1999]. Zum flächigen Abtrag, auch als Strukturieren bezeichnet, liegen nur wenige Arbeiten vor, z. B. [GILLNER, 1999] oder [COMPALA, 1999]. Im Weiteren ist man hier überwiegend auf Berichte aus der Industrie angewiesen [SIEBER, 2003; MEIJER, 2004]. Diese Arbeiten geben aber nur eine allgemeine Beschreibung der Prozesse an, ohne die Wirkmechanismen näher zu beleuchten.

Den stationären Abtrag mit gepulster Laserstrahlung, d. h. das Perkussionslaserstrahlbohren (kurz: Perkussionsbohren), teilen [KÖRNER ET AL., 1996] in vier verschiedene Mechanismen ein. Wie in Bild 2.2 dargestellt, unterscheiden sie dabei nicht nach dem Zeitregime der Wechselwirkung, sondern setzen jeweils die geeignete Pulsdauer voraus.

Spröde Materialien (Typ A) neigen, insbesondere wenn sie die Strahlung nur schwach absorbieren, zu einem mechanisch dominierten Abtragmechanismus: Kompakte Teile des Werkstoffs werden aus dem Verbund heraus gesprengt, wodurch häufig Risse entlang der Korngrenzen entstehen. Der Einsatz geringer Leistungsdichte (Typ B) führt stets zu einem unregelmäßigen Abtrag, der sowohl von Differenzen im Absorptionsverhalten der Oberfläche des bestrahlten Werkstoffs, z. B. durch

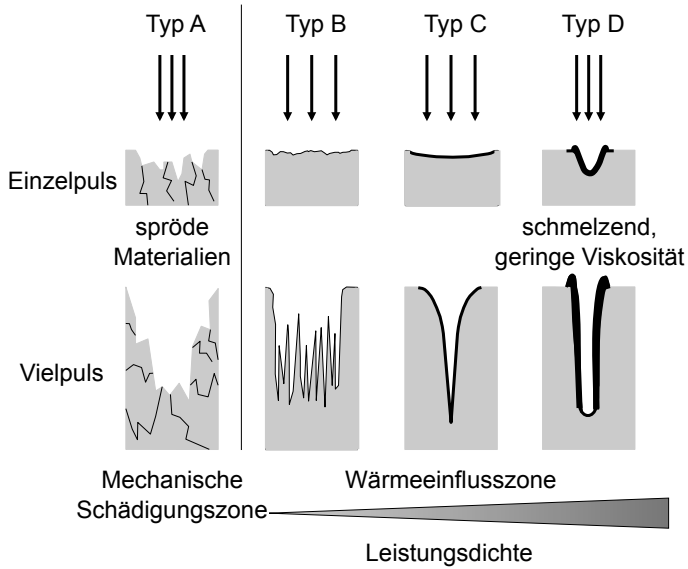


Abbildung 2.2: Einteilung der stationären Abtragmechanismen

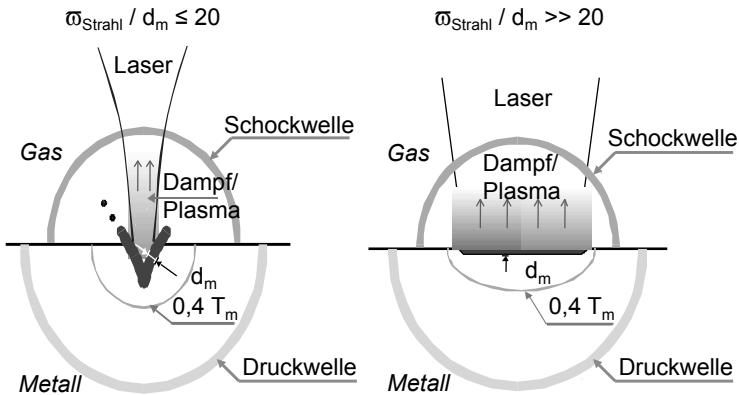
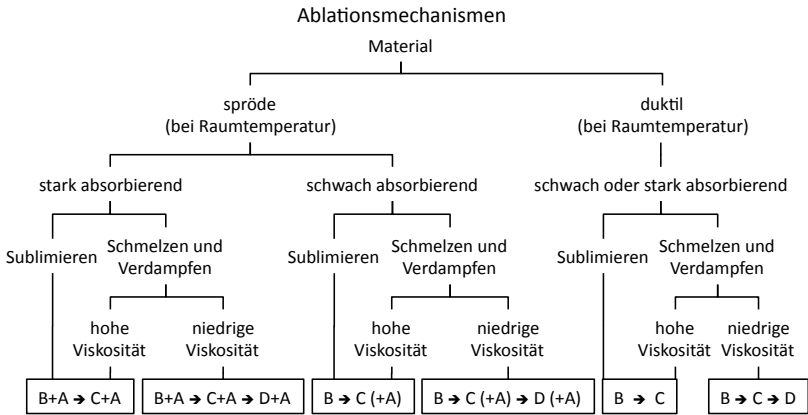


Abbildung 2.3: Tiefenwirkung der Laserstrahlung





**Abbildung 2.4:** Werkstoffeinfluss beim stationären Abtrag [KÖRNER ET AL., 1996]

Adsorbate, wie auch von inhomogener Intensitätsverteilung der Laserstrahlung herrührt. Mit steigender Leistungsdichte nimmt der Anteil an Schmelze zu. Der Abtrag läuft jedoch nur über die Dampfphase ab. Die abgetragene Zone spiegelt die mittlere Intensität wider (Typ C). Der Abtrag sublimierender Werkstoffe kann ebenfalls mit diesem Mechanismus beschrieben werden. Allerdings entfällt die Entstehung einer flüssigen Phase. Bei hohen Leistungsdichten (Typ D) überwiegt schließlich der Materialverlust aufgrund von Schmelzeaustrieb.

Der überhitzte Dampf reißt beim Entspannen Schmelzetropfchen mit sich und erhöht dadurch die Prozesseffizienz, z. B. bei einer Betrachtung des abgetragenen Volumens pro Puls. Hierzu erklärt Mayerhofer [MAYERHOFER, 1997]: Ist der Quotient aus dem Radius des Laserstrahls und der Dicke der entstehenden Schmelzschicht deutlich größer als 20, so hat die Strahlung kaum Tiefenwirkung. Liegt der Quotient um 20 oder darunter, kommt es zu einer Änderung im Wärmeleitungsverhalten und die einfallende Laserstrahlung bewirkt einen gerichteten Energieeintrag, vgl. Bild 2.3, der zu einem von Schmelzeaustrieb dominierten Abtrag führt. Dieser Mechanismus der Ablation, d. h. des Materialverlustes durch Schmelzen und Verdampfen des Werkstoffs – in Anlehnung an die Gletscherkunde: Ablation ist der Masseverlust eines Gletschers durch Dampf und Schmelze –, tritt je nach Werkstoffeigenschaften und

applizierter Leistungsdichte in unterschiedlicher Ausprägung auf, wie Bild 2.4 zeigt.

Grundlegende Aussagen zur Präzisionsbearbeitung von Blechen mit kurz-gepulster Laserstrahlung liegen von Nikonchuk aus dem Anfang der 90er Jahre vor [NIKONCHUK, 1991]. Er beschreibt in seiner Arbeit die Wechselwirkung von Laserpulsen eines KupferdampfLasers hoher Strahlqualität, d. h. nahezu Gauß-förmiges Strahlprofil, mit einer Pulsdauer von ca. 20 ns beim Feinschneiden von Metall. Seine Beobachtungen an Aluminium-Dünnschichten und Aluminiumfolien führen ihn zur Unterteilung des Abtrags in zwei Kategorien: Ist die Schnittbreite größer als die Schichtdicke, so entspricht der Mechanismus dem Abtrag an einer freien Oberfläche; im umgekehrten Fall muss die Kondensation des Materials an den Schnittwänden beim Abtragen ebenfalls berücksichtigt werden [NIKONCHUK & POLYAKOV, 1992]. Daraus ergeben sich Auswirkungen auf die Effizienz  $\eta$  (Gleichung 2.9) des Abtragsvorgangs.

$$\eta = m_V \cdot H_V / E_B \quad (2.9)$$

mit  $m_V$ : abgetragene Masse;  $H_V$ : Verdampfungsenthalpie;  $E_B$ : Energieeintrag während der Bearbeitung

Einen konkreteren Versuch einer formelhaften Darstellung des stationären Abtrags unternahmen Jandeleit u. a. Sie berechneten den erzielbaren Bohrungsdurchmesser  $d$  unter der Annahme eines Gauß-förmigen Strahlprofils und einer eindimensionalen Wärmeleitung sowie unter Einsatz einer Oberflächenquelle (Gleichung 2.10) [JANDELEIT ET AL., 1996]:

$$d = \frac{d_f}{2} \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot A \cdot L_D \cdot \sqrt{t_P}}{T_V \cdot \varrho \cdot c \cdot \sqrt{\pi \cdot \kappa}} \right)} \quad (2.10)$$

mit  $d_f$ : Strahlweite im Fokus;  $A$ : Absorptionsgrad;  $L_D$ : Leistungsdichte;  $t_P$ : Pulsdauer;  $T_V$ : Verdampfungstemperatur;  $\varrho$ : Dichte;  $c$ : spezifische Wärme und  $\kappa$ : Temperaturleitfähigkeit

Jedoch merken die Autoren an, dass für Pulse mit ps-Dauer und einer Leistungsdichte unterhalb von  $L_D = 10^{12} \text{ W/cm}^2$  die experimentellen Lochdurchmesser kleiner sind als die theoretisch berechneten. Liegt die Leistungsdichte darüber, so übersteigen die gemessenen Durchmesser die nach der Theorie erwarteten Werte. Als Erklärung führen sie zum Einen die Absorption der gesamten Energie im Lochgrund an, weshalb keiner

der erwarteten Durchmesser erreicht wird, während sie zum Anderen die Ursache in einem Plasma nahe der Oberfläche sehen, wodurch die Energie homogen über die Plasmaoberfläche sowohl im Lochgrund als auch an der Lochwand einkoppelt. Aufgrund der ungenauen Ergebnisvorhersagen dieses Modells findet sich allerdings keine bekannte Anwendung der Formel.

Auch für das Verhalten bei unterschiedlichen Wellenlängen findet sich bei [JANDELEIT ET AL., 1996] eine Erklärung, wie die Ergebnisse zur Effizienz beim Einzelpulsabtrag von Silizium mit ps-Laserpulsen zeigen: Unter sonst gleichen Bedingungen liegt die Prozesseffizienz beim Abtragen mit kurzer Wellenlänge höher als bei Verwendung längerer Wellenlängen. Sie führen diese Beobachtungen auf die unterschiedliche optische Eindringtiefe der energetisch verschiedenen Photonen in das Material zurück. Die Photonen kürzerer Wellenlänge geben daher ihre Energie in einem kleineren Volumenelement des Werkstoffs ab.

Die Arbeit von Mayerhofer [MAYERHOFER, 1997] berücksichtigt ebenso keinen flächigen Abtrag, sondern erweitert die bekannten statischen Modelle durch die Einführung der Härte um einen Aspekt der Werkstoffkunde. Er ermittelt für die erreichbare Tiefe im Einzelpulsabtrag einen Sättigungsabtrag  $s_{max}$ , der von der Härte und dem Schmelzpunkt des Werkstoffs abhängt:

$$s_{max}/\mu\text{m} = 16.000 \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{Härte}_{HV} \cdot T_S/\text{K}}} \quad (2.11)$$

mit  $T_S$ : Schmelztemperatur

Darüber hinaus entwickelt er in seiner Arbeit eine exponentielle Abhängigkeit der Bohrlochtiefe  $s_N$  von der Pulszahl  $N$ , Gleichung 2.12, wobei Anpassungsparameter, die Abtragtiefe  $a$  des ersten Pulses und der Exponent  $n$ , den Einfluss des Werkstoffs widerspiegeln.

$$s_N = f(N) = a \cdot N^n \quad (2.12)$$

Weiterhin erkennt er, dass die Wärmeleitfähigkeit bei hohen Pulsfolgenfrequenzen und der Umgebungsdruck bei niedrigen Pulsfolgenfrequenzen einen Einfluss auf die Bohrgeschwindigkeit besitzen. Insbesondere bei schlechter Wärmeleitfähigkeit entsteht im Bohrgrund mehr Schmelze als durch den entweichenden Metaldampf mitgerissen werden kann. Im Vakuum entweicht der Metaldampf, quasi ungebremst durch die

Gasmoleküle der Luft, so schnell aus dem Bohrloch, dass er ebenfalls weniger Schmelze austreibt.

Mit dem Abschlussbericht PROMPT [GILLNER, 1999] wird eine der wenigen Arbeiten veröffentlicht, die neben den heute erzielbaren hohen Pulsfolgefrequenzen moderner Nd:YAG-Laser auch die notwendige Strahlführung einsetzt, um die verfügbaren Repetitionsraten auch im Prozess zu verwenden – ein wesentlicher Bestandteil der Laserendbearbeitung. Dennoch verzichten die Autoren darauf, eine Modellbildung zum Thema zu betreiben, und beschränken sich auf die Wiedergabe ihrer Beobachtungen. Auch im Abschlussbericht zum EU-Projekt COMPALA [COMPALA, 1999] findet sich nur die Präsentation der sehr ansprechenden Ergebnisse mit sub- $\mu\text{m}$ -Strukturen, ohne auf ein entsprechendes Modell hinzuweisen. Dies liegt an der sehr industriell ausgerichteten Fragestellung, die jeweils die Entwicklung eines geeigneten Abtragprozesses zum Ziel hatte und nicht eine wissenschaftliche Erklärung der prozessualen Hintergründe. Ähnliches gilt auch für spätere Arbeiten, z. B. von [KALDOS ET AL., 2004] oder [CAMPANELLI ET AL., 2007], die beispielsweise auf einen Zusammenhang zwischen der Rauheit der bearbeiteten Oberfläche und dem Überlappungsgrad aufeinanderfolgender Laserpulse hinweisen, jedoch keine Modellierung durchführen. Selbst in zusammenfassenden Arbeiten zum Thema „Laser Beam Machining“ im Allgemeinen, wie der von Dubey und Yadava [DUBEY & YADAVA, 2008] oder mit dem Schwerpunkt auf der Laserbearbeitung einer Werkstoffgruppe, z. B. von Keramik durch Samant und Dahotre [SAMANT & DAHOTRE, 2009] wird die fehlende Beachtung übergreifender Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einzelprozessen der Lasermaterialbearbeitung nicht erkannt.

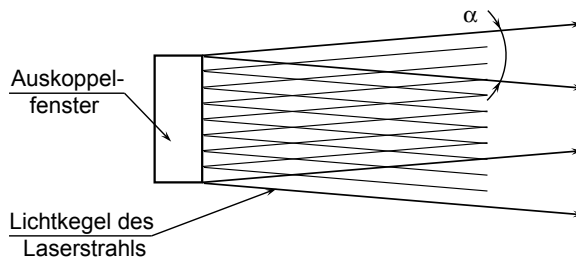
Die Erweiterung des Modells vom stationären Abtrag zur flächigen Bearbeitung mit kurz-gepulster Laserstrahlung hat bisher noch nicht stattgefunden. Zusätzlich fehlen in den vorhandenen Modellen auch Überlegungen, die räumliche Strahlausbreitung zu berücksichtigen. Einen Versuch, die Effizienz der Energieeinkopplung bei der Materialbearbeitung mit kurz-gepulster Laserstrahlung zu bestimmen, unternahmen Shannon und Li [SHANNON, 1998; LI & SHANNON, 1999]. Ihnen gelang es, den Betrag der Energieeinkopplung mit der Form der entstehenden Kavitäten zu korrelieren und ermittelten für einen fokussierten Strahl mit typischer Kaustik die maximale Energieeinkopplung im Werkstoff bei konischer Form der Kavität. Auf weitere Untersuchungen mit modifizierter Strahlform verzichteten sie jedoch.

## 2.2 Technische Optik

Bislang konnten sich, trotz verschiedener Bemühungen um Zusammenarbeit, die Fachleute der technischen Optik nur unzureichend im Lager der Lasermikromaterialbearbeiter durchsetzen [HENNING, 2003]. Dies äußert sich hauptsächlich bei der Modellbildung zur Erklärung der Abtragphänomene, die in der Regel ohne weitere Berücksichtigung der Strahlform erstellt wurden. Dabei kann mit der konsequenten Anwendung des je nach Strahlquelle geeigneten Ansatzes zur Beschreibung der Strahlausbreitung ein erhebliches Optimierungspotenzial bei der lasergestützten Mikromaterialbearbeitung frei gesetzt werden. Insbesondere sollte die Korrelation von räumlicher Strahlausbreitung mit dem Bearbeitungsergebnis eine Anpassung der Energieverteilung im Werkstück an die Bearbeitungsaufgabe ermöglichen.

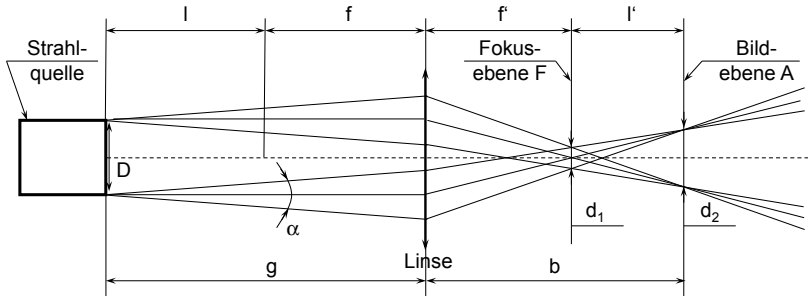
### 2.2.1 Telezentrische Strahlausbreitung

nach [SCHRÖDER, 1990]



**Abbildung 2.5:** Telezentrische Strahlausbreitung

Im telezentrischen Ansatz geht von jedem Punkt eines optischen Elements ein Lichtkegel mit dem Divergenzwinkel  $\alpha$  aus; siehe Bild 2.5. Durch die Überlagerung der einzelnen Lichtkegel ergibt sich letztlich der Laserstrahl mit der gleichen Divergenz  $\alpha$ . Aus diesem Grundsatz folgt die Bedingung für die Anwendung der telezentrischen Optik: Die Intensitätsverteilung und damit die Ausleuchtung eines jeglichen optischen Elements im Strahlengang muss homogen sein. In diesem Fall gelten die Gesetze der paraxialen Optik und, da der Divergenzwinkel einer solchen



**Abbildung 2.6:** Fokussierung und Abbildung im telezentrischen Modell

Laserstrahlung im Allgemeinen klein ist, kann eine Fokussierung oder Abbildung, wie in Bild 2.6 dargestellt, geometrisch konstruiert werden.

Offensichtlich besitzt ein optisches System im telezentrischen Ansatz zwei bedeutende Ebenen:

- die Fokusebene  $F$  und
- die Bildebene  $A$

Die Strahlweite  $d_1$  in der Fokusebene ergibt sich aus den Gesetzen der geometrischen Optik zu

$$d_1 = \alpha \cdot f \quad (2.13)$$

mit  $\alpha$ : Divergenzwinkel;  $f$ : Brennweite

Ist das optische System für Abbildung ausgelegt, so gilt die Abbildungsgleichung,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (2.14)$$

mit  $f$ : Brennweite;  $g$ : Gegenstandsweite;  $b$ : Bildweite

und für die Vergrößerung  $V$  des Systems folgt

$$V = \frac{l}{f'} = \frac{f}{l'} = \frac{d_2}{D} \quad (2.15)$$

mit  $l$ : Abstand des Objekts vom objektseitigen Fokus;  $l'$ : Abstand der Abbildung vom bildseitigen Fokus;  $f$  bzw.  $f'$ : objekt- bzw. bildseitige Brennweite;  $d_2$ : Höhe der Abbildung;  $D$ : Höhe des Objekts

Damit steht ein leicht zu handhabendes Modell der technischen Optik zur Verfügung. Außerdem kann aus dem telezentrischen Modell eine für die Mikromaterialbearbeitung interessante Strahlformung abgeleitet werden: Eine Herausforderung für die lasergestützte Mikromaterialbearbeitung ist die Herstellung von zylindrischen Bohrungen oder ausgedehnten Strukturen mit einem Flankenwinkel von  $90^\circ$ . Üblicherweise bewirkt die Strahlkaustik eine gewisse Konizität der Löcher oder einen Flankenwinkel  $> 90^\circ$  bei flächigem Abtrag. Mit Hilfe des telezentrischen Modells gelingt jedoch die Herleitung eines langgestreckten Bereichs, in dem der Strahlquerschnitt minimal und die Intensitätsverteilung homogen ist. Die Strahlung verläuft sozusagen wie in einem Rohr.

**Herleitung des Photonrohrs** Wird eine homogen ausgeleuchtete Blende  $D$  mit Hilfe einer Linse  $D'$  abgebildet, kann unter Beachtung der paraxialen Strahlen ein sog. Photonrohr konstruiert werden. Eine definierte Anordnung der optischen Komponenten, wie in Bild 2.7 dargestellt, ergibt die gesuchte Strahlausbreitung mit einem zylindrischen Bereich zwischen der Fokusebene  $F$  und der Abbildungsebene  $A$ .

Zusammen mit der Abbildungsgleichung (Gleichung 2.14) können die Größen zur Beschreibung des Photonrohrs abgeleitet werden: Für den Durchmesser  $d'$  ergibt sich

$$d_1 = d_2 = d' = \alpha \cdot f \quad (2.16)$$

und für die Länge  $l'$

$$l' = \alpha \cdot f^2/D \quad (2.17)$$

mit  $D$ : Durchmesser der Blende;  $f$ : Brennweite der Linse;  $\alpha$ : Divergenzwinkel [TURIGIN, 1966]

Der schraffierte Bereich in Bild 2.7 stellt eine mögliche Zone der Wechselwirkung dar: Das optische Feld, in dem die Leistungsdichte über der Abtragschwelle liegt. Die Variation des Blendendurchmessers  $D'$ , z. B. durch eine Irisblende, des Divergenzwinkels  $\alpha$ , beispielsweise durch ein Teleskop, und der Brennweite  $f$  – hier könnte ein Zoom-Objektiv eingesetzt werden – erlaubt aktiv auf die Form des optischen Feldes Einfluss zu nehmen. Durch Überlagerung verschieden gestalteter Strahlformen während der Bearbeitung könnte so eine Bohrung mit unterschiedlichen Innendurchmessern hergestellt werden.

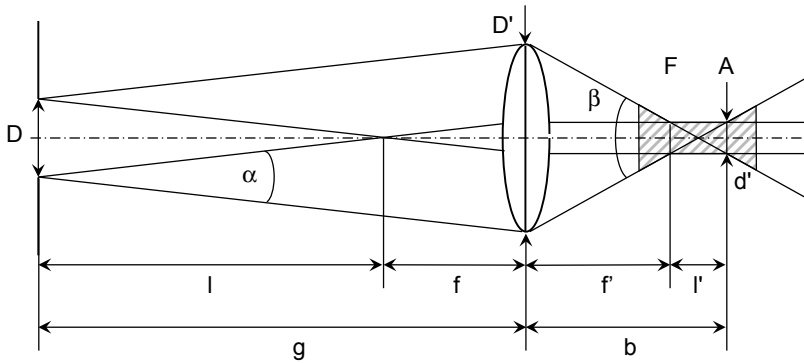


Abbildung 2.7: Formung eines Photonenrohrs

Allerdings zeigt sich bei den späteren Untersuchungen zur Strahlcharakterisierung und -formung, dass das telezentrische Modell nur unter sehr eng gefassten Randbedingungen sinnvoll einzusetzen ist. Für eine allgemeine Betrachtung muss ein anderer Ansatz gewählt werden.

### 2.2.2 Gaußsche Strahlung

nach [HECHT & ZAJAC, 1977]

Eine Strahlung mit transversaler Gauß-förmiger Intensitätsverteilung im kleinsten Querschnitt reproduziert diese Verteilung entlang der Ausbreitungsrichtung mit sinkenden Intensitäten.

Zur vollständigen Beschreibung eines Gaußschen Strahls in jeglicher Raumrichtung werden vier Größen benötigt; vergleiche Bild 2.8.

Die **Strahlweite**  $\omega(Z)$

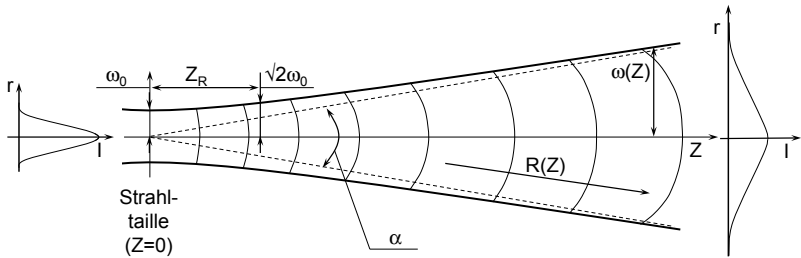
$$(\omega(Z))^2 = \omega_0^2 \cdot \left(1 + (Z/Z_R)^2\right) \quad (2.18)$$

mit  $\omega_0 = \sqrt{L \cdot \lambda / \pi}$ : **Strahltaille**;  $Z$ : Abstand zur Strahltaille in Ausbreitungsrichtung

Die **Rayleighlänge**  $Z_R$  – das ist der Abstand zur Strahltaille, in dem der Strahlradius um den Faktor  $\sqrt{2}$  anwächst

$$Z_R = \omega_0^2 \cdot \pi / \lambda \quad (2.19)$$





**Abbildung 2.8:** Gaußsche Strahlausbreitung

Der **Kurvenradius der Wellenfront**  $R(Z)$

$$R(Z) = Z \cdot \left(1 + (Z_R/Z)^2\right) \tag{2.20}$$

Wie der Darstellung in Bild 2.8 zu entnehmen ist, weist ein Gaußförmiger Strahl keine Divergenz im Sinne der telezentrischen Optik auf, sondern erweitert sich in der Nähe der Strahltaille hyperbolisch. Erst im Fernfeld, d. h. in einem Abstand zur Strahltaille, der etwa der zehnfachen Rayleighlänge entspricht, kann die Asymptote an den Ausbreitungskegel – gestrichelte Linie in Bild 2.8 – als „Divergenzwinkel“  $\alpha$  definiert werden:

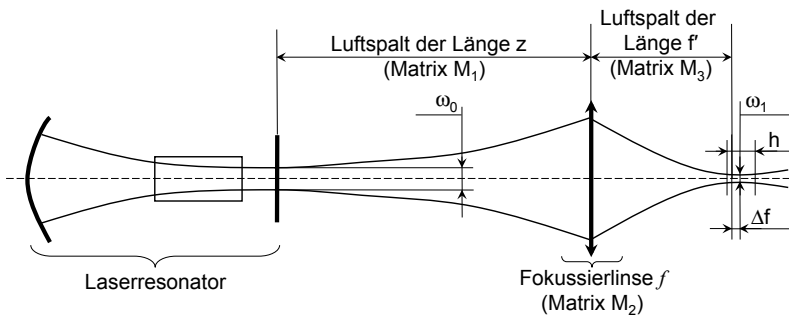
$$\alpha = \omega_0 \cdot \lambda/\pi \tag{2.21}$$

Die Charakterisierung der Strahlausbreitung in einem optischen System gelingt nun nicht mehr durch Anwendung einfacher Gleichungen, wie beim telezentrischen Ansatz, vielmehr wird jedes Element durch eine sog. *ABCD*-Matrix – siehe Tabelle 2.1 – repräsentiert.

Für ein einfaches optisches System mit nur einer Fokussierlinse ergibt sich eine Systemmatrix, die durch Multiplikation der drei Einzelmatrixen generiert werden kann. Bild 2.9 verdeutlicht hierzu den Geltungsbereich der einzelnen Matrizen. Als Lösung für die Systemmatrix folgt bei semi-konfokalem Resonator

**Tabelle 2.1:** *ABCD*-Matrizen optischer Elemente

Optisches Element	<i>ABCD</i> -Matrix
Strahlausbreitung durch ein Medium mit dem Brechungsindex $n$ und der Länge $Z$	$\begin{bmatrix} 1 & \frac{Z}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Strahlausbreitung durch eine dünne Linse mit der Brennweite $f$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$

**Abbildung 2.9:** Fokussierendes System Gaußscher Strahlung

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1) = \begin{bmatrix} 1 & f' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{f'}{f} & \left(1 - \frac{f'}{f}\right)z + f' \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{z}{f} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Daraus können die relevanten neuen, d. h. die transformierten, Parameter des Gaußschen Strahls nach Einsatz von optischen Elementen berechnet werden – die Herleitung der Parameter findet sich im Anhang wieder.

Die **Position der transformierten Strahltaile** als Abstand  $\Delta f$  zur Brennweite der Linse

$$\Delta f = \frac{f^2 \cdot (z - f)}{Z_R^2 + (z - f)^2}
 \tag{2.23}$$

Die **transformierte Rayleighlänge**  $h$

$$h = \frac{f^2 \cdot Z_R}{Z_R^2 + (z - f)^2}
 \tag{2.24}$$

Die **transformierte Strahltaile**  $\omega_1$

$$(2\omega_1)^2 = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f^2 \cdot Z_R}{Z_R^2 + (z - f)^2}
 \tag{2.25}$$

Die transformierte Rayleighlänge  $h$  beinhaltet dabei die Information über die Gleichförmigkeit der Energieverteilung entlang der Ausbreitungsrichtung, während die Berechnung der Position der neuen Strahltaile als Abstand  $\Delta f$  von der nominellen Brennweite der Fokussierlinse eine stets auftretende *shift* der Strahltaile impliziert.



## Kapitel 3

# Problemstellung

Aus dem Stand der Technik leiten sich folgende Kernpunkte für eine weitere Behandlung ab:

- Die unbefriedigende Qualität metallischer Bauteile, die durch Abtrag mit kurz-gepulster Laserstrahlung hergestellt werden, erfordert neben der eigentlichen Fertigung oft eine maschinelle oder manuelle Nachbearbeitung durch Schleifen und Polieren. Damit entstehen lange Prozessketten, die ein mehrfaches Handling der Werkstücke mit entsprechend hohen Kosten nach sich ziehen und so eine weitere Verbreitung der Kurz-Pulslasertechnik für die abtragende Formgebung behindern.
- Die verschiedenen abtragenden Verfahren der Kurz-Pulslasertechnik werden in der Literatur getrennt behandelt, daher gehen mögliche synergetische Effekte einer ganzheitlichen Betrachtung der Prozesse verloren.
- Die für eine Optimierung notwendige Modellbildung beschränkt sich bisher auf den gut untersuchten Einzelpulsabtrag oder das Perkussionsbohren. Eine Vorstellung zum Abtragverhalten bei einer Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück wurde noch nicht entwickelt.
- Bislang fehlt auch die Berücksichtigung der Strahlausbreitung und damit der räumlichen Energieverteilung im Werkstück bei der Materialbearbeitung mit einer Vielzahl von Laserpulsen. Dadurch bleibt weiteres Optimierungspotenzial ungenutzt.



# Kapitel 4

## Ziele und Lösungsweg

### 4.1 Ziele

Das Ziel dieser Arbeit ist, die abtragenden Prozesse der Materialbearbeitung mit kurz-gepulster Laserstrahlung zusammengefasst als Lasereindbearbeitung metallischer Werkstoffe darzustellen. Einerseits soll damit die Entwicklung einer prozessübergreifenden Beschreibung der Parameterabhängigkeiten und andererseits das Optimierungspotenzial bei einer derartigen Bearbeitung aufgezeigt werden. Hierzu erfolgt eine Charakterisierung der relevanten Einzelprozesse des stationären und des dynamischen Abtrags mit der nachfolgenden Ableitung der Interkorrelationen der Bearbeitungsparameter. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung von Bearbeitungsstrategien, die unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Modellierung und der Simulation der Pulsüberlagerung optimiert werden. In die Betrachtungen gehen auch bisher kaum berücksichtigte Einflüsse der Strahlausbreitung und der räumlichen Energieübertragung ins Werkstück ein. Als weitere Maßnahme zur Verkürzung der Prozesskette, d. h. um Nachbearbeitungsschritte zu vermeiden oder zu vereinfachen, ergänzen Untersuchungen zum Glätten mit Laserstrahlung diese Arbeit. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Bearbeitung in einer Aufspannung. Damit kann letztlich ein System aufgebaut werden, das den Anforderungen eines kombinierten Verfahrens aus Laserstrahlabtragen und -glätten genügt.

## 4.2 Lösungsweg

Der Materialabtrag durch kurze Laserpulse kann zunächst in verschiedene Prozesse unterteilt werden. Eine Übersicht bietet Tabelle 4.1. Sie enthält auch entsprechende Kenngrößen für die Bestimmung der Bearbeitungsqualität. Dabei wird zusätzlich auf die Prozessführung eingegangen und zwischen stationärem und dynamischem Abtrag unterschieden; stationär bedeutet dabei eine Überlagerung von Laserpulsen ohne Versatz in der Ebene (Überlappgrad = 100 %), hingegen ist unter dynamisch eine Überlagerung von Pulsen mit einem Versatz ( $0\% < \text{Überlappgrad} < 100\%$ ) zu verstehen.

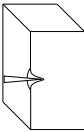
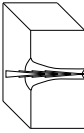
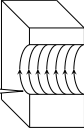
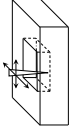
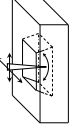
Die einfachste Anwendung der Laserendbearbeitung ist das *Einzel-pulsbohren*, bei dem ein singulärer Laserpuls den gewünschten Abtrag erzeugt. Nachdem die Pulsdauer kurz ist, kann dieser Prozess dem stationären Abtrag zugeordnet werden, da selbst bei einer Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl die Bearbeitung zum Zeitpunkt eines Pulses quasi nur an einem Punkt erfolgt und ein nachfolgender Laserpuls nicht mehr die Bearbeitungszone – das ist der Bereich offensichtlicher Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie, siehe auch Abschnitt 5.5.1 – des Vorhergehenden beeinflusst. Diese Art der Bearbeitung wird zum Perforieren dünner Folien oder für die Herstellung von Funktionsflächen an Lagern durch Erzeugung von Mustern aus zahlreichen Einzelpulsabträgen [EMMEL, 2006] eingesetzt. Da mit [KOCH, 1996] die Elementarprozesse des Einzelpulsabtrages bereits ausreichend beleuchtet wurden, finden Untersuchungen zu dieser speziellen Form der Bearbeitung keinen weiteren Eingang in diese Arbeit; insbesondere auch, weil das Abtragen mit Einzelpulsen kurz-gepulster Laserstrahlung als Sonderform der Laserendbearbeitung anzusehen ist.

Wird dieselbe Stelle des Werkstücks mit einer Serie aufeinanderfolgender Pulse beaufschlagt, so spricht man vom *Perkussionsbohren*. Auch dieser Prozess ist als stationärer Abtrag aufzufassen, da während der Herstellung einer Bohrung keine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück stattfindet. Mit dem Perkussionsbohren können Sacklöcher oder auch Durchgangslöcher erzeugt werden, die ein Aspektverhältnis – d. i. das Verhältnis von Bohrungstiefe zu -durchmesser – deutlich größer 10 erreichen.

Eine weitere Möglichkeit, Durchbrüche herzustellen, deren Form nicht zwangsläufig rund sein muss, ist der *Wendelabtrag*, auch *Laserstrahlwendelbohren* oder *Wendelbohren* genannt. Hierbei wird eine



**Tabelle 4.1:** Prozesse der Laserendbearbeitung

Prozess	Einzelpuls	Perkussion	Wendelabtrag	2D-Abtrag	3D-Abtrag
<b>Prozessführung</b>					
	stationär (lokal)	dynamisch (ausgedehnt)			
<b>Anwendung</b>	Durchbrüche				
<b>Besonderheiten</b>	auch Sacklöcher		auch Schmitte	Flächen und Relief	Hinterschnidungen
<b>Kenngrößen</b>	X	X	X		
Durchmesser		X	X		
Schnittspaltbreite			X		
Konizität	X		X		
Flankenwinkel			X		X
Aspektverhältnis	X	X	X	X	X
Rauheit			X	X	X

Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl realisiert, wobei Vorschub und Pulsfolgefrequenz so gewählt werden, dass aufeinanderfolgende Pulse überlappen. Es handelt sich daher um eine dynamische Form des Abtrags. Die gewünschte Kontur wird zumeist durch mehrfaches Abfahren des Umrisses gleichsam ausgeschnitten. Diese Art des Abtragens ist ebenfalls seit längerem bekannt, beispielsweise aus [KOCH & LANG, 1997], wobei damals noch die Bezeichnung „Trepanieren“ verwendet wurde.

Die Formgebung wird heute in *2D*-, *2,5D*- und *3D-Abtrag* eingeteilt, obwohl sie von der Prozessführung her identisch sind. Sie zeichnet sich durch die Überlagerung von Pulsen nicht nur in einer Richtung aus, vielmehr überlappen auch parallel liegende Abtragspuren, so dass eine flächige Struktur erzeugt wird. Im einfachsten Fall handelt es sich um eine geometrische Vertiefung im Werkstück, den *2D-Abtrag*. Durch Ineinanderschachteln zweier oder mehrerer solcher Flächen ergibt sich der *2,5D-Abtrag*. Bei der Herstellung von *3D-Formen*, also Strukturen mit Hinterschneidungen, trifft der Laserstrahl in den entsprechenden Bereichen nicht senkrecht zur Oberfläche des Bauteils auf. Aber auch hier wird ein Volumenabtrag nur durch wiederholtes Bearbeiten des Werkstückes erzielt. Daher werden diese Arten der Bearbeitung im Folgenden nicht weiter unterschieden, sondern allgemein als flächiges Abtragen oder als Formabtrag bezeichnet.

Aus Prozessbeobachtungen heraus können für die oben beschriebenen Möglichkeiten der Fertigung eine Reihe von Parametern abgeleitet werden. Dabei sind einige Prozessgrößen elementar, zwischen anderen besteht ein enger Zusammenhang. Dieses Phänomen stellte sich im Rahmen der Arbeit als komplexes Problem dar, welches teilweise nicht auflösbar war. Dennoch wurden Anstrengungen unternommen, die relevanten Prozessgrößen zu identifizieren, um sie mit Bearbeitungsergebnissen zu korrelieren. Nach verschiedenen Gesichtspunkten unterteilt sind im Folgenden mögliche Einflussgrößen angegeben:

- **Laser**  
Strahldurchmesser, mittlere Leistung, Pulsleistung, Pulsdauer, Pulsenergie, Pulsfolgefrequenz, Strahlparameterprodukt, Wellenlänge
- **Werkstoff**  
Absorptionsgrad, Wärmeleitkoeffizient, Schmelzenthalpie, Verdampfungsenthalpie, Bearbeitungszone

- **Bearbeitung**

Überlapp in  $x$  (in Hauptvorschubrichtung), Überlapp in  $y$  (senkrecht zu  $x$ ), Fokusslage, Vorschubgeschwindigkeit, Streckenenergie, Schraffurwinkel, Drehwinkel

### 4.3 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Die Betonung dieser Arbeit liegt auf einer ingenieurwissenschaftlichen Adaption bestehender Erfahrungen zum Abtragen mit kurz-gepulster Laserstrahlung. Ziel ist es, die vorliegenden Erkenntnisse auf neue Weise zu interpretieren, zu verifizieren und in einem umfassenderen Kontext, der Laserendbearbeitung, vorzustellen. Auf eine explizite physikalische Beschreibung des Abtrags oder des Abtragverhaltens wird bewusst verzichtet, sofern die Charakterisierung der Prozesse nicht direkt davon betroffen ist. Schließlich existiert zu den Abtragemechanismen bereits eine Vielzahl von Vorstellungen für unterschiedliche Prozessregime, die überwiegend durch die Einwirkdauer der Laserpulse bestimmt sind, z. B. [VON ALLMEN & BLATTER, 1995; KÖRNER, 1997; OHMURA & FUKUMOTO, 1997].

Systematische Untersuchungen an Metallen dienen der Identifikation prozessrelevanter Parameter, die anschließend bezüglich der Bearbeitungsergebnisse, d. h. mehrheitlich mit der Abtragrata und der Oberflächengüte, korreliert werden. Hierbei liegt das Augenmerk auf einer Darstellung der Zusammenhänge durch einfach zu replizierende und leicht zu messende Größen, um eine breite Akzeptanz, insbesondere bei möglichen industriellen Anwendern, zu erzielen.

Grundlegende Daten werden mit einem herkömmlichen, gütegeschalteten Nd:YAG-Laser – Pulsdauer ca. 200 ns – ermittelt, wie er in der Industrie bereits eingesetzt wird. Abtraguntersuchungen mit einem Kupferdampfaser, der über eine höhere Ausgangsleistung verfügt, ergänzen diese Daten. Dabei findet auch die Strahlform Berücksichtigung. Der Grundlagenteil schließt mit der Identifikation der relevanten Prozessparameter beim flächigen Abtragen ab.

Bisher liegen zahlreiche Untersuchungen zur Strahl-Stoff-Wechselwirkung vor, die sich jedoch auf statische Modelle beschränken; gelegentlich um eine bewegte Wärmequelle für das Laserstrahlbohren erweitert. Die Zusammenhänge bei der lateralen Strukturierung wurden bisher kaum berücksichtigt. Daher sollen eine Modellbildung und die Simulation

der Vorgänge beim flächigen Abtragen die Arbeiten zur Optimierung unterstützen. Dort fließen auch Überlegungen zur Strahlformung ein, um einen an die Bearbeitungsaufgabe angepassten Energieeintrag zu ermöglichen. Hierzu werden die im ersten Teil erarbeiteten Erkenntnisse und Erfahrungen zusammengefasst: Einerseits um die vorhandenen statischen Modelle auf dynamische Prozesse zu erweitern, andererseits um das gewonnene Wissen bei der Entwicklung von Bearbeitungsstrategien zum optimierten Abtragen mit kurz-gepulster Laserstrahlung anzuwenden, wobei auch Einflüsse der Bearbeitungsanlage Eingang finden. Besonderes Augenmerk liegt auf der Verknüpfung entgegenstehender Merkmale wie Qualität und Geschwindigkeit, die eine Erweiterung der Laserendbearbeitung zur Prozesskette mit Strukturierung und anschließendem Laserglätten erfordern.

Insbesondere werden folgende Einflüsse auf die Bearbeitungsqualität bei der Laserendbearbeitung, siehe Kenngrößen in Tabelle 4.1, untersucht:

- Pulsfolgefrequenz
- Pulsleistung
- Pulsenergie
- Bearbeitungszone
- Überlappgrad
- Strahlform

# Kapitel 5

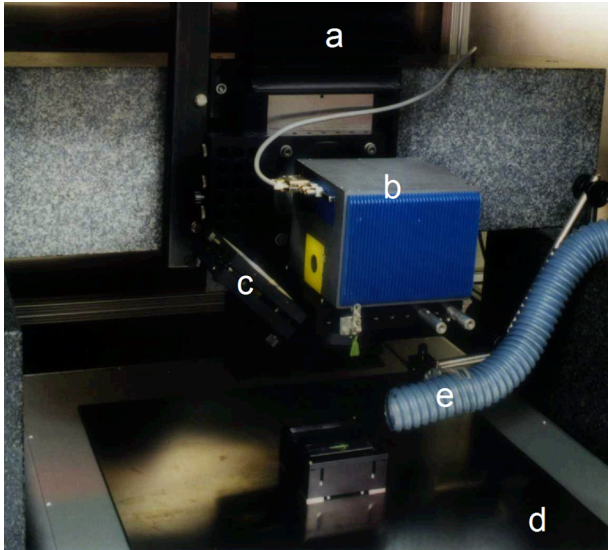
# Experimentelles Vorgehen

## 5.1 Ausstattung

Bild 5.1 zeigt den Versuchsaufbau mit z-Achse (a) und daran befestigtem Scanner (b), Umlenkspiegel (c), x-y-Linearkoordinatentisch (d) und Absaugung (e). Die Strahlquelle befindet sich in ca. 2 m Höhe hinter dem Aufbau. Die Strahlung wird über mehrere Umlenkspiegel zum Scanner oder zu einer Fokussierlinse, die wahlweise montiert werden können, geführt. Die auf der rechten Seite angebrachte Absaugung schützt sowohl Optik als auch Bearbeiter vor den Abtragprodukten.

### 5.1.1 Positioniersysteme

Grundsätzlich ist zwischen Bauteil bewegenden und Laserstrahl ablenkenden Positioniersystemen zu unterscheiden. Bei den Untersuchungen wurden zwei verschiedenartig aufgebaute Koordinatentische zur Bauteilbewegung bei festem Laserstrahl oder zur Positionierung des Werkstückes unter einem Galvanometerscanner zur Strahlableitung, beschrieben in Abschnitt 5.1.2, eingesetzt. Im Folgenden wird auf die Positioniersysteme nur kurz eingegangen, da ihre dynamischen Grenzen der Verwendung hoher Pulsfolgefrequenzen besonders bei geringen Abmessungen der zu bearbeitenden Flächen entgegenstehen. Lediglich Scanner-

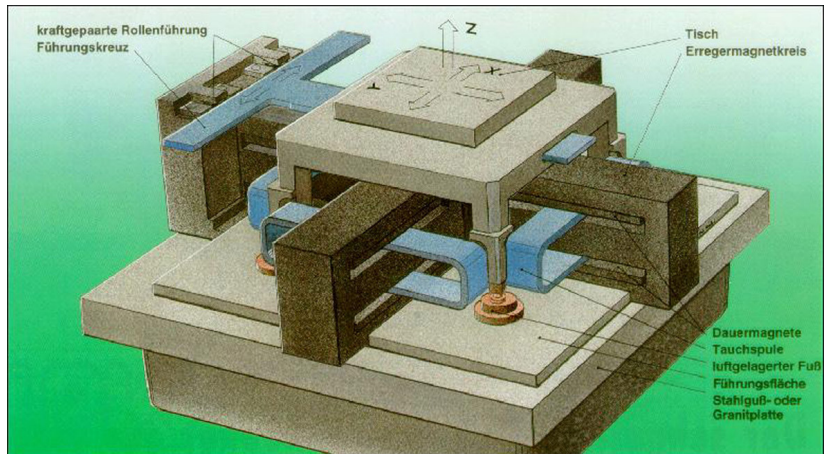


**Abbildung 5.1:** Positionier- und Scannersystem

systeme erzielen ausreichende Beschleunigungs- und Verzögerungswerte zur Umsetzung der erreichbaren Pulsfolgefrequenzen in eine effiziente Pulsüberlappung. Darüber hinaus stellen diese Scansysteme einen neuen Bestandteil einer Anlage zum Strukturieren mit kurz-gepulsten Lasern dar.

**Spindelgetriebener x-y-Koordinatentisch** Konventionelle, spindelgetriebene x-y-Koordinatentische zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit und Vorschubgeschwindigkeiten von mehreren 100 mm/s bis zu einigen m/s aus. Ein Nachteil solcher Systeme sind die eingeschränkten Werte von Beschleunigung und Verzögerung. Außerdem unterliegen die Spindeln bei kurzen Stellwegen und repetitiver Positionierung einem erhöhten Verschleiß.

**Magnetisch antriebener Linearkoordinatentisch** Luftgelagerte Linearkoordinatentische mit magnetischem Antrieb erzielen Beschleunigungen bis ca.  $1,25 \text{ mm/s}^2$ , daher sind sie für Stellwege von einigen 10 mm besonders geeignet. Jedoch benötigen diese Systeme eine Ein-



**Abbildung 5.2:** Aufbau des Lineartisches [Quelle: LPKF, Suhl]

schwingzeit, die zum Einen vom Eigengewicht der Achsen und zum Anderen von der Last abhängt, die von den Achsen bewegt wird. Aufgrund der Luftlager ist bei dieser Art Positioniersystem kaum Verschleiß zu beobachten. Zusätzlich sind x- und y-Achse äquivalent, da sie unabhängig voneinander sind, im Gegensatz zu spindelgetriebenen Tischen, bei denen eine Achse auf der anderen montiert ist. Bild 5.2 verdeutlicht den Aufbau des Lineartisches mit Tauchspulenantrieb und den voneinander unabhängigen Achsen. Da das System in beiden Achsen frei beweglich ist, muss zur Erhöhung der Führungsstabilität und Genauigkeit eine Kräftepaarung in Form eines Führungskreuzes vorgesehen werden.

**Vergleich der Positioniersysteme** Beide Koordinatentische verfügen über einen Stellweg von 200 mm x 200 mm. Die maximale Verfahrgeschwindigkeit der beiden Systeme ist gleich. Jedoch zeigt sich bei der wiederholten Positionierung mit kurzen Stellwegen ein erheblicher Unterschied aufgrund der verschiedenen Antriebs- und Lagerkonzepte. Insbesondere bei Untersuchungen zur Herstellung von Multilochblechen mit mehreren tausend Löchern im Abstand von 0,5 mm liefern die höheren Werte in Beschleunigung und Verzögerung des Lineartisches einen Vorteil. Mit einer Stellzeit von 50 ms gestattet der Lineartisch eine um

den Faktor drei größere Positioniertrate als der spindelgetriebene Koordinatentisch. Jedoch erweist sich die Bewegung des Bauteils mit dem Lineartisch als schwingungstechnisch schwer handhabbar; dies gilt bei großen und damit schwereren Werkstücken in noch deutlicherem Maße. Als Schwachstelle des Linearkoordinatentisches zeigt sich sein Unterbau, der die mechanischen Belastungen nur bedingt ertragen kann. Die in y-Richtung über die gesamte Länge des Tisches reichenden und in x-Richtung mit einem Granitträger versteiften Füße, ebenfalls aus Granit, halten bei wiederholtem Anfahren und Abbremsen nur in y-Richtung den Beschleunigungskräften stand. Liegt die Hauptbewegungsrichtung auf der x-Achse, dann steigt die Einschwingzeit des Lineartisches für gleiche Beschleunigungswerte wie an der y-Achse an. Derartige Probleme treten beim spindelgetriebenen Modell, das auf einem massiven Granitblock montiert ist, nicht auf.

### 5.1.2 Strahlableitung

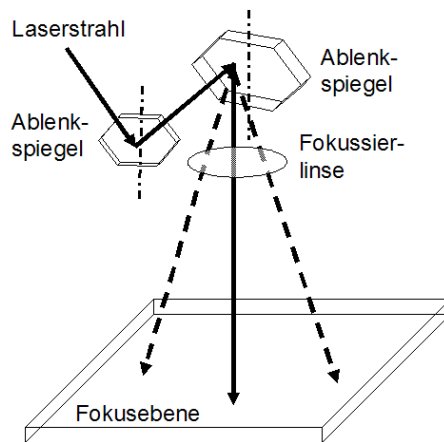
Die Beschränkungen der Koordinatentische in Beschleunigung oder Geschwindigkeit aufgrund der großen bewegten Massen und die Verwendung von Lasern mit hoher Pulsfolgefrequenz machen für die dynamischen Abtragarten, Laserstrahlwendelbohren oder abtragende Formgebung, den Einsatz einer schnellen Strahlableitung erforderlich.

Generell eignen sich sog. Scanner mit Galvanometerantrieb für derartige Aufgaben. Sie lenken den Laserstrahl über Spiegel ab, die auf Torsionsstäben von Galvanometern montiert sind, siehe Bild 5.3. Typische Stellzeiten von Scannern in der Lasermaterialbearbeitung betragen wenige Millisekunden, wobei eine Positioniergenauigkeit im Bereich von Mikrometern, abhängig von der Brennweite der verwendeten Fokussierlinse, erreicht wird. Bei diesen Systemen bleibt das Werkstück während der Bearbeitung in Ruhe und der Laserstrahl wird über das Bauteil gelenkt.

Die Anwendung von Galvanometerscannern unterscheidet zwischen drei Scan-Methoden:

- Der **Schritt-Scan** (Bild 5.4a): Der Laser wird in einer vorgegebenen Position aktiviert und während der Positionierung deaktiviert.
- Der **Raster-Scan** (Bild 5.4b): Der Spiegel bewegt sich wiederholte Male mit konstantem Vorschub um einen festgelegten Winkel. Auf diese Weise entsteht eine Struktur paralleler Linien. Am Ende



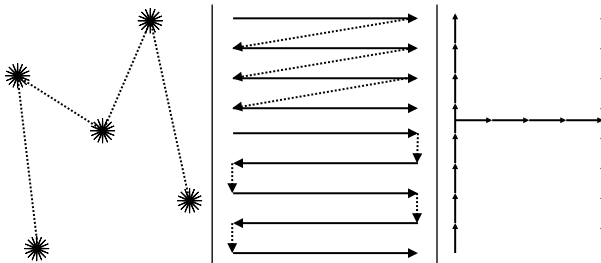


**Abbildung 5.3:** Schematischer Aufbau eines Galvanometerscanners

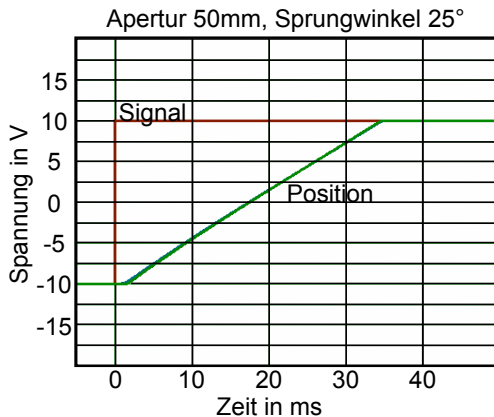
jeder Linie wird der Laser ausgeschaltet und der Scanner kehrt zu seiner Startposition zurück. Eventuell erfolgt diese Form des Scannens auch bidirektional, d. h. die Linien werden von links nach rechts und umgekehrt erzeugt.

- Der **Vektor-Scan** (Bild 5.4c): Die Bewegung wird in viele kleine Schritte unterteilt. Dabei ergibt sich eine kontinuierliche Spur auf der Werkstückoberfläche, wenn die Steuerbefehle schneller generiert werden, als sie die Scannereinheit verarbeiten kann. Diese Technik ermöglicht z. B. das Schreiben von Zeichen und komplexen Geometrien.

Die in der Lasermaterialbearbeitung verwendeten Scannersysteme sind in der Regel für einen bestimmten Strahldurchmesser ausgelegt. Dabei entscheiden sowohl Leistungsdichte im Rohstrahl als auch die gewünschte Geschwindigkeit der Strahlableitung über die Größe der eingesetzten Spiegel und damit über die Apertur der Scanner. Da die Spiegel hohen Beschleunigungen durch schnelle Rotation unterworfen sind, beeinflussen Größe und Masse der Spiegel die Leistung der Scanner erheblich. Aufgrund von Massenträgheit, Reibung und Antriebsverhalten des Galvanometers reagiert das Gesamtsystem nur mit einer Verzögerung, der Sprungzeit (Bild 5.5), auf einen Befehlssatz. Diese Abweichung ist maßgeblich von der Apertur bzw. der Spiegelgröße abhängig, wie



**Abbildung 5.4:** Schritt- (a), Raster- (b) und Vektor- (c) Scan



**Abbildung 5.5:** Sprungzeit

Bild 5.6 zeigt. Mit steigender Apertur nimmt die Sprungzeit der Scanner zu, unabhängig von der eingestellten Auslenkung. Der Sprungwinkel 25° entspricht der maximalen Ablenkung, bei der der Laserstrahl noch vollständig die Öffnung der Fokussierlinse passiert.

Die Sprungzeit ist auch das charakterisierende Leistungskriterium beim Schritt-Scan, also zum Erreichen einer absoluten Position. Hierzu verdeutlicht Bild 5.7: Die Sprungzeit ist die Zeit, welche das System benötigt, um eine gewünschte Position innerhalb einer vorgegebenen Einschwingtoleranz zu erreichen. Die Positionsgenauigkeit wird jedoch nicht nur vom Einschwingverhalten beeinflusst, sondern auch durch Rauschen der Stromversorgung und durch Vibrationen der Torsionswelle.

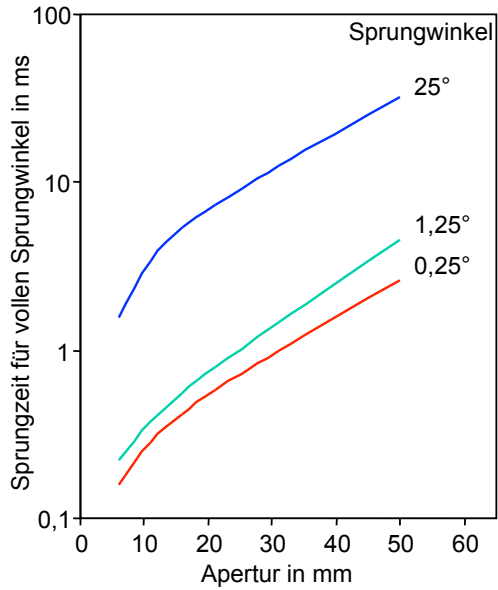


Abbildung 5.6: Leistung von Scannern

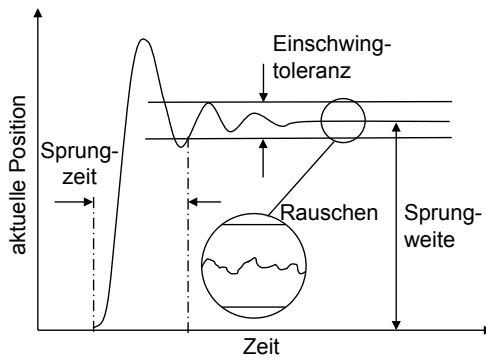
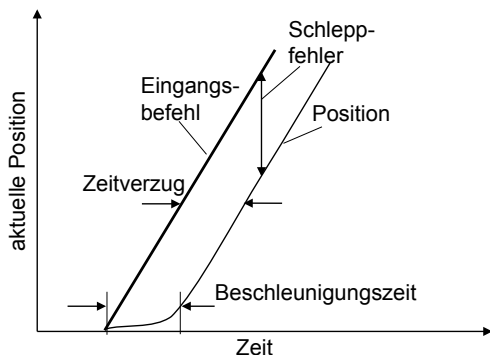


Abbildung 5.7: Schritt-Scan-Charakteristika



**Abbildung 5.8:** Vektor-Scan-Charakteristika

Bild 5.8 beschreibt die Charakteristika beim Vektor-Scan, d. h. in der Bewegung. Typischerweise tritt ein Schleppfehler auf, bei dem die Bewegung dem Befehlseingang um einen Zeitverzug nachfolgt. Dieser Fehler beruht auf der benötigten Zeit zur Beschleunigung des Systems aufgrund von Trägheit und Reibung.

Der Raster-Scan wird durch die Scan-Frequenz, d. h. die Anzahl der Linien pro Zeiteinheit, charakterisiert.

In Scannersystemen treten weitere Positionsfehler auf, die ihre Genauigkeit einschränken können: Zum Einen das Überschwingen, d. h. die Bewegung des Galvanometers läuft über die gewünschte Position hinaus. Zum Anderen sind Wobble und Jitter (Bild 5.9) zu beobachten. Diese Fehler sind Abweichungen senkrecht oder entlang der Bewegungsrichtung und werden ebenfalls durch Rauschen oder durch Kalibrierungsfehler hervorgerufen. Fehler, die der Dynamik des Systems entspringen, d. h. Beschleunigungs- und Verzögerungseffekte sowie das Überschwingen, können in modernen Steuerungen durch die Software kompensiert werden, so dass Konturabweichungen oder variierende Überlappgrade nicht auftreten.

Besondere Beachtung benötigen auch die Fokussiersysteme, die mit Scannern für die Lasermaterialbearbeitung eingesetzt werden. Üblich sind Planfeld-Optiken, auch als F-Theta-Linsen bezeichnet, die den Strahl unabhängig vom Einfallswinkel immer in dieselbe Ebene fokussieren (Bild 5.10). Dabei bleibt die Strahlachse erhalten, d. h. die unter einem bestimmten Winkel auf die Linse treffende Strahlung fällt auch

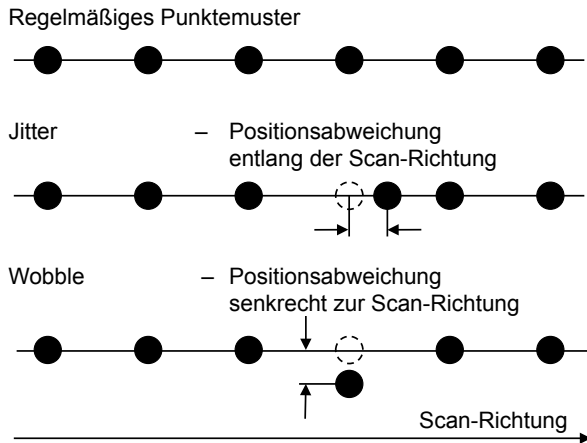


Abbildung 5.9: Positionsfehler

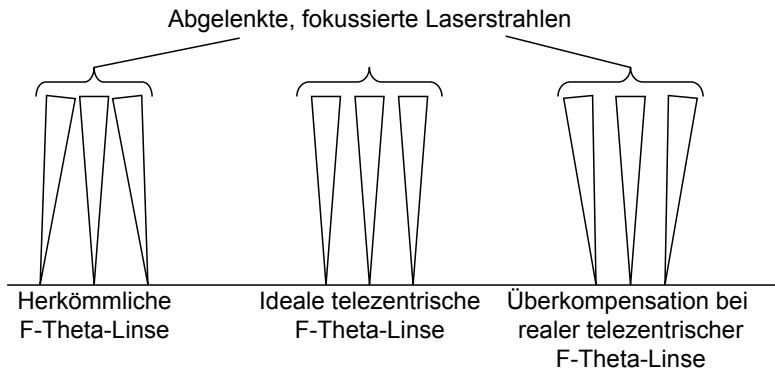


Abbildung 5.10: Wirkungsweise von Scannerlinsen

unter diesem Winkel in die Fokusebene. Dies führt zu einer elliptischen Verzerrung des Laserstrahlprofils in der Ebene. Nur der senkrecht in die Linse einfallende Laserstrahl trifft auch lotrecht auf die Fokusebene. Mit Hilfe telezentrischer Linsen lässt sich dieses Problem korrigieren, so dass auch nicht senkrecht in die Linse einfallende Strahlen rechtwinklig auf der Fokusebene auftreffen. Allerdings kann bei Strahlung, die in den Randbereichen der Linse abgelenkt wird, eine Verzerrung auftreten. Es kommt zu einer Überkompensation, die den Laserstrahl stärker in Richtung Linsenachse lenkt. Um Einflüsse durch diese Effekte auf die Untersuchungsergebnisse zu vermeiden, wurden für verschiedene Linsensysteme die maximalen Feldgrößen ermittelt, bei denen derartige Störungen ausbleiben, vgl. Tabelle 5.1. Darüber hinaus sind dort die Ausstattung und weitere Eigenschaften des verwendeten Scanners angegeben.

### 5.1.3 Verwendete Strahlquellen

Die Versuche zum Laserstrahlbohren werden wegen der höheren mittleren Leistung mit KupferdampfLasern (engl. Copper Vapour Laser: CVL) durchgeführt, während der flächige Abtrag überwiegend mit gütegeschalteten Nd:YAG-Lasern hoher Pulsfolgefrequenz untersucht wird. Die charakteristischen Daten der eingesetzten Strahlquellen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

**Kupferdampfaser** Die verwendeten Kupferdampferanlagen sind in MOPA-Anordnung (Master-Oszillator-Power-Amplifier) aufgebaut, d. h. sie sind aus einem Oszillator mit hoher Strahlqualität und hier bis zu drei Verstärkern zur Leistungssteigerung zusammengesetzt. Die Systeme erreichen eine mittlere Leistung  $P_{ave} = 170$  W bei einer Pulsfolgefrequenz  $f_P = 12,6$  kHz. Da die Pulslänge  $t_p \approx 30$  ns beträgt, wird somit eine Pulsleistung  $P_P$  von bis zu 450 kW erzielt. Die Laserstrahlung aus den beiden emittierten Wellenlängen  $\lambda_{1,2} = 511$  nm u. 578 nm verfügt über eine Strahlqualitätskennzahl  $M^2$  von etwa 16.

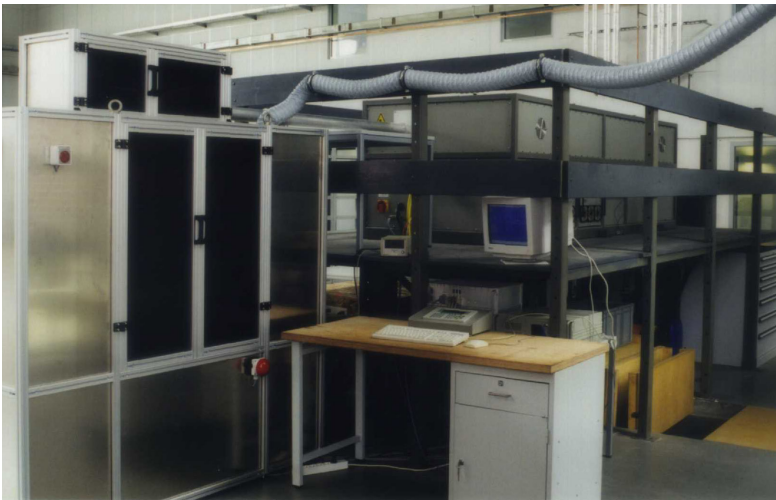
Die Bilder 5.11 und 5.12 zeigen die beiden eingesetzten leistungsgleichen CVL-Anlagen: ein MOPA-System mit bis zu drei Verstärkern des ATZ-EVUS in Vilseck und ein System mit Oszillator und zwei Verstärkern in einem Gehäuse am BIAS in Bremen. Der Strahlaustritt der beiden Anlagen liegt in etwa 2 m Höhe, so dass der Laserstrahl jeweils von oben in die entsprechenden Bearbeitungskammern einge-

**Tabelle 5.1:** Ausstattung und Eigenschaften des Scanners

<b>Ausstattung</b>	<b>Ablenkkopf ARGES Typ 20M2</b>	
Spiegel	Beschichtung	zentrale Wellenlänge
	dielektrisch	532 nm
Linsen alle F-Theta	Silber	Breitband
	Brennweite	Feldgröße
	$f = 80$ mm	40 x 40 mm <sup>2</sup>
	$f = 160$ mm	100 x 100 mm <sup>2</sup>
	$f = 250$ mm	140 x 140 mm <sup>2</sup>
Software	Inscript, Ver. 2.6 (Stand 01.2002)	
Apertur	20 mm	
Größter Ablenkwinkel	0,56 rad	
$v_{max}$ @ $f = 160$ mm	10 m/s	
Wiederholgenauigkeit	15 $\mu$ rad	
Linearität	99,98 %	
Thermische Drift	2 $\mu$ rad/°C	
Wobble	1 $\mu$ rad	
Jitter	15 $\mu$ rad	



**Abbildung 5.11:** CVL-Anlage ATZ-EVUS, Vilseck



**Abbildung 5.12:** CVL-Anlage BIAS, Bremen



**Tabelle 5.2:** Eigenschaften der verwendeten Strahlquellen

Laserart	CVL	Nd:YAG (TEM <sub>00</sub> )
Hersteller	ATZ EVUS	Spectron
Typ	CVL 275plus	SL 902 TQ
Rohstrahl- durchmesser $d$	32 mm	1,3 mm (Modenblende)
Strahlqualitäts- kennzahl $M^2$	16	1,3
Pulsenergie $E_P$	13,5 mJ	5 mJ@3 kHz
max. mittlere Leistung $P_{ave}$	170 W@12,6 kHz	16 W@10 kHz
Pulsfolgefrequenz $f_P$	12,6 kHz	bis 100 kHz
Wellenlänge $\lambda$	511 nm/578 nm	1.064 nm
Pulsdauer $t_p$	30 ns	100-500 ns

spiegelt werden kann. In den Arbeitsstationen befinden sich jeweils eine Positioniereinheit zur Werkstückbewegung, ein Galvanometerscanner zur Ablenkung des Laserstrahls und die notwendigen Einrichtungen zur Strahlformung, wie Fokussierlinsen; siehe auch Bild 5.1.

Die Leistungsstabilität der Laserstrahlung bestimmt die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse oder von in Serienfertigung hergestellten Strukturen. Dies betrifft in erster Linie die Fabrikation identischer Werkstücke, d. h. die gleichmäßige Fertigung vom ersten bis zum letzten Bauteil innerhalb einer Produktionsserie muss sichergestellt sein. Speziell der Kupferdampf-Laser war wegen seines prototypenartigen Charakters für die Mikrostrukturierung zu erproben.

Bei der Ermittlung der *Puls-zu-Puls*-Stabilität (Bild 5.13) zeigt sich nach der Aufnahme des zeitlichen Intensitätsverlaufs von rund 100.000 Pulsen – linker Bildteil – und ihrer Auswertung – die Integrationskurven im rechten Bildteil, die ein Maß für die Pulsenergie darstellen –, dass die Pulsenergie einer Schwankung von  $\pm 9\%$  unterliegt. Diese Bandbreite muss bei Abtraguntersuchungen berücksichtigt werden, die eine relativ geringe Anzahl von Pulsen benötigen. Deshalb sind solche Untersuchungen mehrfach zu wiederholen, um statistische Sicherheit zu gewinnen und die Aussagekraft zu erhöhen.

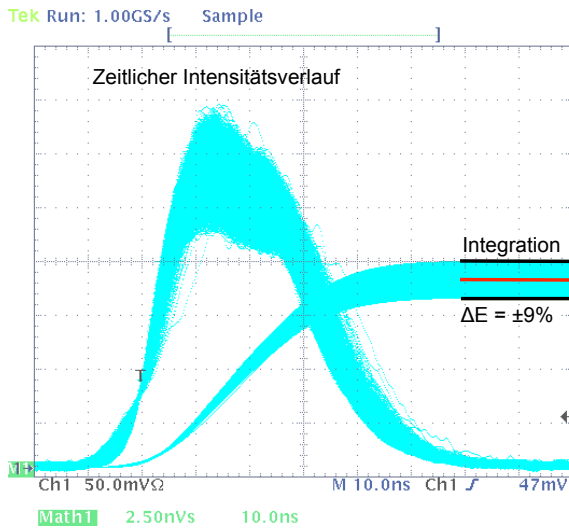


Abbildung 5.13: Puls-zu-Puls-Stabilität

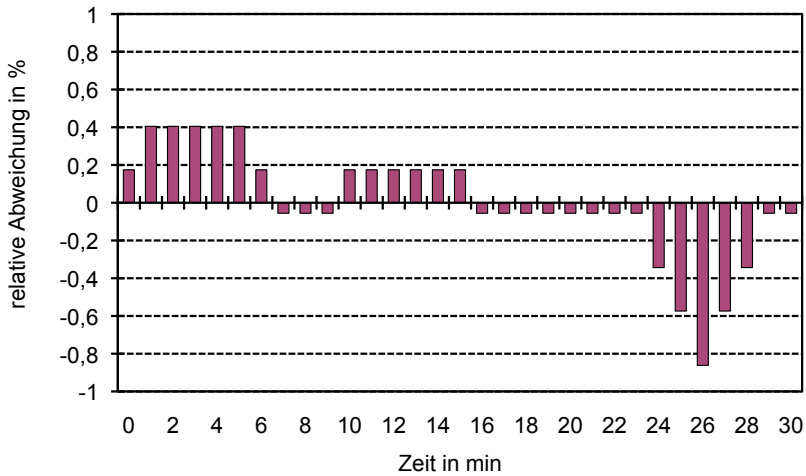


Abbildung 5.14: Konstanz der mittleren Leistung

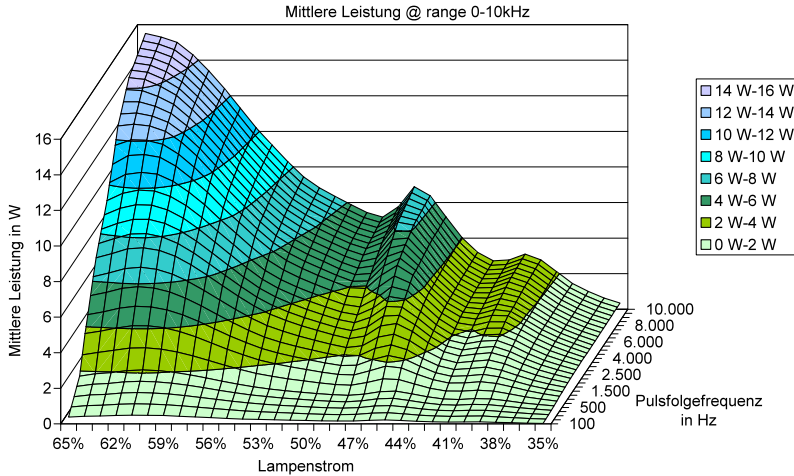
Strukturen, die eine Vielzahl von Pulsen zu ihrer Herstellung benötigen, werden durch diese Schwankungen kaum beeinflusst, da sie sich während der Bearbeitung mitteln. Jedoch sind Abweichungen in der mittleren Leistung während der Prozesslaufzeit oder zwischen aufeinander folgenden Versuchen zu beachten. Dazu zeigt Bild 5.14 einen Ausschnitt einer Langzeitmessung der mittleren Leistung bei  $P_{ave} = 170 \text{ W}$ . Ihre relative Abweichung beträgt weniger als 1,5%. Die gleiche maximale Schwankungsbreite ergibt sich bei verschiedenen mittleren Leistungen und ist der anderer Lasertypen ähnlich. Damit weist das Lasersystem eine hinreichende Langzeitstabilität der Leistung auf und ihre Schwankung kann bei den Auswertungen vernachlässigt werden. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist gewährleistet.



**Abbildung 5.15:** Nd:YAG-Laser BIAS, Bremen

**Lampengepumpter Nd:YAG-Stablaser** Bild 5.15 zeigt einen der eingesetzten Nd:YAG-Laser. Es handelt sich um kontinuierlich angeregte, lampengepumpte Systeme, deren Strahl durch einen akusto-optischen Modulator (AOM) in ns-Pulse unterteilt wird. Zugleich dient der AOM als Verschluss, um die Laserstrahlung ein- und auszuschalten. Zusätzlich ist der Resonator mit einer Modenblende ausgestattet, die einen Betrieb wahlweise in der Grund-Mode, d. h. nahezu TEM<sub>00</sub>, oder im Multi-Mode erlaubt. Die Steuerung der Leistungsparameter dieses Lasertyps über den Strom der Pumplampe bzw. den Güte-Schalter beeinflusst dessen Charakteristik, daher war dieses Lasersystem hinsichtlich günstiger Anregungsparameter zu untersuchen.

Messungen der mittleren Leistung mit einem Leistungsmessgerät (Gentec TPM 300 mit Messkopf PSV-3103 und Wärmesenke) sowie der Pulsbreite mit einem Photodetektor (Centronix AEPX 65) und einem Speicheroszilloskop (Tektronix 2440) zu verschiedenen Lampenströmen und Pulsfolgefrequenzen liefern die entsprechenden Abhängigkeiten.



**Abbildung 5.16:** Verlauf der mittleren Leistung

Die Einstellung der Ausgangsleistung mit Hilfe des Lampenstroms führt zu einer Änderung der Modenstruktur, die sich – siehe die beiden lokalen Maxima in Bild 5.16 – selbst mit Modenblende in der Grund-Mode, insbesondere bei hohen Pulsfolgefrequenzen, auswirkt.

Die Steuerung der Pulsfolgefrequenz über den Güte-Schalter liefert eine nicht-lineare Abhängigkeit der Pulsdauer, vergleiche Bild 5.17.

Aufgrund der Korrelation von Pulsleistung und Pulsenergie mit der mittleren Leistung bzw. der Pulsdauer nach Gleichung 5.1 und Gleichung 5.2 ergeben sich die in Bild 5.18 und Bild 5.19 ersichtlichen Abhängigkeiten bei eingesetzter Modenblende im relevanten Bereich der Pulsfolgefrequenzen bis 10 kHz.

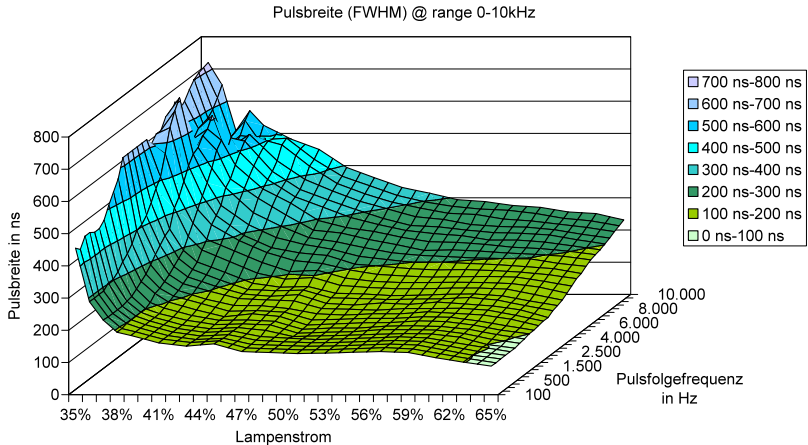
Berechnung der **Pulsleistung**  $P_P$

$$P_P = \frac{P_{ave}}{f_P \cdot t_{P(FWHM)}} \quad (5.1)$$

Berechnung der **Pulsenergie**  $E_P$

$$E_P = P_P \cdot t_{P(FWHM)} \quad (5.2)$$

mit  $P_{ave}$ : mittlere Leistung;  $f_P$ : Pulsfolgefrequenz;  $t_{P(FWHM)}$ : Pulshalbwertsbreite



**Abbildung 5.17:** Verlauf der Pulsbreite

Diese nicht-linearen Abhängigkeiten der Laserparameter von den Steuergrößen schränken die Parameterauswahl für grundlegende Untersuchungen stark ein, da die Wechselbeziehung mit einzelnen Parametern nur schwer darstellbar ist. Daher werden die Einstellungen der Parameter so gewählt, dass sich minimale Änderungen nicht betrachteter Parameter, z. B. der Pulsbreite, ergeben.

Eine größere Unabhängigkeit von den beschriebenen Effekten wird durch den Einsatz eines Abschwächers (Fa. Laseroptik, variabel für 1.064 nm) erreicht, so dass Versuche mit unterschiedlichen Pulsleistungen bei konstantem Lampenstrom, ohne die o. g. Wechselwirkungen, durchgeführt werden können.

Bild 5.20 zeigt ein Schema des optischen Aufbaus zur Einstellung der Leistung. Einen parallelen Versatz des Laserstrahls nach dem Abschwächer gleicht eine Kompensatorplatte aus. Beide Elemente werden dabei über Zahnräder gekoppelt, so dass die Leistung beliebige Werte annehmend kann, ohne einen Strahlversatz hervorzurufen.

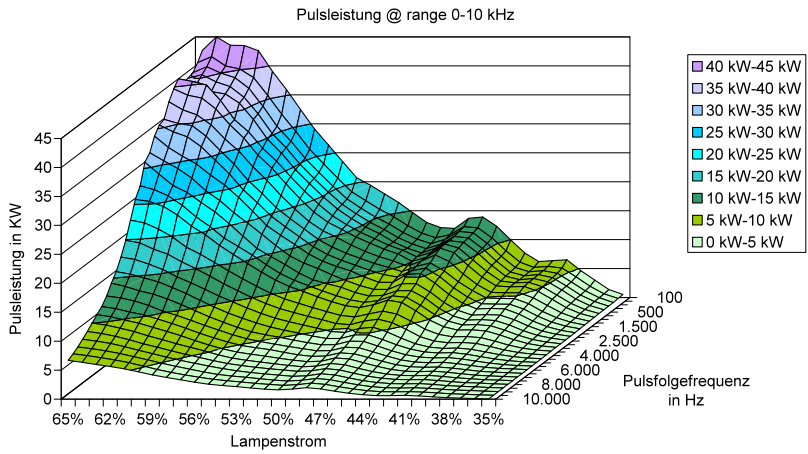


Abbildung 5.18: Pulsleistungscharakteristik

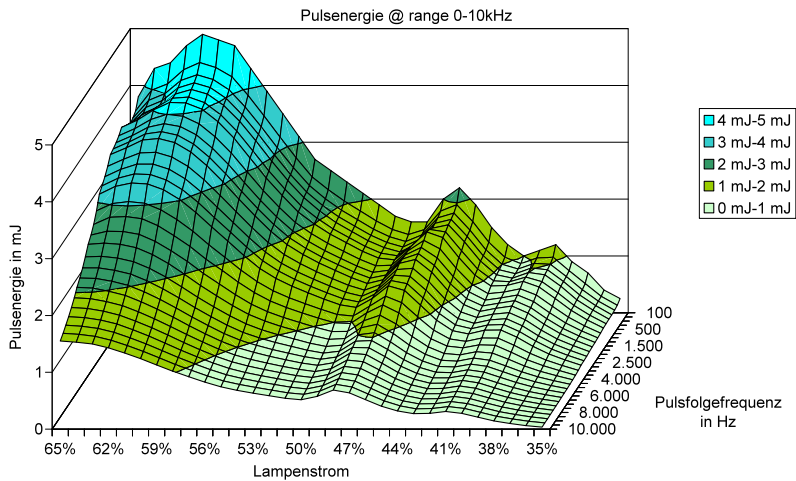


Abbildung 5.19: Pulsenergiecharakteristik

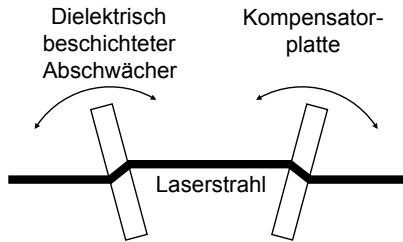


Abbildung 5.20: Optische Leistungssteuerung

## 5.2 Charakterisierung der Strahlform

Der Einfluss des optischen Aufbaus auf die Strahlform wird mit einem Fokusmonitor der Firma Primes GmbH bestimmt. Dieses System nimmt die Intensitätswerte der Strahlung in verschiedenen Ebenen auf und berechnet anhand der Vorgabe der Linsenbrennweite die charakteristischen Größen des fokussierten Laserstrahls, z. B. Radius der Strahltaille, Rayleigh-Länge oder die Strahlqualitätskennzahl  $M^2$ . Darüber hinaus liefert die Software des Systems eine graphische Auswertung, siehe Bild 5.21, oder auch eine 3D-Darstellung der Intensitätsverteilung. Im linken Ausschnitt des Bildes sind die Kenngrößen und weitere relevante Daten der Laserstrahlung angegeben, während in der Mitte die Kaustik zu erkennen ist. Auf der rechten Seite ist die Intensitätsverteilung an der Cursorposition – horizontale Linie in der Bildmitte – aufgezeigt.

Die Untersuchungen zur Beeinflussung der Strahlform konzentrieren sich auf die Ermittlung der Abhängigkeiten der Rayleigh-Länge  $Z_R$  und der Strahlweite  $\omega(Z)$  von den Größen:

- Divergenzwinkel
- Durchmesser des Rohstrahls auf der Fokussierlinse
- Abstand der Fokussierlinse von der Strahlquelle

Mit diesen Untersuchungen soll ein Optimierungspotenzial bei der Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe aufgezeigt werden. Beim Einzelpuls- oder dem Perkussionsabtrag, zum Beispiel, beeinflusst die Strahlweite den Querschnitt der Löcher und die Rayleighlänge ist für die Geometrie entlang der Bohrachse sowie das mögliche Aspektverhältnis verantwortlich. Die Kontrolle dieser Parameter ermöglicht die

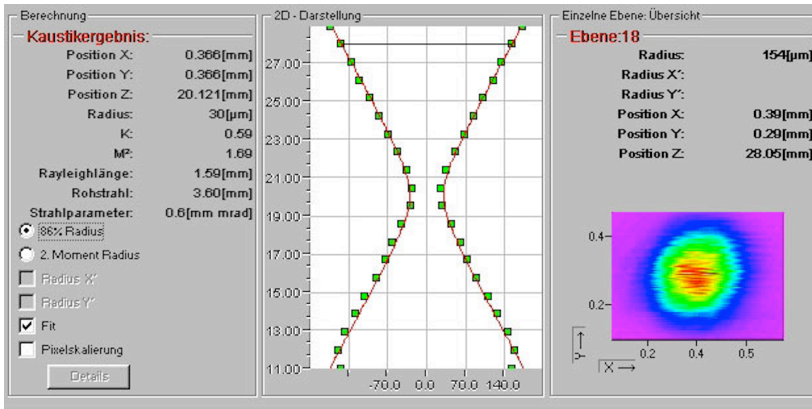


Abbildung 5.21: Auswertung des Fokusmonitors

Einflussnahme auf die Form der herzustellenden Strukturen, z. B. die Flankenwinkel oder Konizität. Der Aufbau des hier eingesetzten optischen Systems ist in Bild 5.22 skizziert.

Die Grundlage zur Strahlformung liefert ein Teleskop in Galilei-Ausführung, d. h. ohne Zwischenfokus. Für die Untersuchungen wäre auch ein Teleskop nach Kepler, also mit Zwischenfokus verwendbar, jedoch können bei hohen Leistungen, wie sie für die Metallbearbeitung erforderlich sind, in dem Zwischenfokus so hohe Leistungsdichten entstehen, dass ein Luftdurchbruch auftritt, der die eingestrahelte Leistung verzehren würde. Mit Hilfe des Teleskops kann durch die Änderung des Linsenabstandes die Divergenz der Strahlung und damit die Strahlausbreitung maßgeblich beeinflusst werden.

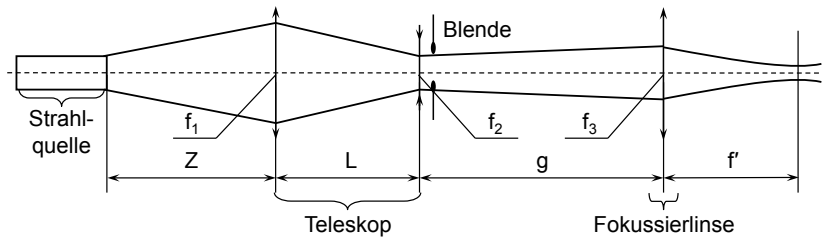
Das Teleskop besteht aus zwei Linsen der Brennweite – bei  $\lambda = 1.064 \text{ nm}$  (Nd:YAG Laser) –  $f_1^{1.064} = 222,4 \text{ mm}$  (LINOS 031682 329) und  $f_2^{1.064} = -51,4 \text{ mm}$  (LINOS 063871 329). Die resultierende Brennweite des Teleskops ergibt sich zu  $f = f_1 + f_2$ ; hier:  $f = 222,4 \text{ mm} - 51,4 \text{ mm} = 171 \text{ mm}$ .

Die Blende dient als abzubildendes Objekt in der Projektion.

In den Experimenten fokussiert eine Linse der Brennweite  $f^{1.064} = 214,5 \text{ mm}$  (LINOS 312289) die Laserstrahlung.

Für die Untersuchungen zur Strahlformung wird der bereits erwähnte Nd:YAG-Laser – Spectron SL 902 TQ – im cw-Mode bei TEM<sub>00</sub> eingesetzt. Der Güte-Schalter muss während der Versuche mit dem Fo-





**Abbildung 5.22:** Schema des optischen Aufbaus

kusmonitor deaktiviert werden, da die Leistung der gepulsten Strahlung den Sensor des Fokusmonitors beschädigen kann.

Die zentrale Rolle bei der Strahlformung übernimmt, wie schon vorher angemerkt, das Galilei-Teleskop. Die vollständige Beschreibung des gesamten optischen Aufbaus erfordert noch die Angabe der Positionen der einzelnen Elemente:

- $Z$ , der Abstand zwischen Laser und Teleskopeintritt:  $Z = 2,6$  m
- $L$ , Abstand der Teleskoplinsen
- $d$ , der Durchmesser der Blende
- $g$ , Gegenstandsweite; hier: der Abstand zwischen der Blende und der Fokussierlinse:  $g = 2,3$  m

Die Schrittweite, mit der der Abstand der Teleskoplinsen zwischen den Messungen verändert wird, beträgt 2 mm, wobei die Messungen jeweils vom größten Linsenabstand zum kleinsten durchgeführt werden. Außerdem wird jede Einstellung dreimal vermessen, um Fehler einzugrenzen.

Eine ähnliche Einflussnahme ist durch Änderung der Gegenstandsweite  $g$  zu erzielen. Hier wird der Abstand der Teleskoplinsen fest auf  $L = 170$  mm eingestellt, die Schrittweite für  $g$  beträgt dann 0,1 m von  $g = 2,3$  m bis  $g = 1,2$  m. Auch bei diesen Einstellungen werden die Strahlgrößen je dreimal bestimmt.

Die im Anhang – Tabelle B.2 bis Tabelle B.6 – zusammengefassten Messwerte entstammen alle den Messungen mit dem Fokusmonitor, mit Ausnahme der Divergenz. Ihre Berechnung erfolgt nach:

$$\alpha = \frac{D - d}{g} \quad (5.3)$$

mit  $D$ : Strahlweite, d. h. in diesem Fall der Durchmesser der Laserstrahlung auf der Fokussierlinse;  $d$ : Durchmesser der Blende;  $g$ : Gegenstandsweite; hier: Abstand zwischen Blende und Fokussierlinse

## 5.3 Analyseverfahren

**Mikroskopie** Das Standardanalyse- und Dokumentationsmittel ist die Mikroskopie, sei es mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) oder mit dem Lichtmikroskop.

**EDX-Analyse** Zum Nachweis von Oberflächenkontaminationen beim Laserglätten kommt eine EDX-Analyse im Rasterelektronenmikroskop zum Einsatz. Dabei handelt es sich überwiegend um qualitative Messungen, da mit der EDX-Analyse gerade leichte Elemente wie O, N, C nicht verlässlich quantitativ erfassbar sind [HUNGER, 1995].

**Bestimmung der Abtragate** Das Volumen zur Berechnung der Abtragate wird indirekt ermittelt, da Volumina tieferer Strukturen oder von Geometrien mit Substrukturen messtechnisch nur schwer zugänglich sind. Hierzu wird nach der Reinigung der Proben im Ultraschallbad die abgetragene Masse mittels Differenzwägung bestimmt und mit der bekannten Dichte der verwendeten Werkstoffe verknüpft. Vergleichende Untersuchungen an einfachen und damit auch im Mikroskop gut zu vermessenden Strukturen zeigen, dass die so ermittelten Daten gut mit den direkt gemessenen Volumina übereinstimmen. Schließlich werden die berechneten Volumina mit der jeweiligen Prozesszeit korreliert und damit die Abtragate festgelegt.

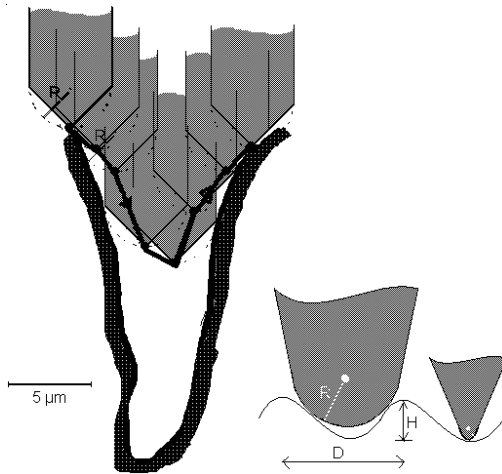
**Metallografische Untersuchungen** An ausgewählten Proben werden Schliche erstellt, die zur Dokumentation dienen. Aufgrund des mechanischen Abtragens beim Schleifprozess können Veränderungen der gefertigten Strukturen nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere bei den duktilen Werkstoffen, Aluminium und Kupfer, besteht die Gefahr, Material in die Geometrie einzutragen und damit die erzeugte Gestalt

zu „verwischen“. Daher beschränkt sich bei den quantitativen, metallografischen Untersuchungen die Probenauswahl vorwiegend auf tiefere Abtragstrukturen; hier kann mit einem kleineren Fehler durch Verschleifen gerechnet werden. Zur vollständigen Beschreibung der Strukturen bei geringen Abtragtiefen – bis ca. 100  $\mu\text{m}$  – stehen Profilometer, Weißlichtinterferometrie (WLI) sowie ein optisches Topographiemesssystem zur Verfügung.

**Oberflächenanalyse - Topographie** Die Auswertung der im Verlauf der Untersuchungen erzeugten Geometrien wird neben der o. g. Licht- und Rasterelektronenmikroskopie mit taktilen Oberflächenmessgeräten – Dektak der Firma Veeco sowie Perthometer der Fa. Mahr – und optischen – Weißlichtinterferometrie (WLI), z. B. Nemesis V von Jurca, jetzt Precitec-Optronics – durchgeführt.

Für einfache Analyseaufgaben, wie eine erste qualitative Charakterisierung der Strukturen, für die Breitenmessung der erzeugten Linien und zur Dokumentation, sind das Lichtmikroskop und das REM ausreichend. Die Tiefenmessung dagegen ist mit dem REM gar nicht und mit dem Lichtmikroskop nur in begrenztem Maße möglich. Die hergestellten Spuren sind teilweise von so geringer Tiefe, dass an ihnen lediglich Rauheitsmessungen mit einem Profilometer oder auf interferometrischem Wege vorgenommen werden können. Bei dem System Dektak kann die Messstrecke in einem weiten Bereich, von wenigen  $\mu\text{m}$  bis zu einigen mm, variiert werden. Beim WLI wird die Messfläche durch das verwendete Objektiv vorgegeben. Vorteilhaft ist, dass mit einer Messung nicht nur ein Linienprofil aufgenommen, sondern ein 3D-Scan durchgeführt wird. Somit kann ein genaues Abbild der Oberfläche wiedergegeben werden. Darüber hinaus ermöglicht die umfangreiche Software eine Datenaufbereitung.

Beim Einsatz des Profilometers ist außerdem zu beachten, dass die Abtastnadel dessen laterales Auflösungsvermögen begrenzt. Durch die Größe der Abtastnadel bedingt, kann bei steilen Profilen und spitz zulaufenden Geometrien das Messergebnis von der tatsächlichen Struktur abweichen, vgl. Bild 5.23. Messtechnisch kann so nur ein Aspektverhältnis von 0,5 erfasst werden. Die zur Verfügung stehende Nadel mit einem Radius von 2,5  $\mu\text{m}$  erlaubt noch die Analyse von Kerben mit 5  $\mu\text{m}$  Breite und 2,5  $\mu\text{m}$  Tiefe. Kleinere Strukturgrößen werden nicht korrekt wieder gegeben.



**Abbildung 5.23:** Einfluss der Abtastnadel

Zur näheren Bestimmung der Leistungsgrenzen des Profilometers wird dieses Gerät mit dem WLI verglichen. Bild 5.24 und Bild 5.25 zeigen hierzu die Profilkurven der beiden Messsysteme für die gleiche Bearbeitungsspur. Deutlich ist in der Profilkurve des Dektaks die geringere Weite des Grabens, jedoch auch eine größere Breite der Aufwürfe zu erkennen. Darüber hinaus ist die Höhe des mit dem Dektak ermittelten Profils gestaucht. Auch der Vergleich mit Messungen aus dem Mikroskop bestätigt diese Ergebnisse. Die Messwerte von Mikroskop und WLI stimmen überein. Für Messungen der Geometrie, z. B. der Flankensteilheit, wird daher das WLI eingesetzt.

**Statistische Versuchsplanung** Zur systematischen Untersuchung des Abtragprozesses wird die statistische Versuchsplanung eingesetzt, da die interessierenden Zielgrößen, wie Abtragrate und Rauheit, von einer Vielzahl Faktoren abhängig sein können.

Die statistische Versuchsplanung nutzt die definierte Variation von Prozessvorgaben mit dem Ziel, deren Wirkungen auf die Prozessergebnisse besser zu verstehen. Hierzu werden nicht, wie sonst üblich, einzelne Einflussparameter geändert, wobei letztlich ein auf Versuch und Irrtum basierendes optimiertes Ergebnis erzielt wird. Vielmehr erfolgt eine gleichzeitige Variation mehrerer Einflussgrößen nach bestimmten

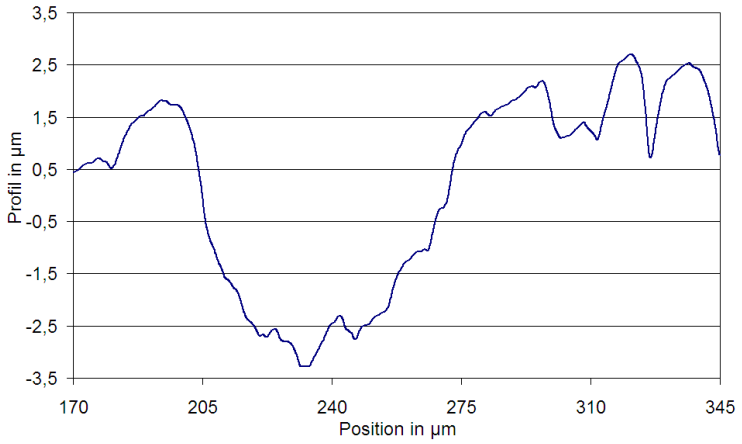


Abbildung 5.24: Taktiles Messsystem

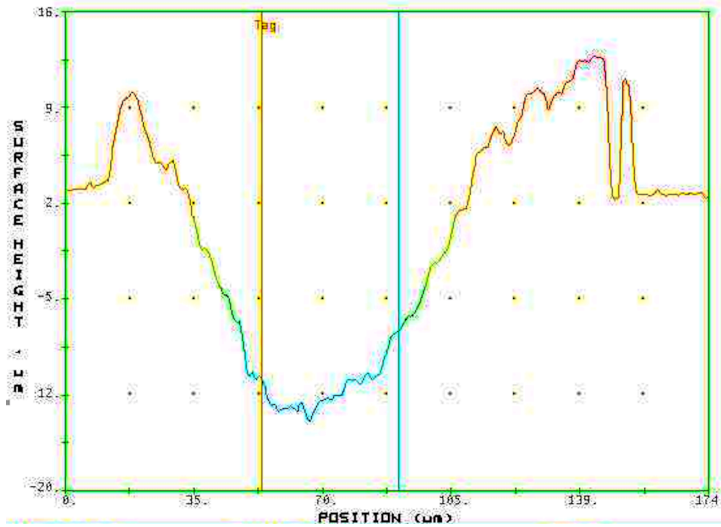


Abbildung 5.25: Optisches Messsystem

prozessspezifischen Vorgaben, um unter Anwendung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen nachvollziehbare Auswirkungen auf die Zielgrößen zu erkennen.

Diese Methode reduziert die Anzahl der notwendigen Versuchsreihen zumindest beim Einsatz des KupferdampfLasers erheblich, da hier Pulsleistung und Pulsenergie fest mit der Pulsfolgefrequenz-unabhängigen Pulsdauer verknüpft sind. Bei der Verwendung des Nd:YAG-Lasers eignet sich das Verfahren jedoch nur eingeschränkt, da die Parameter nicht in ausreichendem Maße unabhängig von einander eingestellt werden können – siehe hierzu Abschnitt 5.1.3. Jedoch bestätigen die Untersuchungen für beide Lasertypen die relevanten Prozessparameter.

Für die umfangreichen statistischen Analysen dieses Verfahrens wird eine am BIAS mitentwickelte Software zur Ermittlung signifikanter Schweißparameter genutzt. Jedoch ist sie an die spezifischen Anforderungen der Mikromaterialbearbeitung mit kurz-gepulsten Lasern anzupassen. Die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung sollen an dieser Stelle nicht behandelt werden. Sie sind in zahlreichen Werken veröffentlicht, z. B. [DIETRICH & SCHULZE, 1998].

**Simulation** Zur Unterstützung bei der Modellbildung und zur Entwicklung eines allgemeinen Verständnisses der Prozesse werden Simulationsbetrachtungen durchgeführt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Darstellung der Auswirkungen durch die laterale Pulsüberlagerung. Allerdings beschränken sich die Untersuchungen auf einen Gaußschen Strahl, da seine Transformation durch eine fokussierende Optik selbstähnlich ist, also stets wiederum zu einem Gaußschen Strahl führt. Für andere Intensitätsverteilungen ist die Entwicklung einer geeigneten Wertemenge, die letztlich eine Aussage liefert, die auch dem Vergleich mit realen Abtragergebnissen Stand hält, zu komplex.

## 5.4 Untersuchte Werkstoffe

Die grundlegenden Abtraguntersuchungen werden an technisch reinem Aluminium, Kupfer, Nickel und Titan durchgeführt. Diese Metalle zeichnen sich durch stark differierende physikalische Eigenschaften aus – siehe Tabelle 5.3 –, die zu unterschiedlichem Abtragverhalten führen. Die Korrelation der werkstofflichen Kennwerte mit den Ergebnissen des Abtrags soll als Grundlage zur Anpassung der Prozessstrategien für

optimale Bearbeitungsergebnisse auch bei unterschiedlichen Werkstoffen dienen, z. B. an Warmarbeitsstahl wie Werkstoffnummer 1.2343, der für den Formenbau in der Kunststoffspritzgusstechnik eingesetzt wird.

**Tabelle 5.3:** Physikalische Eigenschaften der technisch reinen Metalle

Eigenschaft	Al	Cu	Ni	Ti
Dichte $\rho$ in g/cm <sup>3</sup>	2,70	8,93	8,91	4,15
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_w$ in W/cm K	2,20	3,99	0,91	0,22
Schmelztemperatur $T_S$ in °C	660	1.083	1.453	1.725
Siedetemperatur $T_V$ in °C	2.450	2.590	2.800	3.300
Verdampfungs- enthalpie $H_V$ in J/g	10.900	4.790	6.480	8.980
Reflexionsgrad $R$ in % bei RT*)				
für $\lambda = 1.064$ nm	~ 90	~ 99	~ 70	
für $\lambda = 532$ nm	~ 90	~ 60	~ 60	

\*) nach [HUMMEL, 1971], sonst nach [KUCHLING, 2007]

## 5.5 Durchführung der Abtraguntersuchungen

Allen Abtraguntersuchungen, sei es zur Ermittlung der Parameterabhängigkeiten oder für die Entwicklung von Bearbeitungsstrategien, liegt das Schema aus Bild 5.26 zu Grunde.

Ausgehend von einer Bauteilvorgabe erfolgt die Vorauswahl der Bearbeitungsparameter aufgrund von Erfahrungswerten. Im Falle grundlegender Untersuchungen ist dieser Teil zunächst hinsichtlich der Erfahrung eingeschränkt bzw. die Bauteilvorgaben entfallen. Das weitere Vorgehen gliedert sich jedoch immer in Untersuchungen mit variierten Parametern des Lasers, der Handhabung oder der Prozessstrategie. Dabei treten Interkorrelationen der verschiedenen Parameter auf, z. B. zieht eine Änderung der Pulsfolgefrequenz eine Anpassung der Ablenkgeschwindigkeit nach sich oder der Überlappgrad ändert sich. Diese Verknüpfung der verschiedenen Parameter führt aufgrund von Permutationen zu einer sehr großen Parametermatrix, die sich gegebenenfalls durch eine statistische

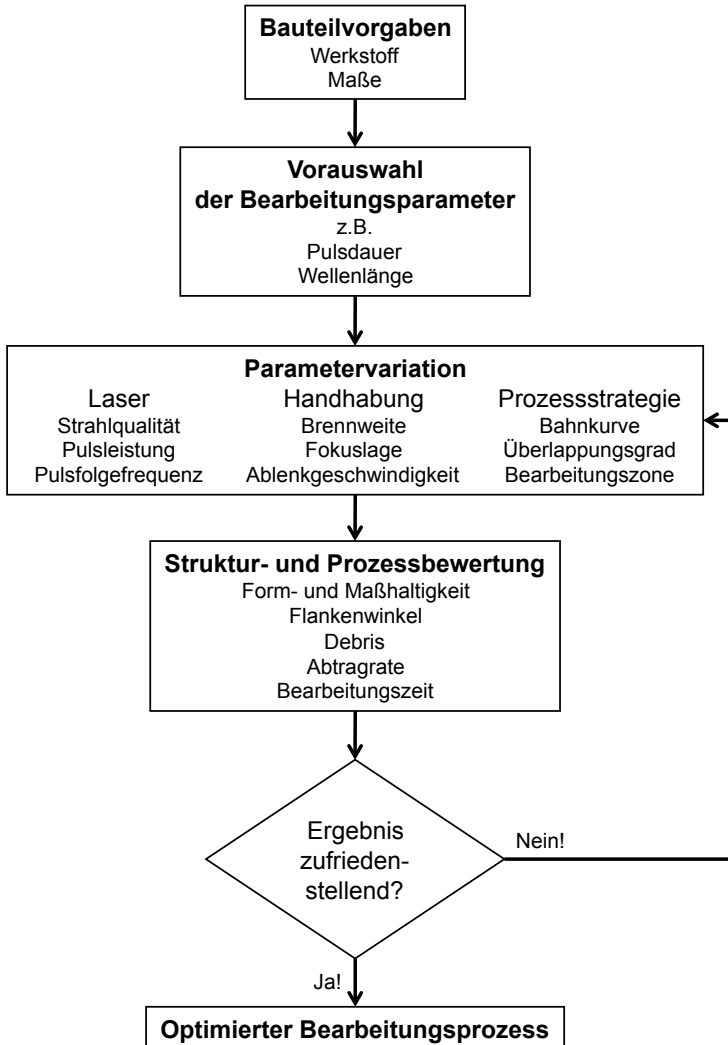


Abbildung 5.26: Schema der Prozessoptimierung



Versuchsplanung, siehe Abschnitt 5.3, eingrenzen lässt. Die Schleife in Bild 5.26 wird schließlich so lange durchlaufen, bis genügend Daten für eine mathematische Beschreibung der zu untersuchenden Zusammenhänge vorhanden sind oder, wie dargestellt, der Bearbeitungsprozess entsprechend optimiert ist.

### 5.5.1 Sacklöcher und Durchbrüche

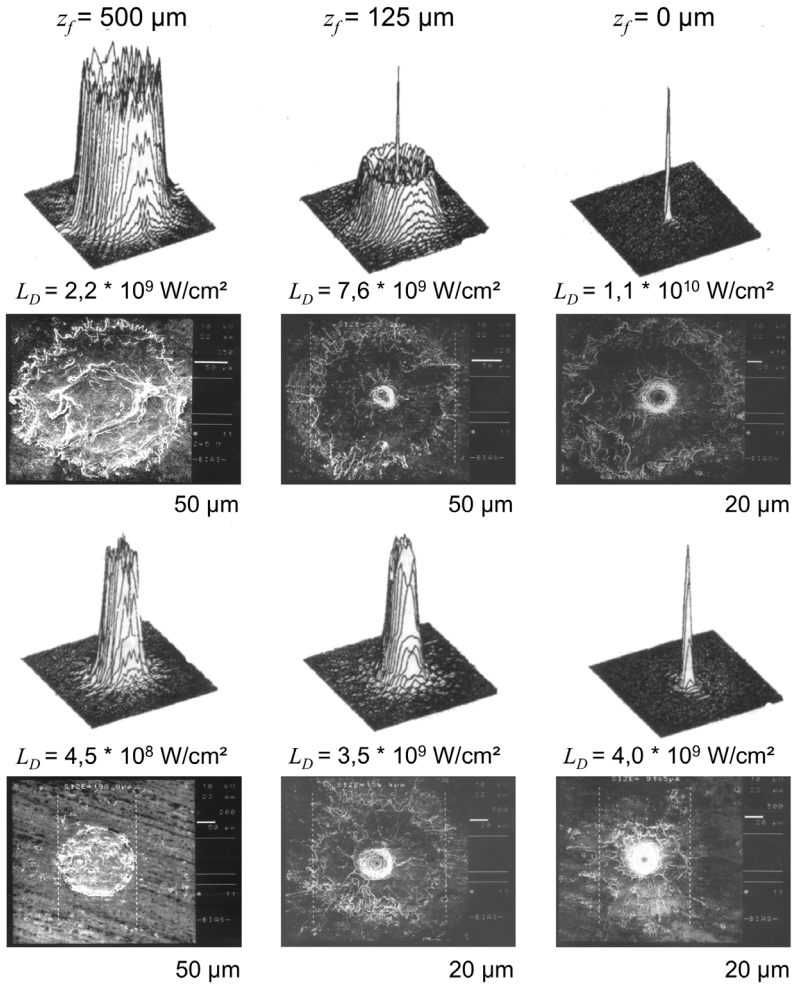
**Einzelpulsabtrag** Da die Abhängigkeiten beim Einzelpulsabtrag mit ns-Laserpulsen als bekannt anzusehen sind, z. B. [KOCH, 1996], beschränken sich die Untersuchungen hierzu auf die spezifische Ausdehnung der Bearbeitungszone eines einzelnen Pulses. Für das Auflösungsvermögen und die Qualität ist, wie Bild 5.27 verdeutlicht, nicht der Fokusedurchmesser entscheidend, sondern die Zone, die durch den Laserpuls beeinträchtigt wird. So liefert der im CVL eingesetzte instabile *off-axis*-Resonator im Rohstrahl ein *top-hat*-Profil, das durch Fokussierung zu einer Intensitätsverteilung mit einer sinc-Funktion<sup>1</sup> – Graphen oberhalb der Abtraggilder – transformiert. Sie beeinflusst den Abtrag eines einzelnen Pulses erheblich. Zudem hängt sie von der Fokusslage, d. h. vom Abstand der Strahltaile zur Werkstückoberfläche ab: Liegt der Fokus auf der Blechoberfläche ( $z_f = 0$  mm), erreicht die Intensität einen Peak, der zu einer tiefen Kavität mit schmalen Eintritt führt. Mit zunehmendem Abstand zur Fokusebene verschwindet dieser Peak und die Wechselwirkung wird lateral.

Die Bearbeitungszone ist somit der Bereich der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Material unter Berücksichtigung der Wärmeleitung. Sie kann bei niedriger Leistungsdichte kleiner und bei hohen Leistungsdichten größer als der Strahlquerschnitt sein, vgl. Bild 5.28. Die Kenntnis der spezifischen Bearbeitungszone und ihrer Abhängigkeiten ist daher von zentraler Bedeutung für jede Form des Abtrags, insbesondere aber für den flächigen Abtrag, da Überlapp und Versatz, also die Pulsüberlagerung entlang der Hauptbewegungsrichtung und senkrecht dazu, entsprechend der Bearbeitungszone eingestellt werden.

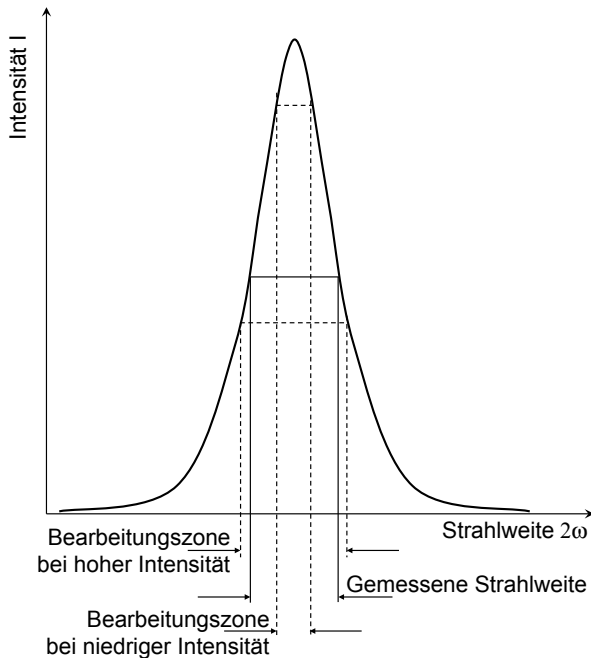
**Perkussionsabtrag** Der Perkussionsabtrag an Metallen mit kurzgepulster Laserstrahlung ist, wie auch der Einzelpulsabtrag, bereits gut erforscht, so dass auch hier grundlegende Untersuchungen nicht

---

<sup>1</sup>sinc-Funktion (Sinus-cardinalis): Bezeichnet eine reelle Funktion, die die stetige Fortsetzung des Sinus dividiert durch sein Argument liefert.



**Abbildung 5.27:** Einfluss der Intensitätsverteilung



**Abbildung 5.28:** Definition der Bearbeitungszone

notwendig sind. Jedoch stellt die Fertigung von Multilochblechen mit Tausenden Löchern besondere Anforderungen an die Strahlquelle und die Handhabung. Außerdem erfordert das Interesse an einer gleich bleibenden Qualität der Löcher Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit. Hierzu werden die Einflüsse einer direkten Absaugung am Abtragort sowie bei einer Beaufschlagung mit Druck auf Bearbeitungszeit und -qualität untersucht.

Zur direkten Absaugung wird eine Cross-Jet-Düse (Bild 5.29) eingesetzt, deren Wirkung die Laserlichtschnittaufnahme [DIERKEN, 1996] in Bild 5.30 demonstriert. Deutlich ist zu erkennen, wie das abgetragene Material von der in den Strahlengang eingebrachten Düse angezogen wird. Bei der Querstromdüse wird ähnlich einer Wasserstrahlpumpe durch eine Querströmung, hier allerdings eines Gases, ein Unterdruck erzeugt, der zum Absaugen genutzt werden kann.

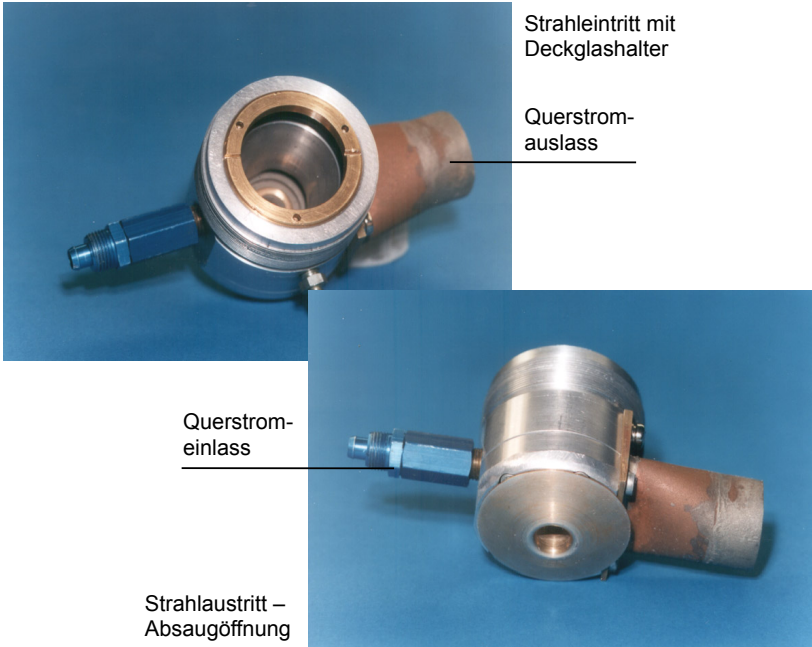


Abbildung 5.29: Cross-Jet-Düse

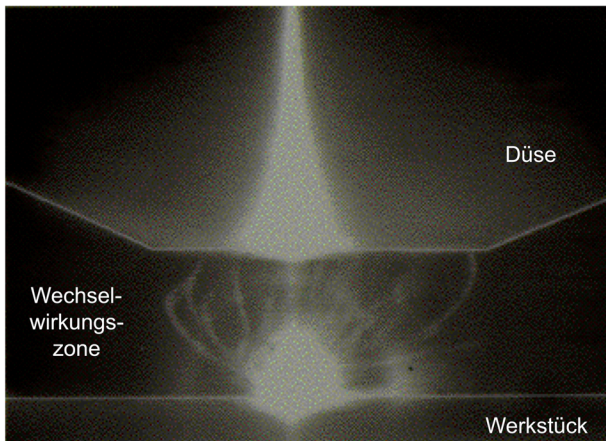
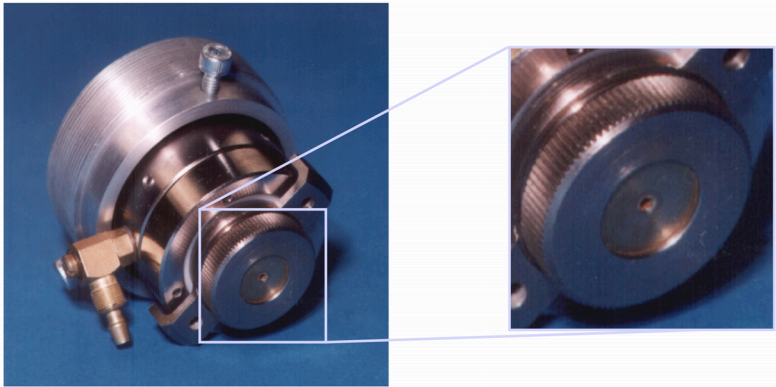
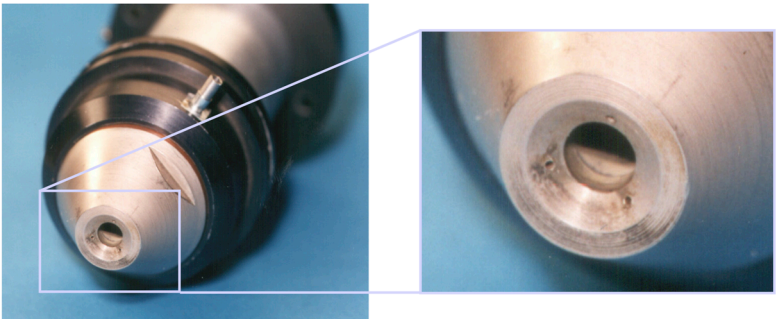


Abbildung 5.30: Wirkung des Cross-Jets [DIERKEN, 1996]



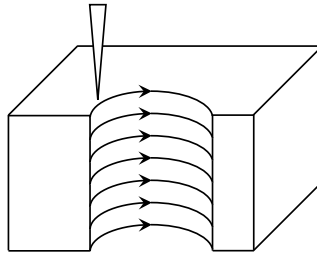
**Abbildung 5.31:** Einlochdüse



**Abbildung 5.32:** Dreilochdüse

Bei der Druckbeaufschlagung werden Ergebnisse zum Einsatz einer Einlochdüse – Bild 5.31 – die einen Gasstrom direkt in das entstehende Bohrloch lenkt, und einer Dreilochdüse – Bild 5.32 – bei der schräg stehende Düsenöffnungen einen verwirbelten Gasstrom in das sich bildende Loch blasen, erarbeitet. Die Bewertung der Qualität erfolgt im Licht- bzw. Rasterelektronenmikroskop. Zusätzlich wird die Bohrzeit bei diesen Versuchen mit einer unter den Proben angebrachten Photodiode gemessen, deren Signal durch ein Speicheroszilloskop aufgezeichnet wird.

Ergänzende Untersuchungen beim Perkussionsabtrag widmen sich dem bisher nur wenig beachteten Einfluss der Strahlform auf die Geometrie der Löcher.



**Abbildung 5.33:** Prinzip des Wendelabtrags

**Laserstrahlwendelbohren** Das Laserstrahlwendelbohren ergibt sich zwangsläufig beim Einsatz fokussierter Strahlung von Kurz-Pulslasern, wenn Löcher erzeugt werden sollen, deren Durchmesser größer ist als der Laserstrahl. Dennoch sind die Wirkmechanismen bei einer derartigen Art des Abtrags zumindest an Metallen bislang kaum untersucht. Bild 5.33 verdeutlicht daher noch einmal die Prozessführung: Die fokussierte Laserstrahlung hoher Pulsfolgefrequenz wird mit einer schnellen Strahl- ablenkeinheit, z. B. einem Galvanometerscanner, entlang des Umrisses der gewünschten Kontur über die Oberfläche des Werkstücks geführt. Mehrfaches Überfahren des selben Bereichs bewirkt schließlich einen Schnittspalt; das abgetrennte Material fällt heraus.

Die Untersuchungen beim Wendelabtrag konzentrieren sich auf die Erarbeitung grundlegender Daten, die eine Modellierung des Mechanismus erlauben. Schwerpunkt ist daher der Einfluss der Pulsfolgefrequenz, des Überlappgrades, der Kreisgeschwindigkeit und die zum Heraustrennen des Materials benötigte Energie.

## 5.5.2 Formabtrag

Wie schon der Wendelabtrag, so ist auch der Formabtrag an Metallen mit kurz-gepulsten Lasern bisher kaum erforscht. Daher befassen sich die Versuche zum flächigen Abtragen zunächst mit einer allgemeinen Beschreibung des Abtragverhaltens bei der Überlagerung einer Vielzahl von Pulsen. Aber auch die Zusammenhänge der Parameter mit dem Bearbeitungsergebnis, wie Abtragraten und Rauheit, werden untersucht. Systematische Experimente, Grundlage der statistischen Versuchsplanung, dienen als Basis für eine Modellierung des Prozesses.

### 5.5.3 Laserglätten

Die Ergebnisse beim Formabtrag, insbesondere die Korrelation energetischer Parameter mit der Qualität der erzeugten Strukturen, legen trotz optimierter Prozesse eine Nachbehandlung nahe. Um der Zielstellung dieser Arbeit gerecht zu werden, wird daher untersucht, ob und wie die Bearbeitung in einer Aufspannung zu realisieren ist, um damit die Möglichkeiten der eingesetzten Laser besser zu nutzen. Insbesondere die kontinuierliche Anregung des Nd:YAG-Lasers mit Güte-Schalter erweist sich hier als Vorteil. Mit ihm kann sowohl der Abtrag mit gepulster Strahlung als auch, nach Umschalten in den cw-Betrieb, eine Glättung der Strukturen durch Umschmelzen erreicht werden.





# Kapitel 6

## Charakterisierung der Einzelprozesse

### 6.1 Strahlausbreitung

#### 6.1.1 Experimentelle Strahleigenschaften

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss der Pulsleistung beim Perkussionsbohren mit dem Kupferdampfaser – siehe auch Abschnitt 6.2 – offenbaren erste experimentelle Erkenntnisse zu möglichen Auswirkungen des optischen Systems und damit der Strahlausbreitung auf das Bearbeitungsergebnis.

Der Aufbau des Kupferdampfasers als MOPA-Kette gestattet es, zwischen verschiedenen Verfahren der Leistungseinstellung zu wählen. Einerseits kann die Leistung durch Hinzu- oder Wegschalten eines oder mehrerer Verstärker variiert werden, ohne die Strahleigenschaften zu verändern. Andererseits besteht auch die Möglichkeit den Laserstrahl durch den Einsatz von Blenden und optischen Filtern – Keilplatten – zu manipulieren. Während über die Verstärker nur eine grobe Leistungsskalierung gelingt, erlaubt die Variante mit Blenden und Filtern auch eine Feinjustage. Somit ist es möglich, die Laserleistung in einem weiten Bereich einzustellen. Durch die Kombination der Verfahren kann außerdem eine vorgegebene Pulsleistung durch jeweils zwei unterschiedliche Linsenausleuchtungen realisiert werden. Bild 6.1 zeigt hierzu die Strahlaustrittsseite von Bohrungen in Titan (Dicke  $s = 0,75$  mm). Dort

sind die Bohrungsausstritte der jeweiligen Pulsleistung und der entsprechenden Linsenausleuchtung zugeordnet. Die Ausleuchtung der Linse ist hier als F-Zahl, dem Quotienten aus Brennweite und Strahldurchmesser auf der Linse, aufgezeichnet, so dass gilt: Je kleiner die F-Zahl, desto größer ist der Strahlquerschnitt auf der Linse. In der Darstellung ist daher zu einer Pulsleistung jeweils rechts die Bohrung zu sehen, bei der die Ausleuchtung geringer war.

Dem in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten telezentrischen Modell folgend müsste die größere Linsenausleuchtung zu einer besseren Fokussierung, d. h. zu einem kleineren Strahlquerschnitt im Fokus, respektive einem kleineren Austrittsdurchmesser der Bohrungen, führen. Jedoch zeigen alle Austrittsöffnungen nur einen von der Pulsleistung abhängigen, mehr oder weniger runden Querschnitt, obwohl die Linsenausleuchtung je nach eingestellter Leistung um 40 % bis 75 % variiert. Offensichtlich genügt die verwendete Laserstrahlung mit  $M^2 \approx 16$  nicht den Anforderungen des Modells. Zwar könnte das top-hat-Profil der einfallenden Laserstrahlung die Forderung nach einer homogenen Ausleuchtung der optischen Elemente erfüllen, insbesondere bei vollständiger Nutzung des freien Querschnitts der Fokussierlinse. Jedoch tritt dann eine deutliche Formabweichung auf, wie die Bohrung ( $F = 3,33$ ,  $P_P = 85 \text{ kW}$ ) oben links im Diagramm belegt. Hier treten Abbildungsfehler auf, die das Strahlprofil insoweit stören, dass auch das Bearbeitungsergebnis beeinträchtigt wird. Diese Aberrationen werden in Abschnitt 6.1.2 näher beleuchtet.

Ein weiterer Einfluss auf den Strahlquerschnitt ist nicht zu erkennen. Allerdings führt der Einsatz der Filter zur Leistungseinstellung zu einer Störung des Abtragprozesses: Bei kleinerer F-Zahl ist jeweils ein ausgeprägter Saum von  $\text{TiO}_2$  zu erkennen. Diese Abweichungen können nicht weiter eingegrenzt werden. Bei den anschließenden Versuchen, auch zum Perkussionsbohren, wird daher das in Abschnitt 5.1.3 vorgestellte System mit Abschwächer und Kompensatorplatte zur Leistungseinstellung verwendet, so dass derartige Störungen nicht mehr auftreten.

Zur weiteren Klärung der Einsatzmöglichkeiten des telezentrischen Modells bei der Beschreibung der Strahlausbreitung werden zusätzliche Untersuchungen mit dem Nd:YAG-Laser durchgeführt. Im Besonderen gilt es die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Gleichungen auf ihre Gültigkeit bei der verwendeten Laserstrahlung zu überprüfen.

Mit dem experimentellen Aufbau aus Abschnitt 5.2 – siehe Bild 5.22 – zeigt die Divergenz bei festem Abstand der Fokussierlinse das

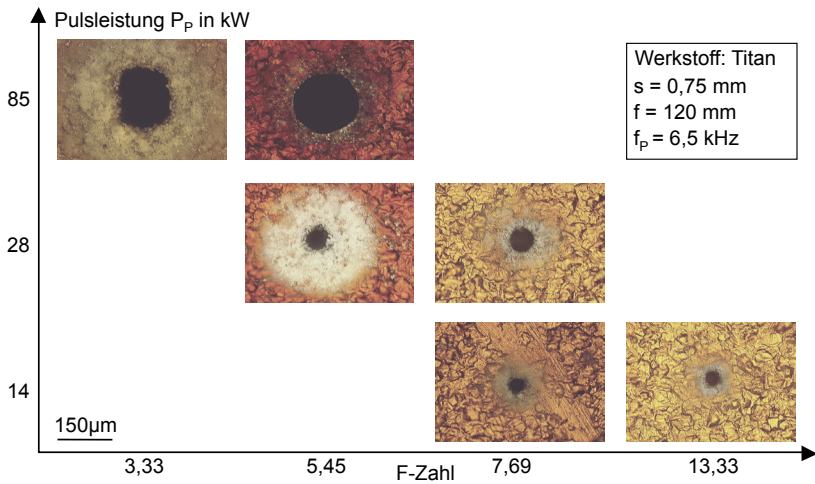


Abbildung 6.1: Einfluss der Linsenausleuchtung beim Bohren

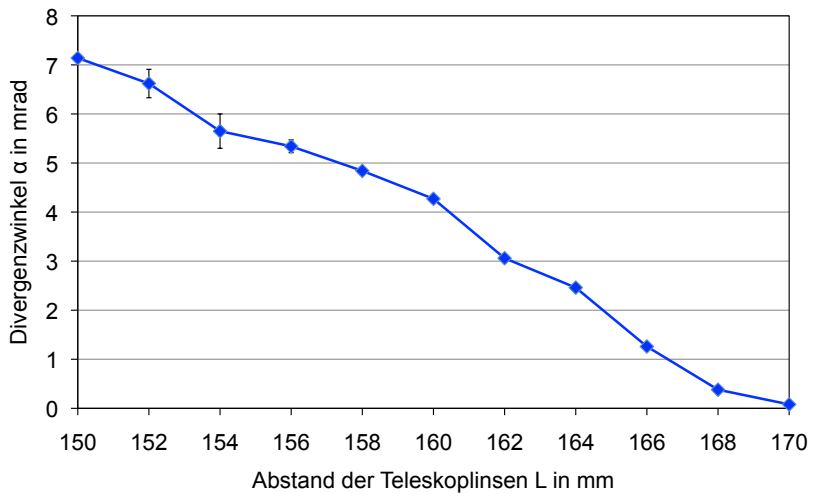
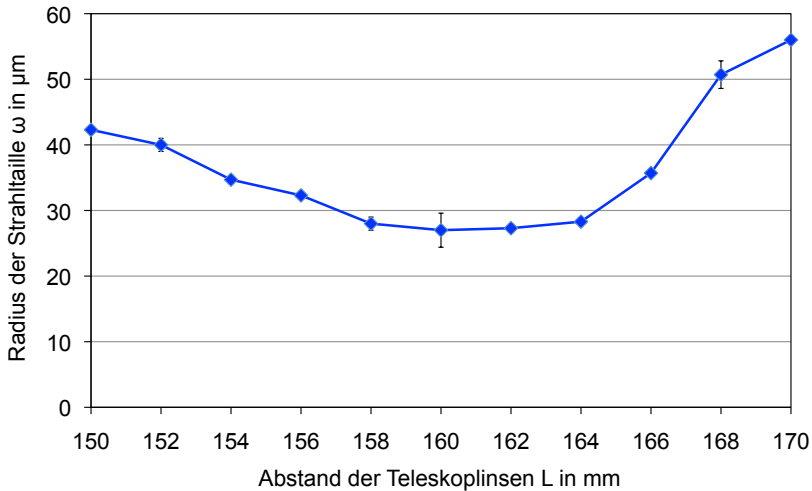


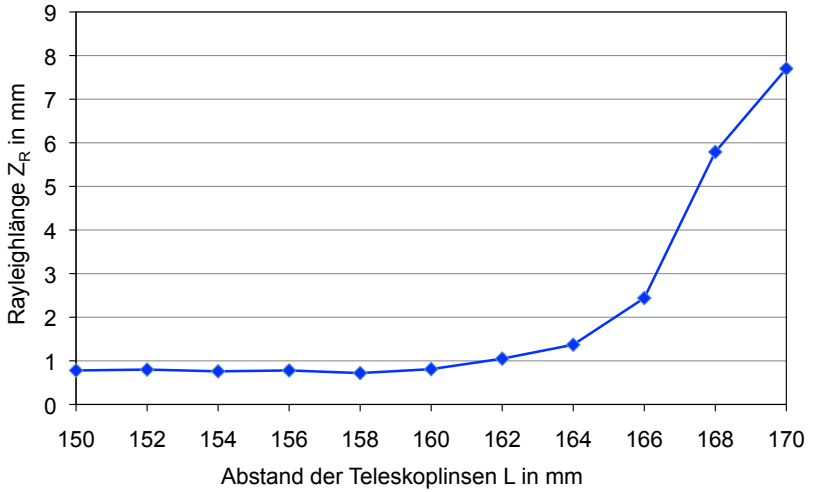
Abbildung 6.2: Einfluss des Teleskoplinnenabstands auf die Divergenz



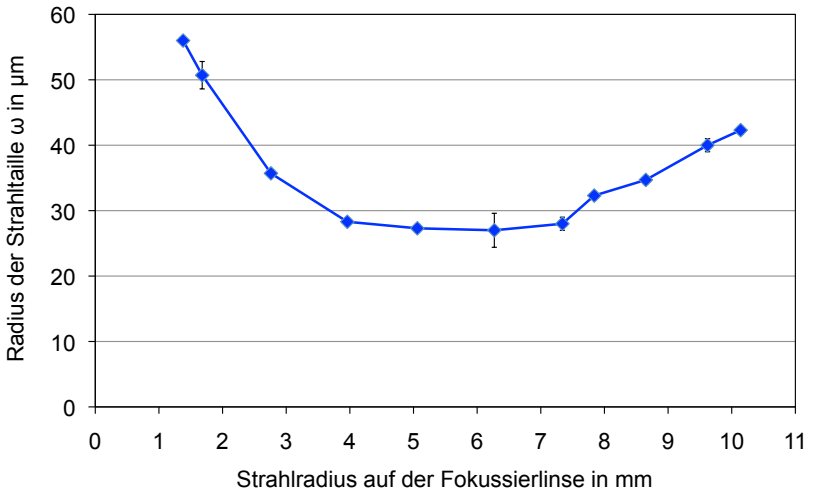
**Abbildung 6.3:** Einfluss des Teleskoplinsenabstands auf die Strahltaille

in Bild 6.2 dargestellte Verhalten. Bei Vergrößerung des Abstands der Teleskoplinsen, d. h. mit abnehmendem Strahlquerschnitt, reduziert sich die Divergenz kontinuierlich. Geringe Abweichungen vom linearen Verlauf, die nicht durch die Fehlerbalken erfasst werden, ergeben sich aus Fehlern bei der Einstellung des Abstands der Teleskoplinsen. Diesem Ergebnis entsprechend sollte unter Beachtung von Gleichung 2.13 der Vergrößerung des Abstands der Teleskoplinsen eine gleichförmige Verkleinerung der Strahltaille folgen. Jedoch ist in Bild 6.3 ersichtlich, dass die Taille nur bis etwa zur Mitte des Einstellbereichs abnimmt, danach steigt sie steil an.

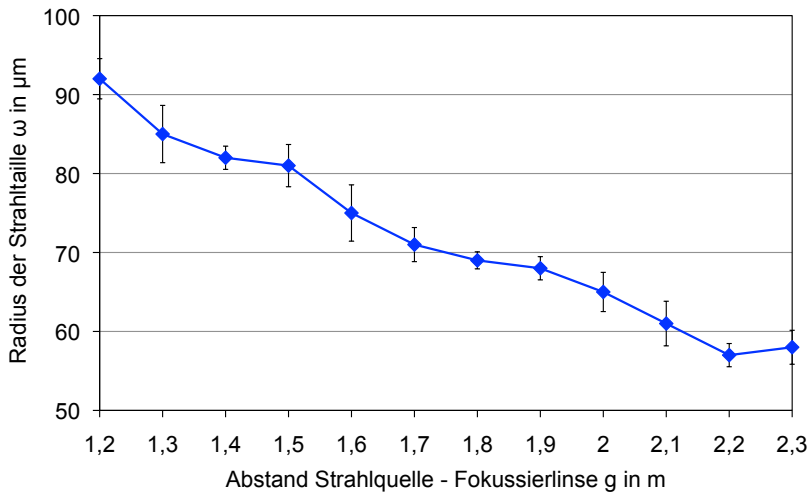
Auch die Rayleigh-Länge (Bild 6.4) wächst bei großem Linsenabstand plötzlich überproportional. Und die Betrachtung der Ausleuchtung der Fokussierlinse bestätigt wiederum nicht die Erwartung aus der telezentrischen Optik: „Eine bessere Linsenausleuchtung bewirkt eine günstigere Fokussierbarkeit“. In Bild 6.5 zeigt sich, dass bei guter Ausleuchtung der Linse – ihr freier Durchmesser beträgt 20 mm – nicht das Optimum, d. h. die kleinste Strahltaille, erzielt wird. Diese liegt etwa in der Mitte des Einstellbereichs und erst bei sehr kleinem Durchmesser des einfallenden Strahls verbreitert sich die Taille deutlich.



**Abbildung 6.4:** Einfluss des Teleskoplinsenabstands auf die Rayleighlänge



**Abbildung 6.5:** Einfluss der Linsenausleuchtung auf die Strahlteile

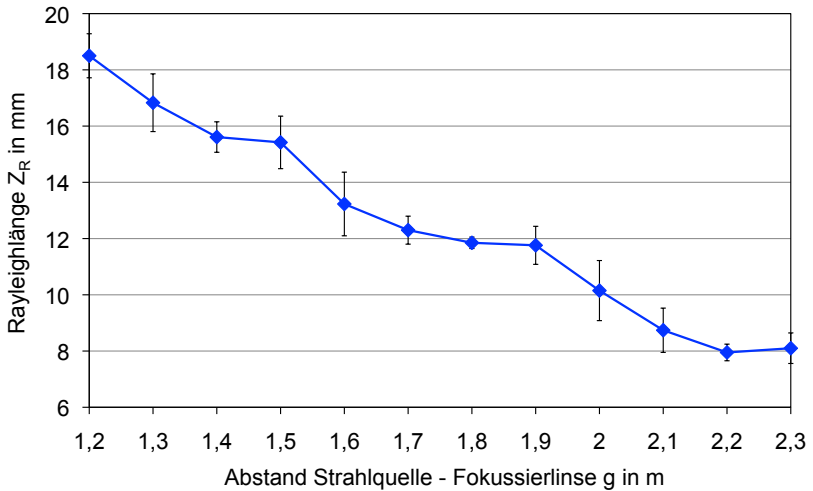


**Abbildung 6.6:** Einfluss des Abstands Strahlquelle-Fokussierlinse auf die Strahltaille

Bei nahezu idealer Ausleuchtung der Linse treten offensichtlich in ihren Randbereichen Störungen auf, die eine optimale Fokussierung verhindern. Solche Fehler können zum Beispiel ein abweichender Krümmungsradius oder Verspannungen aufgrund der mechanischen Linsenspannung sein.

Untersuchungen den Einfluss der Distanz zwischen Strahlquelle und Fokussierlinse bei festem Abstand der Teleskoplinsen (170 mm, d. h. bei geringster Divergenz) betreffend zeigen dagegen keine besonderen Auffälligkeiten. Sowohl die Strahltaille (Bild 6.6) wie auch die Rayleigh-Länge (Bild 6.7) nehmen erwartungsgemäß kontinuierlich mit zunehmendem Abstand zwischen Strahlquelle und Fokussierlinse ab – siehe Tabelle B.2. Aufgrund der größeren Entfernung zwischen Strahlquelle und Fokussierlinse erreicht nur noch Strahlung mit einem niedrigen Divergenzanteil die Linse; die Strahltaille schrumpft – vgl. auch Gleichung 2.13. Gleiches gilt für die Rayleigh-Länge; analog ist Gleichung 2.17 anzuwenden.

Damit bestätigen die Ergebnisse der Untersuchungen zur Strahl- ausbreitung mit dem Nd:YAG-Laser in weiten Teilen die Beobachtungen beim Perkussionsbohren mit dem CVL. Ebenso erhärtet sich der



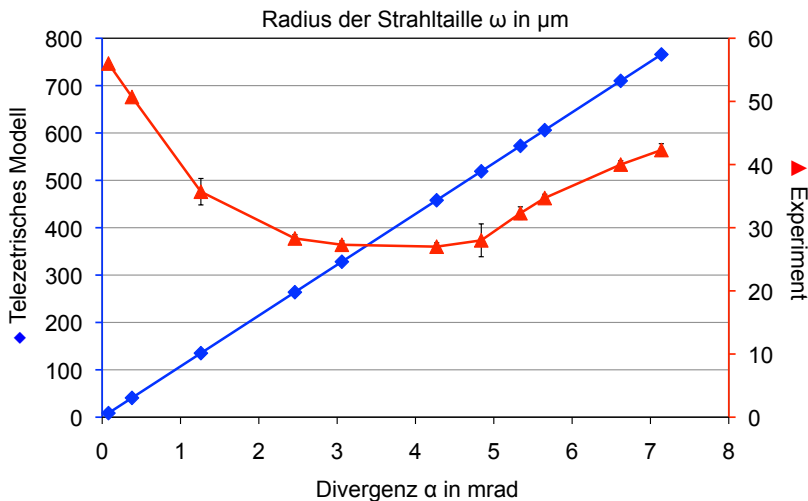
**Abbildung 6.7:** Einfluss des Abstands Strahlquelle-Fokussierlinse auf die Rayleighlänge

Verdacht, dass Aberrationen die Ursache für die dort festgestellten Formabweichungen bei vollständiger Linsenausleuchtung sind.

**Anmerkung** Die Fehlerbalken der oben gezeigten Bilder liegen meist innerhalb der Messpunktmarkierungen, da das Messsystem bei Wiederholung der Messungen faktisch identische Messwerte liefert. Die Fehlerangaben in Bild 6.6 und Bild 6.7 wurden über eine Mittelung der Messwerte von drei benachbarten Abständeinstellungen gewonnen, da hier die größte Fehlerwahrscheinlichkeit aus Ungenauigkeiten beim Einstellen des Abstands resultiert.

### 6.1.2 Vergleich mit dem telezentrischen Modell

Die experimentellen Ergebnisse belegen: Das telezentrische Modell kann nur eingeschränkt zur Beschreibung der Strahlausbreitung der eingesetzten Strahlquellen herangezogen werden. In Bild 6.8 ist zu erkennen, dass die gemessenen Daten erheblich vom telezentrischen Modellfall abweichen und nicht streng Gleichung 2.13 folgen. Irgemäß sollte der Fokusdurchmesser bei abnehmender Divergenz – hier durch Vergrö-

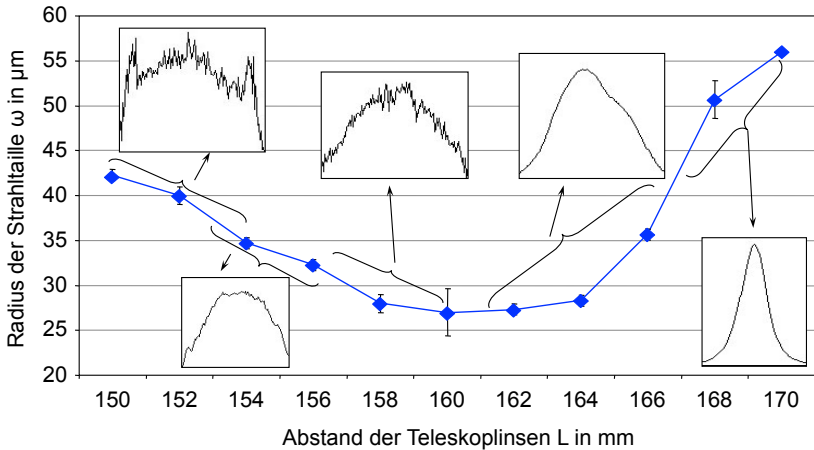


**Abbildung 6.8:** Vergleich zwischen Modell und Experiment

berung des Linsenabstandes im Teleskop – ebenfalls geringer werden. Die Messungen ergeben jedoch, dass der kleinste Strahlquerschnitt mit zunehmendem Abstand der Teleskoplinsen zunächst abnimmt, dann aber wieder anwächst. Darüber hinaus liegen die experimentellen Werte etwa eine Größenordnung unter den theoretischen Erwartungen aus dem telezentrischen Ansatz.

Im betrachteten Fall ergibt sich eher eine Abhängigkeit vom Durchmesser des Laserstrahls auf der Fokussierlinse als von der Divergenz – vgl. Bild 6.5. Der Kurvenverlauf der Strahltaille in Bild 6.9 ist bei einem Abstand der Teleskoplinsen im Bereich von 150 mm bis 160 mm von sphärischen Aberrationen geprägt. Zur Verdeutlichung sind Schnitte der Intensitätsverteilung – jeweils 3 mm oberhalb der Strahltaille mit dem Fokusmonitor gemessen – verschiedenen Kurvenabschnitten zugeordnet. Bei einem Abstand der Teleskoplinsen von 170 mm beginnend ist zu erkennen, dass der Laserstrahl eine Gauß-förmige Intensitätsverteilung über den Querschnitt aufweist. Diese Verteilung behält er in etwa bei, bis die Teleskoplinsen auf 160 mm einander angenähert werden. Mit weiterer Annäherung der Linsen ändert sich das Strahlprofil; es ist nicht länger Gauß-förmig und die Strahltaille vergrößert sich. Wie aus dem „unruhigen“ Intensitätsprofil bei einem Linsenabstand von 152 mm ersichtlich





**Abbildung 6.9:** Sphärische Aberrationen im Experiment

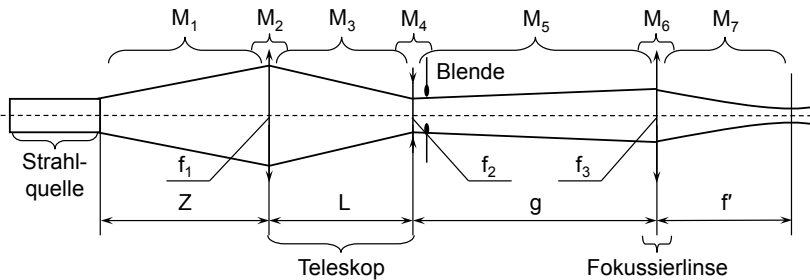
ist, beeinflussen tatsächlich sphärische Aberrationen die Strahlqualität. Damit erklären sich die Aufweitung der Strahltaile entgegen der theoretischen Erwartung sowie die beobachtete Formabweichung beim Perkussionsbohren mit dem CVL – Bild 6.1. Die Rayleigh-Länge – siehe Bild 6.4 – jedoch nimmt dagegen immer noch ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass außer den Parametern Divergenz und Brennweite, wie das telezentrische Modell erläutert – vgl. Gleichung 2.13 –, noch weitere Abhängigkeiten in einem optischen System existieren, die vom telezentrischen Modell nicht erfasst werden. Außerdem belegen die erheblichen Abweichungen der Daten zwischen Theorie und Experiment eine stark eingeschränkte Gültigkeit des telezentrischen Modells für die untersuchten Strahlquellen. Offensichtlich erfüllen sie nicht die erforderlichen Voraussetzungen, kleiner Divergenzwinkel und gleichzeitig homogene Ausleuchtung der optischen Elemente, wie bei der Einführung des telezentrischen Modells angegeben. Der CVL besitzt zwar ein top-hat-Profil, welches bei entsprechend großem Strahlquerschnitt von selbst eine hinreichende Ausleuchtung bewirkt, jedoch ergibt sich mit  $M^2 \approx 16$  bereits eine zu große Abweichung von der Forderung nach kleiner Divergenz. Der Nd:YAG-Laser mit nahezu  $\text{TEM}_{00}$  verfügt zwar über den erforderlichen kleinen Divergenzwinkel, aber das Strahlprofil mit Gaußscher Intensitätsverteilung verhindert die geforderte homo-

gene Ausleuchtung der optischen Elemente. Eine bessere Beschreibung der Ergebnisse ergibt sich daher unter der Annahme einer Gaußschen Strahlausbreitung.

### 6.1.3 Vergleich mit dem Gaußschen Modell

Um die Versuche im Gaußschen Modell vollständig zu erfassen, ist es erforderlich, den optischen Aufbau in Form von  $ABCD$ -Matrizen zu beschreiben.



**Abbildung 6.10:** Aufbau des optischen Systems

Entsprechend Bild 6.10 ergeben sich für die einzelnen Abschnitte des optischen Aufbaus folgende  $ABCD$ -Matrizen:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{Luftspalt zwischen Laser und Teleskop}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{erste Linse des Teleskops}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{Luftspalt im Teleskop}$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{zweite Linse des Teleskops}$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} 1 & g \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{Luftspalt zwischen Teleskop und Linse}$$

$$M_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{Fokussierlinse}$$

$$M_7 = \begin{bmatrix} 1 & f_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad - \quad \text{Luftspalt zwischen Linse und Messebene}$$

Die resultierende Systemmatrix ergibt sich aus dem Matrixprodukt – Gleichung 6.1 und Gleichung 6.2 – und ihre Lösung beschreiben die Gleichungen 6.3 bis 6.6 – ihre Berechnung ist im Anhang wiedergegeben.

$$M_{System} = M_7 \cdot (M_6 \cdot (M_5 \cdot (M_4 \cdot (M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1)))))) \quad (6.1)$$

$$M_{system} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

mit

$$A = -f_3 \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \quad (6.3)$$

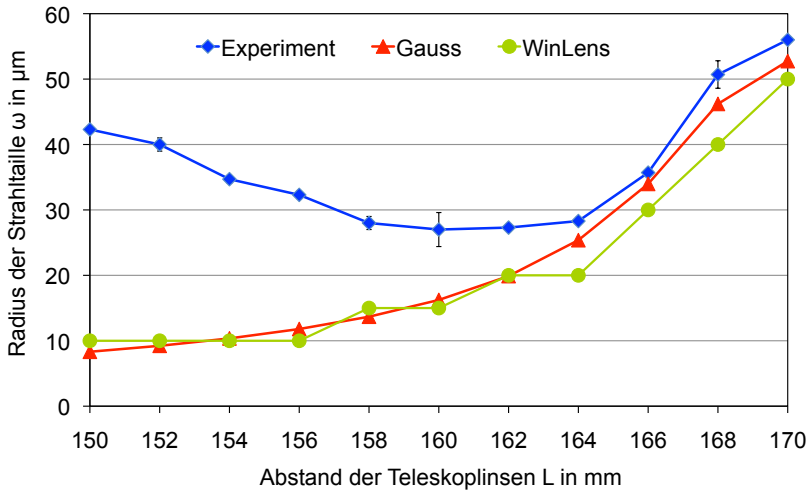
$$B = -f_3 \left[ \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \cdot Z + \frac{L}{f_2} - 1 \right] \quad (6.4)$$

$$C = - \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{g}{f_3} \right) + \frac{1}{f_3} \left( \frac{L}{f_1} - 1 \right) \quad (6.5)$$

$$D = \left[ - \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{g}{f_3} \right) + \frac{1}{f_3} \left( \frac{L}{f_1} - 1 \right) \right] \cdot Z - \left( 1 - \frac{g}{f_3} \right) \cdot \left( \frac{L}{f_2} - 1 \right) - \frac{L}{f_3} \quad (6.6)$$

Die Ergebnisse der Berechnungen der transformierten Größen  $Z_{\omega 2}$ ,  $Z_{R2}$  und  $\omega_2$  aus den vorstehenden Gleichungen sowie aus der Software WinLens v.4.3, das die Kalkulation der Gaußschen Strahlparameter erlaubt, während sich die Strahlung durch die optischen Elemente ausbreitet, finden sich in den folgenden Diagrammen sowie im Anhang in den Tabellen B.3 und B.4 wieder.

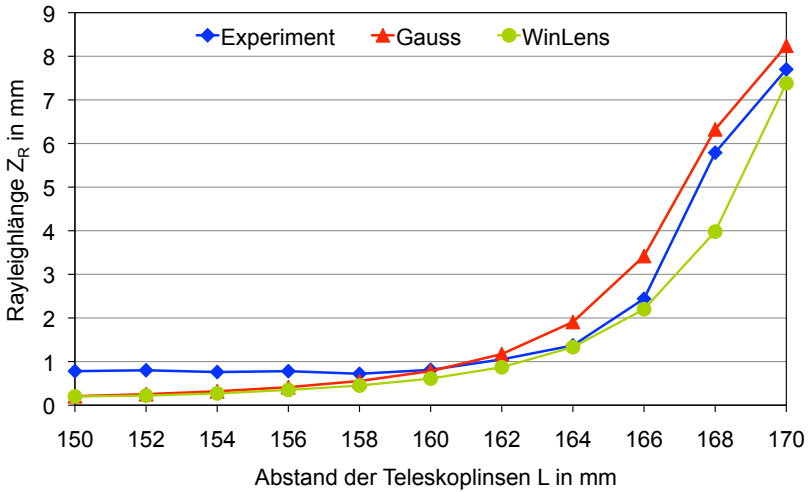
Die Resultate aus dem telezentrischen Modell werden jedoch nicht weiter berücksichtigt, da diese Werte wie oben gezeigt beachtlich von den experimentellen Ergebnissen abweichen. Hingegen bestätigen die experimentell gewonnenen Daten in den Bildern 6.11 bis 6.14 den Ansatz,



**Abbildung 6.11:** Abhängigkeit der Strahltaille vom Abstand der Teleskoplinsen

die Strahlausbreitung mit Hilfe des Gaußschen Modells zu beschreiben. Sowohl die eigenen Berechnungen wie auch die Ergebnisse aus WinLens stimmen gut mit den gemessenen Werten überein. Geringe Abweichungen zwischen Experiment und Theorie sind auf die begrenzte Auflösung des Messsystems zurückzuführen. Lediglich bei der Ermittlung der Strahltaille (Bild 6.11) zeigen sich mit kleinerem Abstand der Teleskoplinsen größere Unterschiede, die mit den schon diskutierten sphärischen Aberrationen, vgl. Bild 6.9, korrelieren. Sie können weder durch WinLens noch durch die eigenen Berechnungen in geeigneter Form berücksichtigt werden. Maßgeblich ist aber, dass sich Theorie und Experiment ohne diese Störungen, also im Bereich großen Abstands zwischen den Teleskoplinsen, gut entsprechen.

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse zur Einstellung des Teleskoplinsenabstands ist festzustellen, dass mit der Gültigkeit der Gaußschen Theorie zur Beschreibung der Strahlausbreitung der hier verwendeten Laserstrahlung dem Ansatz des telezentrischen Modells zumindest in einem grundlegenden Punkt widersprochen werden muss. Unabhängig von den beobachteten Aberrationen führt die Verringerung der Divergenz nicht zwangsläufig zu einem minimalen Strahlquerschnitt. Daher

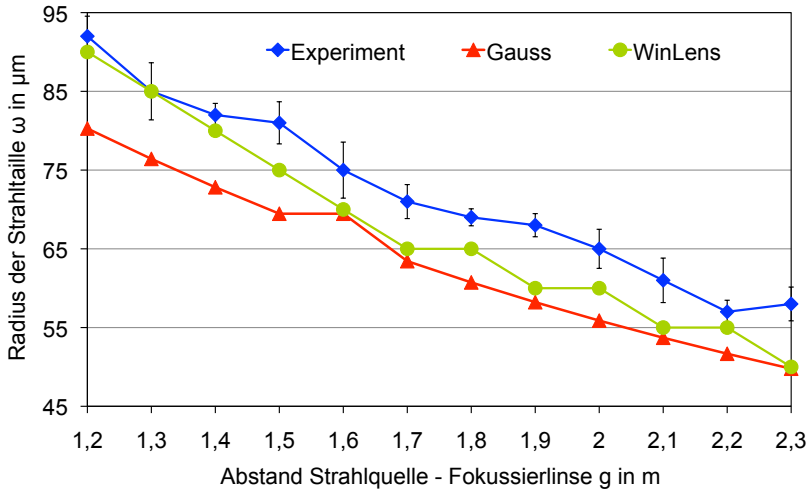


**Abbildung 6.12:** Abhängigkeit der Rayleighlänge vom Abstand der Teleskoplinsen

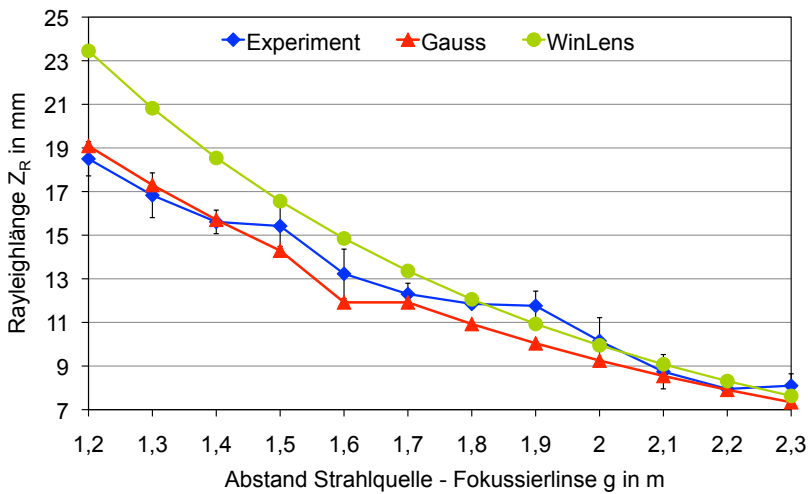
ist zunächst auch die Existenz des in Abschnitt 2.2.1 hergeleiteten Photonenrohrs in Frage zu stellen. Allerdings liefert die Einstellung des Abstands der Fokussierlinse zur Strahlquelle, mit der nach den Ausführungen in Abschnitt 6.1.1 auch die Divergenz beeinflusst wird, konsistente Ergebnisse für beide theoretischen Ansätze. Gemäß dem Gaußschen Modell folgen die experimentellen Resultate zur Strahltaille der Gleichung 2.18 und die der Rayleigh-Länge der Gleichung 2.19, siehe auch Bild 6.13 und Bild 6.14. Für das telezentrische Modell gelten die Erläuterungen aus Abschnitt 6.1.2.

### 6.1.4 Strahlformung

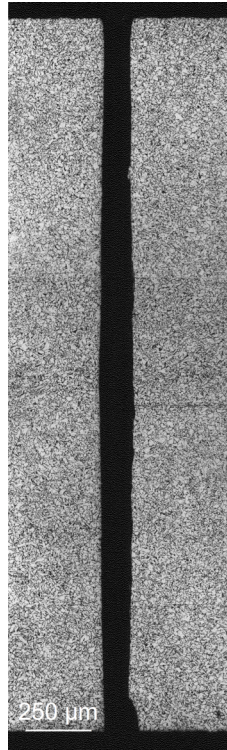
Die Beschreibung der Strahlausbreitung im telezentrischen Modell ist nur für kleine Divergenzwinkel und bei homogener Ausleuchtung der optischen Elemente hinreichend exakt. Die für die abtragende Mikromaterialbearbeitung von Metallen eingesetzten kurz-gepulsten Laser erfüllen diese Bedingungen, wie oben gezeigt, jedoch nicht. In der laser-gestützten Mikromaterialbearbeitung gelingt dies lediglich beim Einsatz von Excimer-Lasern mit Strahlhomogenisierung. Andere Laser, wie



**Abbildung 6.13:** Abhängigkeit der Strahltaille vom Abstand Fokussierlinse-Strahlquelle



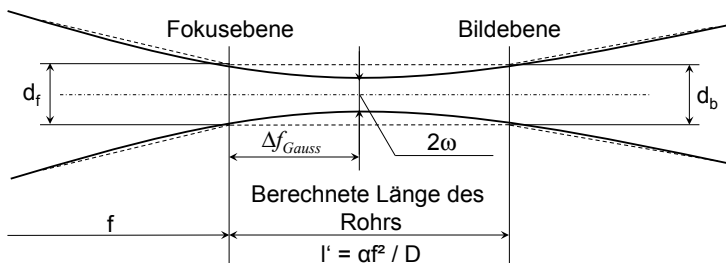
**Abbildung 6.14:** Abhängigkeit der Rayleighlänge vom Abstand Fokussierlinse-Strahlquelle



**Abbildung 6.15:** Bohrung in Stahl

güte-geschaltete Nd:YAG-Laser mit hoher Strahlqualität, erfordern eine Behandlung der Strahlausbreitung nach dem Gaußschen Ansatz. Daher ist zu überprüfen, ob eine Strahlformung, insbesondere das in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Photonenrohr, bei der gegebenen Laserstrahlung auch in diesem Modell abgeleitet werden kann. Hauptsächlich, da Abtraguntersuchungen beim Perkussionsbohren auf diese Möglichkeit der Strahlausbreitung hinweisen, wie Bild 6.15 belegt.

Die Bohrung in S235, hergestellt mit Kupferdampfstrahlung, besitzt eine zylindrische Form von ca. 125  $\mu\text{m}$  Durchmesser über der gesamten Länge von 3 mm. Dies entspricht einem Aspektverhältnis von 24. – Der Ausbruch am unteren rechten Rand der Bohrung ist ein Ergebnis der metallographischen Schliifferstellung. – Nach dem



**Abbildung 6.16:** Vergleich fokussierter Strahlausbreitung

telezentrischen Modell ergibt sich für das hier verwendete optische System ein Photonenrohr mit einem zylindrischen Teil der Strahlformung von etwa  $120 \mu\text{m}$  Durchmesser und einer Länge von ca. 5 mm.

Im Gaußschen Modell gelingt eine Erklärung für dieses Abtragergebnis unter Berücksichtigung der Rayleigh-Länge. Bild 6.16 verdeutlicht diesen Ansatz: Die gestrichelten Linien stellen die Ausbreitung der Strahlung nach dem telezentrischen Modell dar. Die ausgezogenen Linien skizzieren den Strahlverlauf experimenteller Ergebnisse mit einem Nd:YAG-Laser und einem optischen System, das die Bedingungen für ein Photonenrohr aus dem telezentrischen Modell erfüllt.

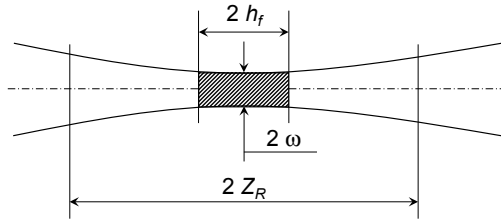
Obwohl der Strahldurchmesser in der Fokusebene und der Bildebene ( $d_f$  und  $d_b$ ) gleich sind, zeigt sich im Experiment zwischen diesen beiden Ebenen ein kleinster Strahldurchmesser ( $2\omega$ ). Ein echtes Photonenrohr wird also nicht beobachtet. Dennoch kann unter Bezug auf die Rayleigh-Länge auch im Gaußschen Modell ein Analogon konstruiert werden, wenn auch die Rayleigh-Länge nicht als Rohr zu verstehen ist. Sie ist als der Abstand definiert, in dem der Strahlradius um den Faktor  $\sqrt{2}$  größer ist als in der Taille, siehe Abschnitt 2.2.2. Jedoch kann ein Abstand von der Strahltaile errechnet werden, bei dem die Strahltaile nahezu erhalten bleibt, sich also nur geringfügig vergrößert. Bild 6.17 verdeutlicht die Überlegungen hierzu. Die Abhängigkeit des Strahldurchmessers in Ausbreitungsrichtung  $Z$  beschreibt Gleichung 6.7.

$$(\omega(Z))^2 = \omega_0^2 \cdot \left(1 + (Z/Z_R)^2\right) \quad (6.7)$$

Mit der Substitution  $\omega(Z) = \xi \cdot \omega_0$ , erhält man:

$$h_f = \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \cdot Z_R \quad (6.8)$$





**Abbildung 6.17:** Photonrohr bei Gaußscher Strahlausbreitung

Damit ergibt sich der Abstand, bei dem der Strahlradius um den Faktor  $\xi$  größer ist als in der Strahltaille  $\omega_0$  und die Intensität der Strahlung  $I(Z)$  um den Faktor  $1/\xi^2$  sinkt.

Die experimentelle Überprüfung mit  $\xi = 1,05$ , d. h. der Strahldurchmesser erweitert sich um 5%, erfordert den numerischen Ansatz:

$$h_f = \pm \sqrt{1,05^2 - 1} \cdot Z_R = \pm 0,32 \cdot Z_R \quad (6.9)$$

An diesem Ort fällt die Intensität lediglich um 10%.

Für die Bohrung in Bild 6.15 errechnet sich bei einer experimentell ermittelten Rayleigh-Länge  $Z_R$  von ungefähr 7-8 mm eine Länge des homogenen Bereiches  $h_f$  von  $\pm 2,2$  mm bis  $\pm 2,6$  mm, in beide Richtungen von der Strahltaille aus. Somit ergibt sich ein Photonrohr mit einer Durchmessertoleranz von etwa 5%, wobei die Länge zirka 5 mm beträgt.

Untersuchungen zeigen, dass die Erwartungen nicht nur für TEM<sub>00</sub>, also Gauß-förmige Strahlung, erfüllt werden, sondern auch bei Verwendung des Multi-Modes. Die erreichten Werte sind zwar größer als nach der Theorie zu erwarten, jedoch bleiben die Abhängigkeiten bestehen und das Gaußsche Modell behält seine Gültigkeit.

Neben der Definition eines Photonrohrs im Gaußschen Modell bestätigt sich im Experiment auch der bereits hergeleitete Versatz der Strahltaille – Gleichung 2.23 – beim Durchgang durch das optische System. Die Taille verschiebt dabei ihre Position nicht nur durch Veränderung der Brennweite der Fokussierlinse, vielmehr ist ihre Lage auch abhängig von der Position einzelner optischer Komponenten; siehe hierzu auch die Entwicklung der ABCD-Matrizen zur Berechnung der transformierten Strahlparameter in Abschnitt 2.2.2 und Abschnitt 6.1.3. Beispielsweise wird durch die Änderung des Abstandes der Teleskoplinen zueinander eine Lageverschiebung der Strahltaille bewirkt, wie Bild

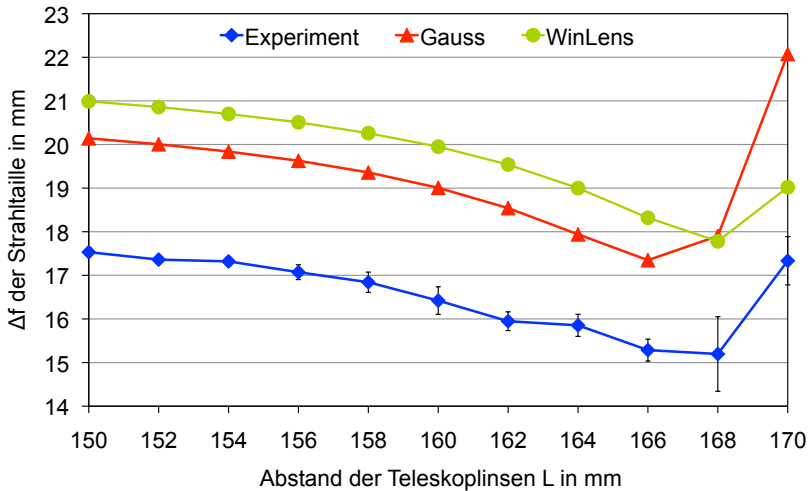


Abbildung 6.18: Position der Strahltaile

6.18 belegt. Der Verlauf der experimentell ermittelten Werte stimmt gut mit der Theorie überein, allerdings liegen ihre Daten deutlich über den gemessenen. Das Gleichmaß der Abweichung lässt auf einen systematischen Fehler schließen, der nicht weiter eingegrenzt werden konnte.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass unter Einhaltung vorgegebener Toleranzen auch mit dem Gaußschen Modell eine Strahlausbreitung darstellbar ist, die der Vorhersage aus dem telezentrischen Modell entspricht. Zusätzlich gestattet der Gaußsche Ansatz die Berechnung der experimentell beobachteten Fokusschift, wenn auch die hier gezeigten Ergebnisse noch nicht genügend exakt sind.

### 6.1.5 Grenzen der Strahlformung

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse belegen die Machbarkeit und Wirksamkeit einer gezielten Strahlformung. Jedoch erfordert die in Bild 6.15 gezeigte Bohrung einen Strahlweg von ca. 17 m vom Resonatorausgang bis zur Werkstückoberfläche. Durch den langen Strahlweg ergeben sich auf der Fokussierlinse Leistungsdichten von nur ca.  $10^2 \text{ W/cm}^2$ ; eine Verkürzung der Strecke führt dagegen schnell zu Leis-

tungsdichten oberhalb der Zerstörschwelle der optischen Komponenten. Daher wird eine derartige Strahlformung auf absehbare Zeit eine Einzelösung für besondere Anwendungen bleiben. Zudem ist der vorgestellte Ansatz nur im statischen Aufbau umsetzbar. Industrielle Anforderungen – z. B. Bohrungen mit negativer Konizität, d. h. der Austrittsdurchmesser ist größer als der Eintritt, wie es bei Bauteilen der Fall ist, die nur von außen zugänglich sind, etwa bei Einspritzdüsen – erfordern schnelle dynamische Lösungen, die zur Positionierung des Laserstrahls den Einsatz von Scannern voraussetzen. Hier ändern sich Strahlweg und Einfallwinkel auf die Fokussierlinse permanent, so dass sich häufig die gewünschte Strahlformung nicht umsetzen lässt. Einfachere Bearbeitungsaufgaben, wie die Herstellung von Multilochblechen bei denen die Konizität der im Perkussionsverfahren gefertigten Bohrungen nur eine untergeordnete Rolle spielt und somit keinen aufwändigen optischen Aufbau verlangen, können durch schnelle Strahlführungssysteme gut erfüllt werden. Vergleiche hierzu auch Abschnitt 7.1.3.

## 6.2 Perkussionsbohren

### 6.2.1 Einfluss der Pulsleistung

Sowohl für Aluminium (Dicke  $s = 0,85 \text{ mm}$ ) wie auch für Titan ( $s = 0,75 \text{ mm}$ ) wird die Abhängigkeit des Austrittsdurchmessers von der Pulsleistung ermittelt. In Bild 6.19 und Bild 6.20 ist zu sehen, dass sich der Austrittsdurchmesser einer Bohrung ebenso wie der Eintrittsdurchmesser proportional zur Pulsleistung verhält. Für beide Materialien ergibt sich eine exponentielle Abhängigkeit des Austrittsdurchmessers (Gleichung 6.10 und Gleichung 6.11). Auffallend ist hier der im Vergleich zum Aluminium kleinere Austrittsdurchmesser in Titan bei großer Pulsleistung. Dagegen tritt ein größerer Durchmesser bei kleiner Pulsleistung auf, obwohl bei Titan die geringere Blechdicke vorliegt. Aus den in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Abtragmechanismen kann dieser Unterschied nicht erklärt werden. Beide Werkstoffe sind als Metalle den duktilen Materialien zu zuordnen, deren Abtrag über Schmelzen und Verdampfen abläuft (Bild 2.4). Da bei den hier betrachteten Untersuchungen stets fokussierte Laserstrahlung eingesetzt wird, kann unter Berücksichtigung von Bild 2.3 beiden Werkstoffen ein Abtragverhalten nach Typ C oder D gemäß Bild 2.2 unterstellt werden. Einen wichtigen Hinweis liefern jedoch Gleichung 2.10 und Gleichung 2.12, welche

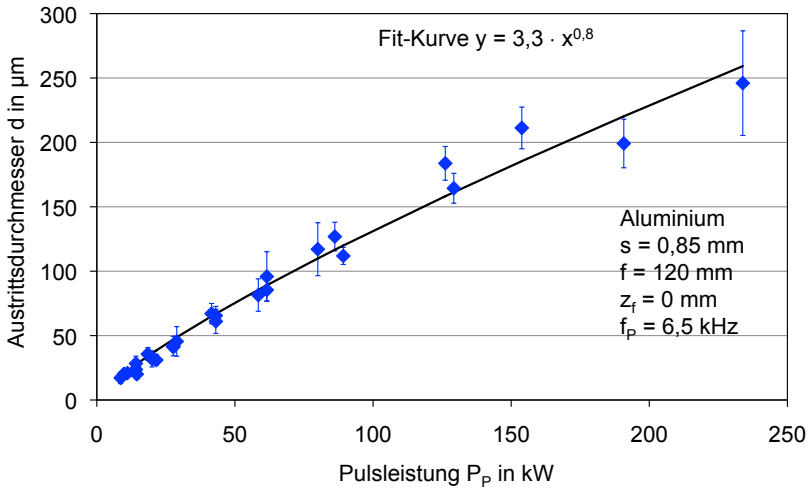


Abbildung 6.19: Einfluss auf den Austrittsdurchmesser in Aluminium

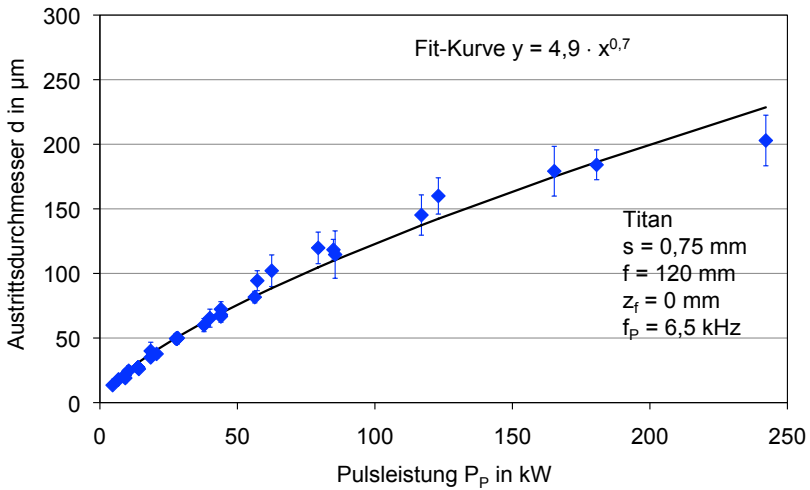


Abbildung 6.20: Beeinflussung des Austrittsdurchmessers in Titan

die thermo-physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe in Betracht ziehen. Demzufolge können sich für unterschiedliche Materialien und verschiedene Bauteildicken auch differierende Exponenten und Vorfaktoren ergeben. Dies spiegeln die folgenden Gleichungen zur Darstellung der exponentiellen Abhängigkeit des Austrittsdurchmessers  $d$  von der Pulsleistung  $P_P$  wider:

- **Aluminium**

$$d = 3,3 \cdot (P_P/\text{kW})^{0,8} \quad (6.10)$$

- **Titan**

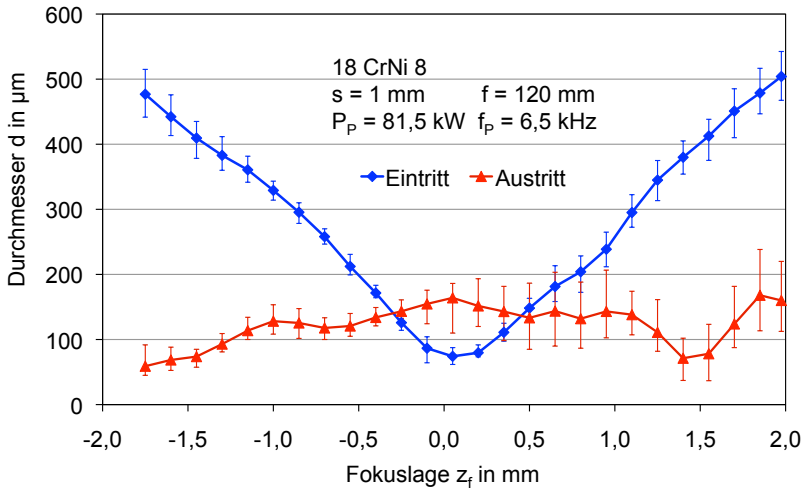
$$d = 4,9 \cdot (P_P/\text{kW})^{0,7} \quad (6.11)$$

Einschränkend ist anzumerken, dass die beiden Gleichungen nur bei Pulsleistungen gelten, die oberhalb der Abtragschwelle liegen. Zudem erlaubt der empirische Ansatz keine Rückschlüsse auf die maßgeblichen werkstofflichen Kenngrößen. Eine Vorstellung über die Zusammenhänge auf Basis der thermo-physikalischen Größen aus Tabelle 5.3 ist daher an dieser Stelle schwierig. In Abschnitt 6.3 kann jedoch unter Berücksichtigung der dort eingeführten Iso-Intensitätslinien eine Deutung vorgenommen werden.

### 6.2.2 Einfluss der Fokusslage

Wie weiter oben bereits ausgeführt, ist für Bohrungen in Metall, vor allem in Hinblick auf die massenhafte Herstellung von Löchern, der Einsatz eines einfachen, fokussierenden Systems unumgänglich. Von besonderem Interesse ist dabei die Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Fokusslage. Bild 6.21 zeigt daher den Einfluss des Arbeitsabstands auf Eintritts- und Austrittsdurchmesser in 1 mm dickem Stahl bei Verwendung einer Fokussierlinse der Brennweite  $f = 120$  mm und bei konstanter Pulsleistung  $P_P = 81,5$  kW (erstmal veröffentlicht in [KOCH & LANG, 1997]).

Ausgehend von einer Fokusslage unterhalb des Bleches durchläuft der Eintrittsdurchmesser ein Minimum, um dann ebenso rasch wieder anzusteigen. Der Austrittsdurchmesser hingegen bleibt innerhalb einer gewissen Toleranz unabhängig von der Fokusslage auf gleichem Niveau. Auffallend sind die zwei Schnittpunkte der beiden Kurven bei den Fokusslagen  $z_f \approx \pm 0,375$  mm. In diesen Fällen sind Eintritt und Austritt gleich groß und implizieren einen zylindrischen Bohrkanal. Dazwischen

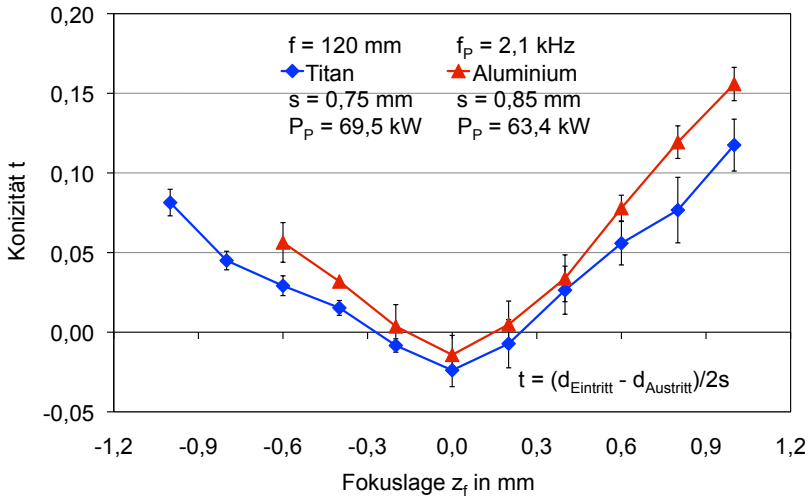


**Abbildung 6.21:** Einfluss der Fokuslage in Einsatzstahl

liegen die Werte der Eintrittsdurchmesser unter denen des Austritts, die Bohrungen weisen eine negative Konizität – das ist der Quotient der Differenz von Eintritts- und Austrittsdurchmesser und der zweifachen Blechdicke – auf. Damit sollte die Fertigung von Hinterschneidungen selbst mit einem einfachen optischen System, d. h. lediglich aus einer Fokussierlinse bestehend, möglich sein.

Identische Ergebnisse lassen sich an Titan (Dicke  $s = 0,75$  mm) und Aluminium ( $s = 0,85$  mm) reproduzieren, vgl. Bild 6.22. Hier ist die Konizität über der Fokuslage aufgetragen. Wiederum von einer Fokuslage unterhalb der Bleche nimmt die Konizität mit steigender Fokuslage ab, durchschreitet für Werte im Bereich der Blechoberfläche (Fokuslage  $z_f = 0$  mm) ein Minimum und steigt bei Arbeitsabständen oberhalb der Bleche wieder an. Eine genauere Analyse der Daten aus Bild 6.21 und Bild 6.22 ergibt für die Schnittpunkte der Kurven von Eintritts- und Austrittsdurchmesser bzw. für die Konizität  $t = 0$  eine Fokuslage  $z_f$  von  $\pm 1/3$  der Blechdicke  $s$  bei Titan bis  $\pm 1/4 s$  bei Aluminium.

Der Vergleich des Bohrkanalverlaufs für unterschiedliche Fokuslagen – Bild 6.23, Schnitte entlang der Achsen von Bohrungen in Titan – mit der Strahlausbreitung, sei es nach dem telezentrischen Modell oder nach Gauß, offenbart, dass für die Ausbildung des Bohrkanals nicht



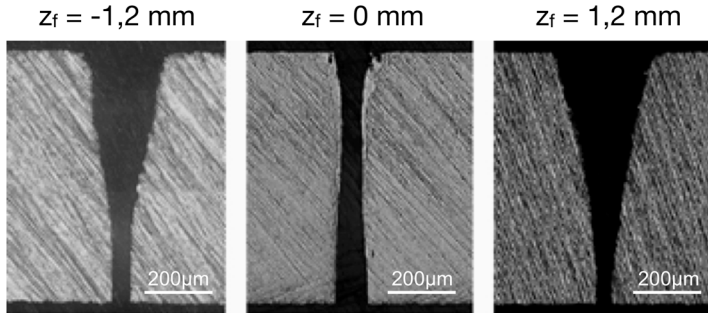
**Abbildung 6.22:** Beeinflussung der Bohrkanalgeometrie in Titan

alleine die Strahlausbreitung herangezogen werden kann. In der Mitte des Bildes entspricht die Geometrie der Bohrung zwar der nach der Strahlausbreitung zu erwartenden Form, jedoch gilt dies nicht mehr, wenn das Blech weit ab der Taille im Strahlengang positioniert wird. Hier ist die Intensitätsverteilung der Strahlung ebenfalls zu berücksichtigen, was zur Betrachtung sog. Iso-Intensitätslinien führt.

### 6.3 Einführung der Iso-Intensitätslinien

Eine Vorstellung der Iso-Intensitätslinien gelingt unter Bezug auf Gaußsche Strahlung, die in jedem Abstand zur Strahltaile eine Gauß-förmige Intensitätsverteilung aufweist. Das absolute Intensitätsmaximum liegt hier im Fokus vor und der Flächeninhalt unter den Kurven ist in allen Schnitten senkrecht zur Strahlachse aufgrund der Energieerhaltung gleich. Damit folgt: Bei fokussierter Strahlung ergibt sich in Abhängigkeit vom Ort eine unterschiedliche Intensitätsverteilung und damit eine variierende Leistungsdichte – siehe auch Abschnitt 2.2.2. In Bild 6.24 ist hierzu schematisch die Intensitätsverteilung für Schnitte entlang der Strahlachse – im Fokus  $x_0$ , in einem Abstand  $x_1$  vom Fokus und

### Einfluss der Fokusslage auf die Bohrkanalgeometrie



**Abbildung 6.23:** Bohrkanal in Titan  $s = 0,75$  mm

für einen weiteren Abstand  $x_2$ , mit  $x_1 < x_2$  – beispielhaft übereinander gelegt. Es wird deutlich, dass die maximale Intensität ausgehend vom Fokus mit zunehmendem Abstand sinkt, während der Querschnitt anwächst.

Unter der Annahme, dass die maximale Intensität am Ort  $x_2$  gerade die Abtragschwelle – Grenzintensität in Bild 6.24 – erreicht, kann folgende Vorstellung entwickelt werden – vergleiche hierzu auch Bild 5.27 und Bild 6.25; die hellgrauen Bereiche stellen die Intensität gerade oberhalb der Abtragschwelle dar: Im Abstand  $x_2$  – größer als die Rayleighlänge – ergibt sich ein punktförmiger Abtrag (Bild 6.25  $x_2$ ), bei Annäherung an den Fokus nimmt die Intensität zu (Bild 6.25  $x_1$ ); die Grenzintensität, d. h. die Intensität, die gerade noch einen Abtrag bewirkt, verbreitert sich und wird im Inneren schließlich von höheren Intensitäten überlagert. Im Bereich des Fokus ist die Intensität zwar maximal, jedoch ist die Grenzintensität auf einen kleineren Fleck beschränkt als zuvor (Bild 6.25  $x_0$ ). Die Einzelpulsabträge in Bild 5.27 belegen für den Übergang von  $x_1$  nach  $x_0$  deutlich die Kontraktion der Grenzintensität im Bereich des Fokus für die nur Gauß-ähnliche Intensitätsverteilung im Laserstrahl. Im Bereich der Strahltaile kommt es also zu einer Einschnürung der Intensität, die gerade noch einen Abtrag bewirkt.

Bild 6.26 verdeutlicht die Situation noch einmal in einem Schnitt längs zur Strahlausbreitungsrichtung, sowohl vor wie auch nach der Strahltaile. Dabei stellt die äußere Umrandung besagte Grenzintensität dar.



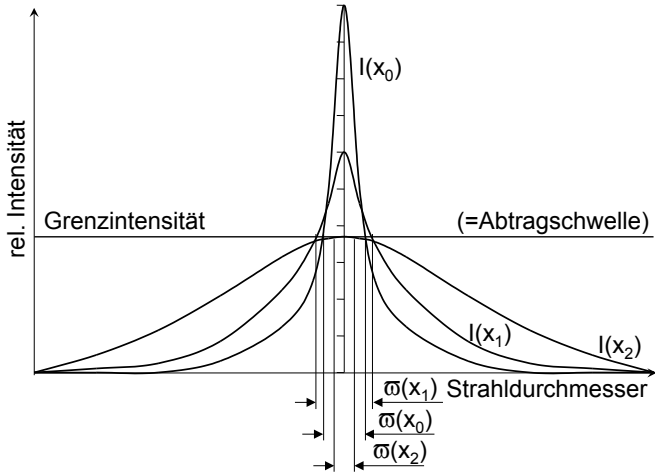


Abbildung 6.24: Strahlprofilvergleich

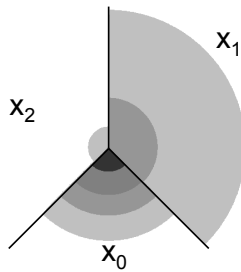


Abbildung 6.25: Intensitätsquerschnitte

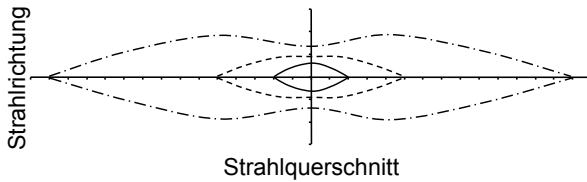


Abbildung 6.26: Iso-Intensitätslinien

Die Anwendung dieses Modells auf die Bohrungen in Bild 6.23 bestätigt diese Vorstellung nochmals: Bei einer Fokuslage von  $z_f = 0$  mm liegt der Fokus auf der Blechoberfläche, bei genauerer Betrachtung etwas in das Blech hinein verlegt, so dass sich im Inneren des Bleches eine Verjüngung der Bohrung ergibt. Eintritt und Austritt sind annähernd gleich groß, was auf Wärmeleitungseffekte am Eintritt aufgrund der Bohrdauer zurückzuführen ist. Bei einer Fokuslage  $z_f = -1,2$  mm befindet sich der Fokus etwa 0,4 mm unterhalb der Blechunterkante, so dass sich nach den Iso-Intensitätslinien ein weiterer Eintritt und ein schmaler Austritt ergibt. Die Simulation der Temperaturverteilung für diesen Fall ist in Bild 6.27 wieder gegeben. Der innere, graue Bereich um den Ursprung des Koordinatensystems herum stellt das verdampfte Material dar, während der daran anschließende Bereich, die rote Zone, den schmelzflüssigen Zustand des Werkstoffs im Verlauf der Bearbeitung andeutet. Aufgrund des Schmelzeaustriebs durch das verdampfte Material entsteht letztlich eine durchgehende Bohrung mit weitem Eintritt und schmalen Austritt. Im Falle der Fokuslage  $z_f = +1,2$  mm ist die Blechunterkante ca. 2 mm vom Fokus entfernt und die gesamte Bohrung wird nur mit dem linken Ast aus Bild 6.26 hergestellt. Der große Öffnungswinkel auf der Strahleintrittsseite resultiert dann aus der Erweiterung der Grenzintensität unterhalb der Strahltaile und der schmale Auslauf der Bohrung aus ihrem spitzen Zulaufen fern des Fokus.

Auch die in Bild 6.28 gezeigte Bohrung in 5 mm dickem Stahl folgt dem Schema der Iso-Intensitätslinien. Die Bohrung besitzt einen stark erweiterten Strahleintritt, der wiederum auf Wärmeleitungseffekte aufgrund langer Bearbeitungszeit zurückzuführen ist. Danach verjüngt sich der Bohrkanaal bis zum Fokus der verwendeten Linse mit der Brennweite  $f = 300$  mm, bei etwa einem Drittel der Blechdicke. Anschließend weitet sich die Bohrung auf und läuft zum Austritt hin spitz zu.

Unter Beachtung der Intensitätsverteilung entlang der Strahlausbreitung erklärt sich auch die Möglichkeit zur Fertigung von Bohrungen in dünnen Folien mit einem Durchmesser kleiner als die Strahltaile, wie in Bild 6.29 gezeigt. Durch die Positionierung des Werkstückes im Bereich der sich stark verjüngenden Iso-Intensitätslinien, vgl. Bild 6.26, kann die Bohrung mit einem Durchmesser von ca.  $2\ \mu\text{m}$  in einer  $150\ \mu\text{m}$  dicken Stahlfolie erstellt werden. Allerdings bleibt anzumerken, dass solche Bohrungen auf relativ geringe Blech- bzw. Foliendicken beschränkt sind. Größere Blechstärken erfordern eine Positionierung näher zum Fokus, um eine Durchbohrung zu gewährleisten, wodurch der Bohrungs-

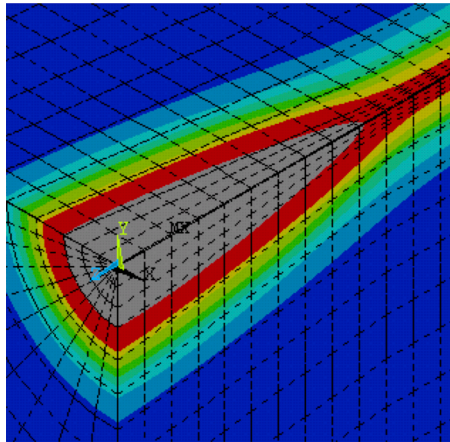


Abbildung 6.27: Bohrlochbildung

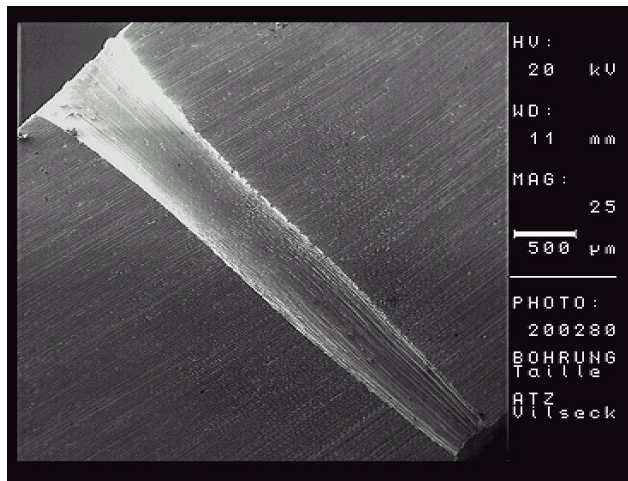
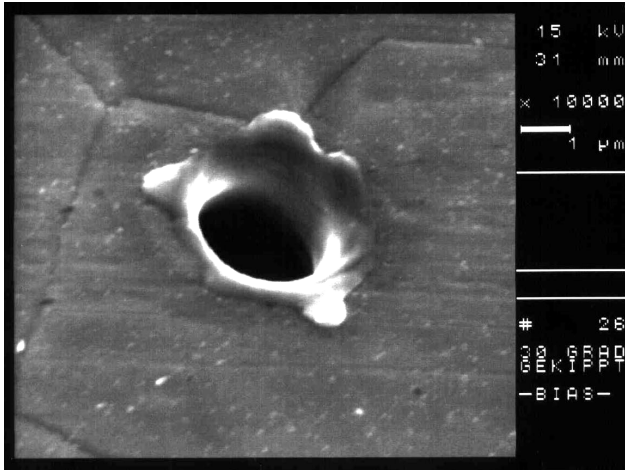


Abbildung 6.28: Düsenbohrung (Stahl  $s = 5$  mm)

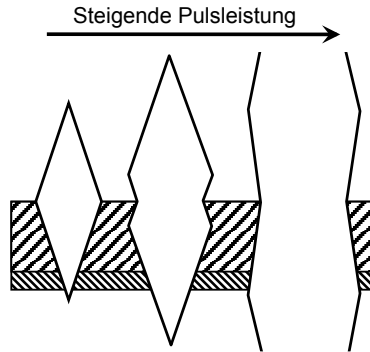


**Abbildung 6.29:** 2 µm Bohrung in Stahlfolie

querschnitt unter Einwirkung höherer Intensitäten schnell aufweitet. Bei Verwendung einer an die Blechdicke angepassten Brennweite der Fokussierlinse kann in begrenztem Rahmen die Bohrkanalgeometrie gezielt beeinflusst werden. Hier erweisen sich Linsen mit möglichst kurzer Brennweite als günstig, da dann die Leistungsdichte über der Abtragschwelle des Materials liegt. Bei Linsen mit langer Brennweite kann das Intensitätsfeld entlang der Strahlachse je nach Werkstoff homogener wirken und die Bohrungen entstehen mit eher zylindrischer Geometrie.

Die Anwendung der Iso-Intensitätslinien auf die Ergebnisse aus Bild 6.19 und Bild 6.20, d. h. die vergleichende Betrachtung des Einflusses der Pulsleistung auf den Austrittsdurchmesser bei Aluminium und Titan, führt einerseits zu einer Verfeinerung der Vorstellung über die Ausbildung der Iso-Intensitätslinien. Andererseits weist die Vergrößerung der Austrittsdurchmesser mit steigender Pulsleistung noch einmal darauf hin, dass die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie nicht allein von der Strahlausbreitung abhängig ist. Diese wird von den Eigenschaften der Strahlung und den verwendeten optischen Komponenten bestimmt, wie die Ausführungen in den Abschnitten 2.2, 5.2 und 6.1 zeigen.

Die mit der Pulsleistung anwachsenden Durchmesser belegen, dass sich bei höheren Leistungen die Grenzintensität zunehmend verbreitert

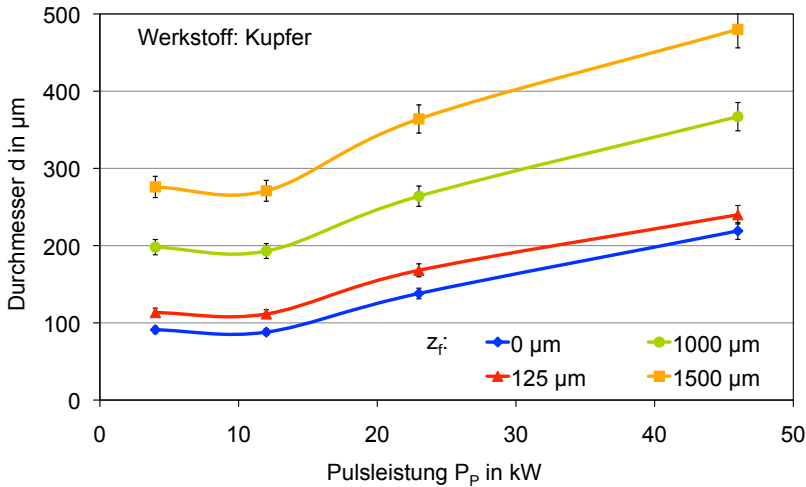


**Abbildung 6.30:** Variation der Grenzintensität mit der Pulsleistung

und sich die beiden Bereiche ihrer maximalen Ausdehnung, also oberhalb und unterhalb der Strahltaille, immer weiter von einander entfernen. In Bild 6.30 ist diese Vorstellung skizziert. Bei kleinen Pulsleistungen hingegen fallen die Bereiche maximaler Grenzintensität in der Strahltaille zusammen, so dass hier bei Titan größere Austrittsdurchmesser zu beobachten sind als bei Aluminium, linke Darstellung in Bild 6.30. Bei hoher Pulsleistung dagegen liegt die Unterseite des Aluminiumblechs näher an der maximalen Ausdehnung der Grenzintensität – vgl. auch Bild 6.26 – und die Austrittsdurchmesser werden dort größer als in Titan.

## 6.4 Beeinflussung der Bearbeitungszone

Den Einfluss der Fokusslage auf die Grenzintensität zeigen auch Untersuchungen zur Beeinflussung der Bearbeitungszone. Diese ist, wie in Abschnitt 5.5.1 aufgezeigt, abhängig von der Strahlausbreitung, der Intensität der Strahlung und den thermo-physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs. Unter Beachtung der Ergebnisse des vorangegangenen Abschnitts können die Pulsleistung und die Leistungsdichte zumindest teilweise die mit der Laserstrahlung verknüpften Größen substituieren, um die Bearbeitungszone näher zu beleuchten. Die Leistungsdichte ist hier jedoch nur in sofern von Bedeutung, dass ihr Betrag mindestens die Abtragschwelle des jeweiligen Werkstoffs, also etwa  $10^6 \text{ W/cm}^2$ ,



**Abbildung 6.31:** Einfluss auf die Bearbeitungszone in Kupfer

erreicht. Darüber hinaus kann sie und ihre Einflussnahme auf die Anwendung der Iso-Intensitätslinien reduziert werden. Für den eingesetzten Nd:YAG-Laser ergibt sich die in Bild 6.31 dargestellte Abhängigkeit des Durchmessers der Bearbeitungszone von der Pulsleistung bei verschiedenen Fokusslagen. Dabei erreicht die Leistungsdichte jeweils den für den Abtrag erforderlichen Wert von  $> 10^6 \text{ W/cm}^2$ .

Die Kurven der Messwerte beschreiben einen ähnlichen Verlauf und steigen ab Pulsleistungen von 12 kW linear an. Darunter bleiben sie konstant, was eventuell auf Messfehler zurückzuführen ist: Bei niedrigen Pulsleistungen fällt die Abgrenzung zwischen bearbeitetem Bereich und Schmelzeaufwurf schwer, da kein Abtragkrater mehr detektiert werden kann, vergleiche auch Abtragsmuster in Bild 5.27. Häufig wird der Schmelzeauswurf in die Festlegung der Bearbeitungszone einbezogen, so kommt es zu einer Überschätzung des Durchmessers. Für eine Beschreibung der Abhängigkeit des Durchmessers von der Pulsleistung und der Fokusslage kann also ab einer Pulsleistung von etwa 12 kW in erster Näherung eine Ebenengleichung entwickelt werden. Gleichung 6.12 demonstriert den in Bild 6.31 dargestellten Fall für Kupfer. Sie berücksichtigt allerdings nicht den Grenzfall, bei dem die erzielte Leistungsdichte nicht mehr ausreicht, um Material abzutragen. Dies ergibt sich, wenn entweder

die Pulsleistung zu gering gewählt wird oder sich der Fokus weit über oder unter der zu bearbeitenden Oberfläche befindet. Andererseits gilt die Gleichung auch nur bis zur maximalen betrachteten Pulsleistung, da nach den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.1 ein exponentieller Verlauf zu erwarten wäre. Jedoch erreicht der verwendete Nd:YAG-Laser nicht die Pulsleistung des KupferdampfLasers, wodurch eine Extrapolation erschwert wird. Innerhalb der Parametervariation aus Bild 6.31 genügt Gleichung 6.12 aber den Ansprüchen beim Laserabtragen. Die empirische Formel zur Berechnung des Durchmessers der Bearbeitungszone auf Kupfer lautet:

$$d [\mu\text{m}] = 3 \frac{\mu\text{m}}{\text{kW}} \cdot P_P [\text{kW}] + 0,125 \cdot z_f [\mu\text{m}] + 80 \mu\text{m} \quad (6.12)$$

mit  $d$ : Durchmesser der Bearbeitungszone,  $P_P$ : Pulsleistung und  $z_f$ : Fokusslage

Die Konstanten der ermittelten Ebenengleichung sind wiederum werkstoffabhängig.

Mit Hilfe von Gleichung 6.12 bzw. ihren Derivaten für die anderen Werkstoffe wird der Überlappgrad für die folgenden Untersuchungen zum dynamischen Abtrag ermittelt bzw. eingestellt. Der Überlappgrad kann nun als der prozentuale Anteil definiert werden, mit dem die Bearbeitungszone eines zweiten Pulses diejenige eines ersten Pulses überlagert. Im Falle des stationären Abtrags beträgt er 100 %.

## 6.5 Laserstrahlwendelbohren

Bei genauer Betrachtung ist das Laserstrahlwendelbohren ein sukzessives Trennen von Material. Es entspricht einem Schneidprozess, bei dem die Schnittkante nicht in einem Zug, sondern durch zyklische Wiederholung des Abtragsvorgangs geschaffen wird. Da hierzu eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil notwendig ist, reiht sich das Laserstrahlwendelbohren beim dynamischen Abtrag – vgl. Tabelle 4.1 – ein.

Nuten unterschiedlicher Breite und Tiefe dienen hier zur Bestimmung des Abtragverhaltens. Dazu wird der Laserstrahl mit konstanter Geschwindigkeit um ca. 5 mm, auch mehrfach über das Werkstück, abgelenkt. Da aus den Untersuchungen zum Perkussionsbohren sowie aus dem vorangegangenen Abschnitt ein Einfluss der Pulsleistung auf den Durchmesser der Bearbeitungszone bekannt ist, wird ermittelt, in

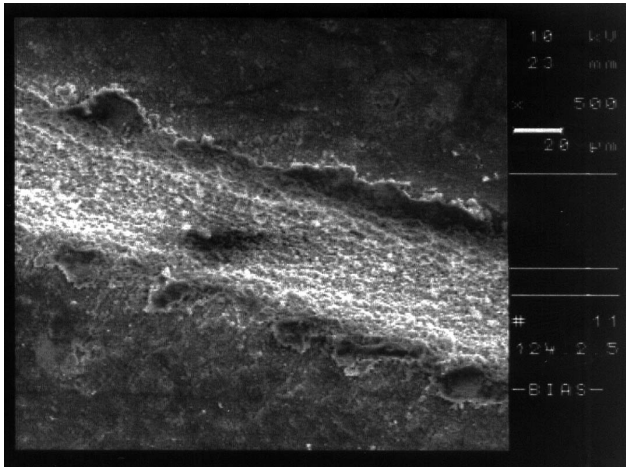


Abbildung 6.32: Niedrige Pulsleistung:  $P_P = 8 \text{ kW}$ ; Maßbalken  $20 \mu\text{m}$

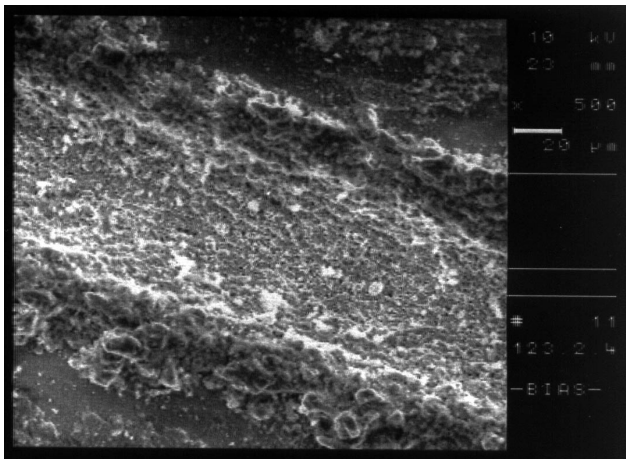


Abbildung 6.33: Hohe Pulsleistung:  $P_P = 28 \text{ kW}$ ; Maßbalken  $20 \mu\text{m}$



welchem Maße bei vorgegebenem Arbeitsabstand eine Erhöhung der Pulsleistung zu einer Verbreiterung der hergestellten Spuren führt. Aus der Berücksichtigung einer Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil in der allgemeinen Form der Energietransportgleichung (Gleichung 2.4) ist darüber hinaus abzulesen, dass auch der Überlappgrad einen Einfluss auf das entstehende Temperaturfeld im Werkstück und somit auf den zu beobachtenden Abtrag hat. Daher werden diese Untersuchungen bei verschiedenen Überlappgraden wiederholt. Hierzu wird die Positioniergeschwindigkeit auch bei unterschiedlichen Fokuslagen zur Herstellung der Nuten variiert. Das so eingestellte Parameterfeld für mehr als 300 Linienabträge in Aluminiumblechen reicht beim Arbeitsabstand  $z_f$  von  $-1,5$  mm bis  $+1,5$  mm, bei der Pulsleistung  $P_P$  von 8 kW bis 110 kW und beim Überlappgrad von 0 % bis 99 %.

Die Resultate zum Einfluss der Pulsleistung zeigen, dass ihre Erhöhung zwar eine Steigerung der Abtragrate zur Folge hat, jedoch verstärken sich auch der Grat und die Debris, das ist abgelagertes Material auf der Werkstückoberfläche, welches aus dem Abtrag stammt. In Bild 6.32 und Bild 6.33 sind zwei Nuten in Aluminium, hergestellt mit gleichem Überlappgrad (96 %), jedoch bei verschiedenen Pulsleistungen (Bild 6.32:  $P_P = 8$  kW; Bild 6.33:  $P_P = 28$  kW), zu sehen. Der qualitative Vergleich der Spuren belegt die deutliche Zunahme an Debris mit höherer Pulsleistung. Daneben tritt auch eine Zunahme der Linienbreite ein. Die quantitative Auswertung mit dem Profilometer bestätigt diese erste Aussage, vgl. Bild 6.34 und Bild 6.35. Die Breite der Spuren beträgt  $30 \mu\text{m}$  bzw.  $70 \mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung des Redeposit vergrößert sich die Einflusszone auf  $90 \mu\text{m}$  bzw.  $165 \mu\text{m}$ , womit die Spurbreite der mit 28 kW gefertigten Linie sogar die Ausdehnung des Schmelzeauswurfs des Einzelpulsabtrags (ca.  $120 \mu\text{m}$ , siehe Bild 6.36) übersteigt. Die Tiefe der Abtraglinie liegt mit  $26 \mu\text{m}$  rund 1,5 mal höher als bei der Spur in Bild 6.32, jedoch erreicht die Höhe der Debris mit  $12 \mu\text{m}$  den dreifachen Wert der mit niedriger Leistung gefertigten Linie ( $4 \mu\text{m}$ ).

Der theoretischen Ansicht in Bild 2.2 aus Abschnitt 2.1.3 für den stationären Abtrag folgend verlagert sich der Mechanismus vom Typ C bei niedriger Pulsleistung hin zu einem Typ D bei höherer Pulsleistung; er ist durch eine größere Schmelzebildung gekennzeichnet. Offensichtlich führt der gewählte Überlapp von 96 % zu einem Verhalten bei diesem dynamischen Abtrag, das der Art des stationären entspricht.

Den Einfluss des Arbeitsabstands auf die Breite und die Tiefe der erzeugten Strukturen für eine konstante Pulsleistung und einen gleich-

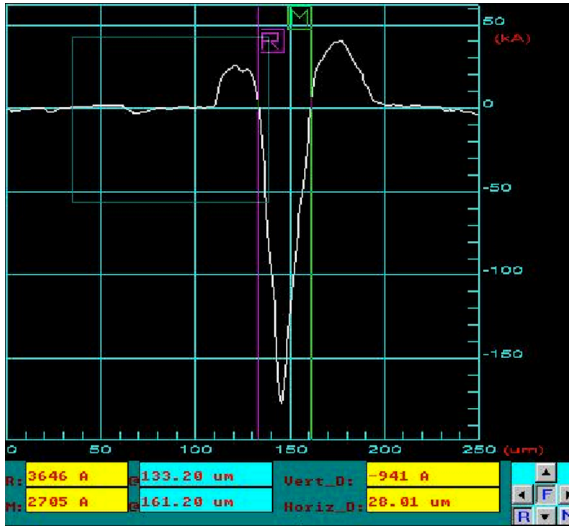


Abbildung 6.34: Abtragprofil bei niedriger Pulsleistung,  $P_P = 8 \text{ kW}$

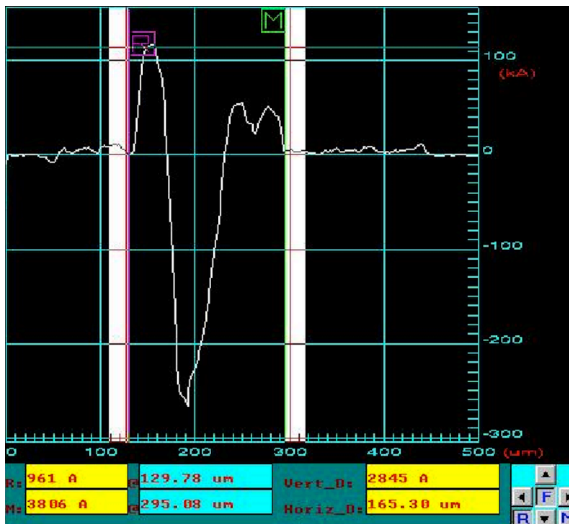
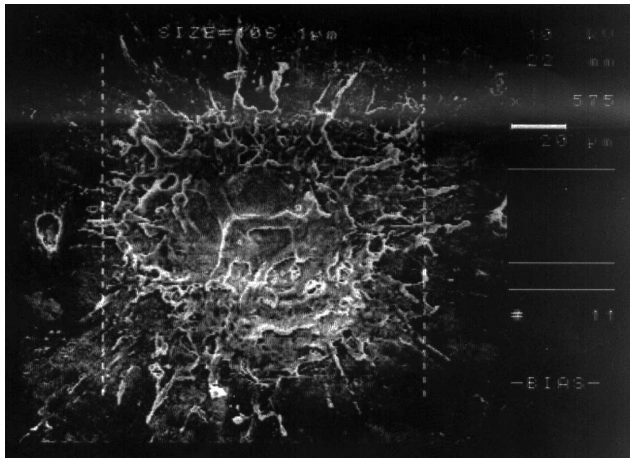


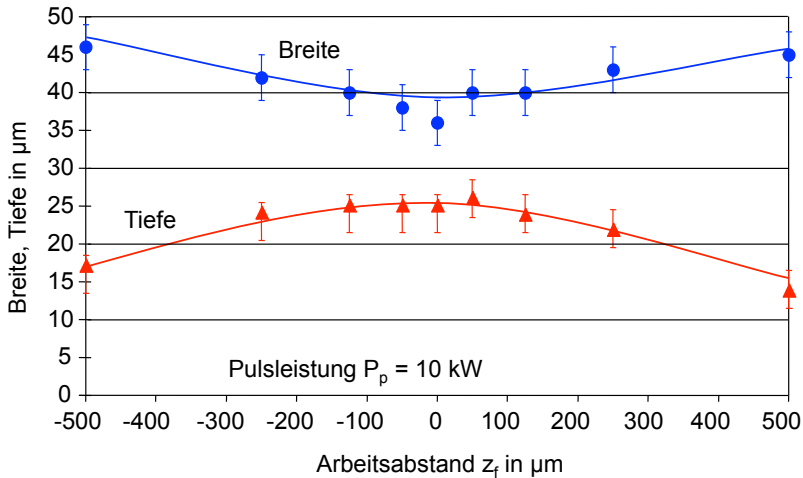
Abbildung 6.35: Abtragprofil bei hoher Pulsleistung,  $P_P = 28 \text{ kW}$



**Abbildung 6.36:** Bearbeitungszone des Abtrags aus Bild 6.33

bleibenden Überlappgrad zeigt Bild 6.37. Mit der Verringerung der Fokusslage  $z_f$ , d. h. bei Annäherung der Fokusebene an die Probenoberfläche, nimmt bei der Single-Pass-Herstellung von Nuten, d. h. mit einer einzelnen Linie gefertigt, die Tiefe der Strukturen in dem Maße zu, wie sich ihre Breite verringert. Die Tiefe besitzt bei einer Fokusslage  $z_f = 0 \mu\text{m}$  ein Maximum, das mit  $25 \mu\text{m}$  einen beinahe doppelt so hohen Wert aufweist wie bei einem Abstand der Strahlteile von  $500 \mu\text{m}$  zur Oberfläche (ca.  $15 \mu\text{m}$ ). Die Breite zeigt bei  $z_f = 0 \mu\text{m}$  ein Minimum von ca.  $35 \mu\text{m}$  und erreicht bei einem Arbeitsabstand von  $\pm 500 \mu\text{m}$  ca.  $45 \mu\text{m}$ . Die Geometrie der erzeugten Nuten ändert sich also deutlich.

Bei einem Arbeitsabstand zwischen  $-100 \mu\text{m}$  bis  $+100 \mu\text{m}$  ist die Kontur V-ähnlich, mit einer starken Verrundung der Spitze. Mit größerer Distanz der Fokusebene zur Probenoberfläche geht die Geometrie mehr zu einem Trapez oder Rechteck über – steile Kanten und ebener Boden. Maßgeblich für diese Modifikationen ist die Änderung der Leistungsdichte. Wie schon aus Abschnitt 6.3 bekannt ist, kontrahieren die Iso-Intensitätslinien mit kleiner werdendem Arbeitsabstand. Ein Vergleich mit Bild 5.27 liefert als Ergebnis, dass sich die Geometrie der im Einzelpuls abgetragenen Volumina von näpfchenförmig zu kegelartig ändert. Die Annäherung des Fokus an die Probenoberfläche führt zu tiefen V-förmigen Spuren mit einem hohen Grat an den Flanken, wie es



**Abbildung 6.37:** Breite und Tiefe von Linienstrukturen in Aluminium

in Bild 6.38 und Bild 6.39 für gleiche Pulsleistung (28 kW) und verschiedenen Arbeitsabstand (Bild 6.38:  $z_f = 125 \mu\text{m}$ ; Bild 6.39:  $z_f = 50 \mu\text{m}$ ) ersichtlich ist. Die Aufnahmen zeigen die Proben um  $30^\circ$  geneigt. Die Abtragspur in Bild 6.38 ist mit der aus Bild 6.33 identisch. Dabei gehen die Ergebnisse abermals konform zu den Beschreibungen des stationären Abtragmechanismus: Die steigende Leistungsdichte verlagert den Typus des Abtrags von Typ C mit geringer Schmelzeentwicklung zu Typ D mit deutlich mehr flüssiger Phase während der Bearbeitung – vergleiche mit Bild 2.2. Auch Bild 2.3, die Tiefenwirkung der Laserstrahlung, stützt diese Beobachtungen. Die strengere Fokussierung erzeugt eine dickere Schmelzeschicht, welche durch den Ablationsdruck von der Oberfläche gerissen wird.

Für einen effizienten Abtrag beim Wendelbohren ergibt sich unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Abschnitt 6.2.2 und den erläuterten Ausführungen unter Zuhilfenahme der Iso-Intensitätslinien dieses Abschnitts, dass eine Fokuslage in der Blechmitte hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit die optimale Einstellung darstellt. Weitere umfangreiche Untersuchungen und Analysen zu den verbleibenden Parametern, Vorschub und Überlappgrad, sowie die Erweiterung des Parameterfeldes um Pulsenergie, aufgewendete Gesamt- oder Streckenenergie,

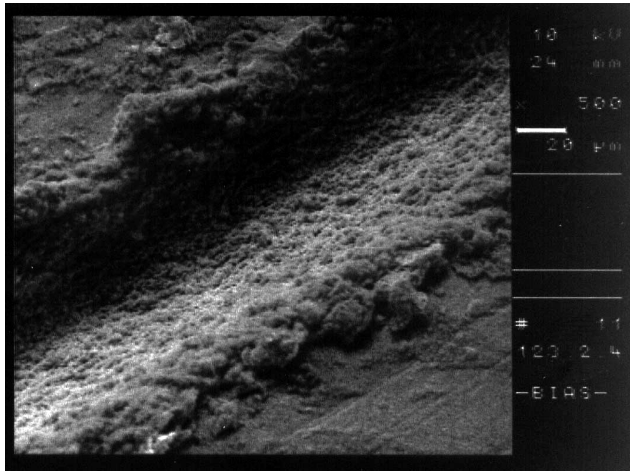


Abbildung 6.38: Arbeitsabstand  $z_f = 125 \mu\text{m}$

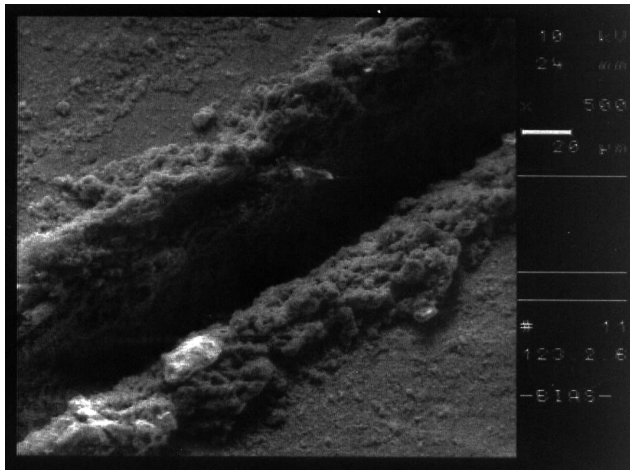
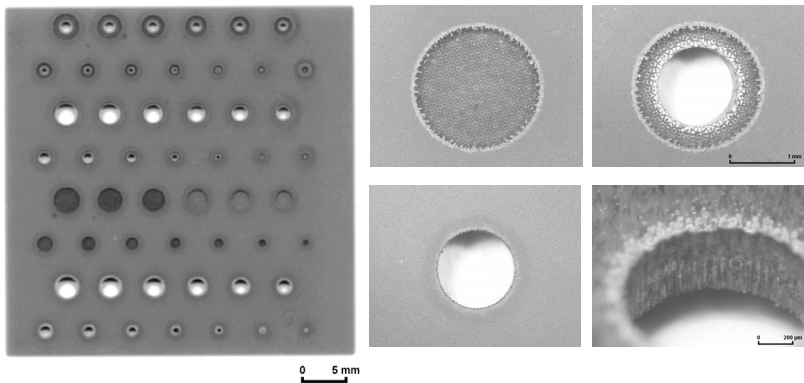


Abbildung 6.39: Arbeitsabstand  $z_f = 50 \mu\text{m}$

erbringen keinen belastbaren Ansatz zur numerischen Beschreibung des Wendelbohrens. Ebenso wenig Wirkung zeigt die Anwendung der statistischen Versuchsplanung und -auswertung. Daher liegt die Vermutung nahe, dass der Wendelabtrag nicht einem oder zwei Parametern in wesentlichem Maße gehorcht, sondern vielmehr einer Kombination von mehreren. Ein Grund hierfür ist das von [NIKONCHUK & POLYAKOV, 1992] beobachtete Abtragverhalten beim Ablatieren dünner Schichten: „Ist die Schnittbreite größer als die Schichtdicke, so entspricht der Mechanismus dem Abtrag an einer freien Oberfläche; im umgekehrten Fall muss die Kondensation des Materials an den Schnittwänden beim Abtragen ebenfalls berücksichtigt werden“. Gerade der zweite Teil ihrer Aussage ist auch beim Wendelabtrag maßgeblich. Damit erweitert sich aber auch die Bedeutung der Darstellung zur Tiefenwirkung der Laserstrahlung aus Bild 2.3, welche ursprünglich für den stationären Abtrag eingeführt wurde: „Ist der Quotient aus dem Durchmesser des Laserstrahls und der Dicke der entstehenden Schmelzschicht deutlich größer als 20, so hat die Strahlung kaum Tiefenwirkung. Liegt der Quotient um 20 oder darunter, kommt es zu einer Änderung im Wärmeleitungsverhalten und die einfallende Laserstrahlung bewirkt einen gerichteten Energieeintrag, der zu einem von Schmelzeantrieb dominierten Abtrag führt“. Der Wert des hier angeführten Quotienten wurde bei den Untersuchungen nicht betrachtet, seine Gültigkeit kann daher nicht bestätigt werden. Jedoch belegen die Ergebnisse, dass die allgemeine Vorstellung hinter dieser Aussage auch beim Laserstrahlwendelbohren und damit beim dynamischen Abtrag zutreffend ist.

Im Wesentlichen ist das Laserstrahlwendelbohren also durch die Schmelzphase geprägt. Dabei spielen jedoch nicht nur die Parameter eine Rolle, die den Schmelzanteil bestimmen, sondern vielmehr die Schmelze selbst. Anders als beim Bohren entweicht die Schmelze nicht mehr allein dem einfallenden Laserstrahl entgegen, sie wird nun durch den Ablationsdruck auch in den gerade entstandenen Schnittspalt gedrängt. Dabei bildet die erstarrte Schmelze sog. Schmelzebrücken – eine innige Verbindung mit den Wänden des Schnittspalts –, die für ein Festhalten des Bohrkerns sorgen. Erst wenn diese Schmelzebrücken aufgelöst sind, fällt das herauszutrennende Material aus dem Bohrloch. Dies gilt, sofern die lichte Weite der Bohrung größer ist als der doppelte Durchmesser der Bearbeitungszone; für kleinere Durchmesser wird auch der Bohrkern abgetragen.



**Abbildung 6.40:** Abtragen und Wendelbohren einer W-beschichteten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik

Die Schmelzeverdrängung in den gerade gebildeten Schnittspalt hinein ist der Grund für die z. Zt. nicht fassbare Parameterbeschreibung. Hier spielen weitere Faktoren wie Volumen und Viskosität sowie Überhitzung der Schmelze, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des bearbeiteten Materials, aber auch mechanische Effekte, wie Kaltverfestigung und das elastisch-plastische Verhalten des Werkstoffs, eine Rolle. Aufgrund der mikroskopischen Abmessungen sowohl des Schnittspalts wie auch des Schmelzevolumens und des Ablationsdrucks von mehreren kPa entziehen sich diese Einflussfaktoren einer quantitativen Beschreibung, wodurch ein numerisches Erfassen des Wendelabtrags verhindert wird. Dennoch können weitere prinzipielle Aussagen zum Wendelbohren schmelzender Werkstoffe getroffen werden, wie die Bilder 6.40 bis 6.42 untermauern.

In Bild 6.40 ist eine 1,5 mm dicke Platte aus W-beschichtetem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dargestellt, die zunächst partiell entschichtet und anschließend mit Bohrungen verschiedener Durchmesser versehen wurde – linker Bildteil. Alle Bohrungen auf der dargestellten Platte sind im Wendelabtrag hergestellt. Der Ausschnitt Mitte oben zeigt eine Zone, von der das Wolfram abgetragen wurde, mit einer zahnradartigen Struktur am Umkreis des entschichteten Bereichs. Diese sog. Rippel finden sich auch in der Bohrung (Ausschnitt rechts unten) wieder. Sie entstehen, wenn Pulsfolgefrequenz und Kreisfrequenz synchron sind, d. h. die Frequenz mit dem

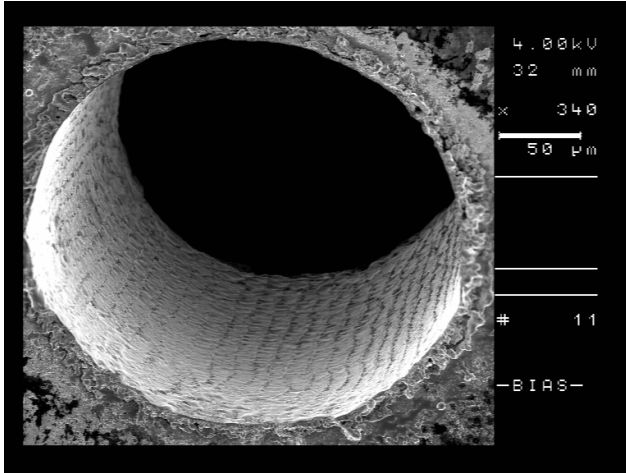


Abbildung 6.41: Wendelabtrag in Kupfer

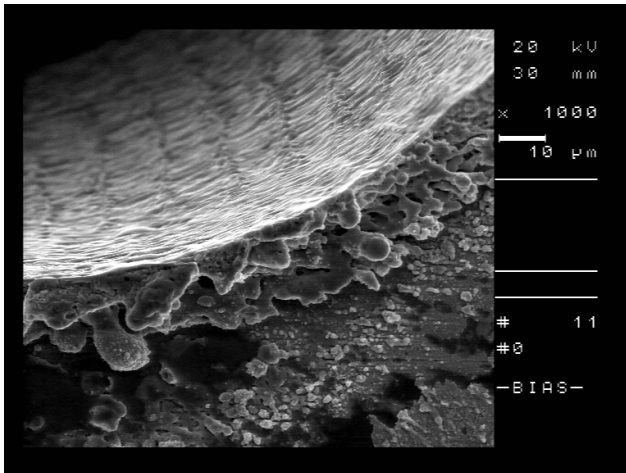


Abbildung 6.42: Detail aus Bild 6.41



kleineren Wert ein ganzzahliger Teiler der anderen ist. Im Ausschnitt rechts oben ist der Bohrungseintritt konzentrisch zur entschichteten Zone zu sehen. Der weiße Saum besteht aus niedergeschlagenem Aluminiumoxid, das sich farblich vom restlichen Material abhebt, da bei der Entschichtung stets eine Durchmischung des Beschichtungsmaterials mit dem Substratwerkstoff auftritt. Der Ausschnitt Mitte unten zeigt schließlich den Austritt ohne Rippelstruktur. An dem etwas dunkler gefärbten Saum, um die Bohrung herum, ist ein Wärmeeinfluss aus dem Bohrprozess erkennbar.

Insbesondere die Entstehung der Rippel kann durch eine geeignete Wahl von Pulsfolgefrequenz und Kreisfrequenz, mit der der Laserstrahl den Umkreis der Bohrung beschreibt, beeinflusst werden. Findet sich kein ganzzahliger Teiler für die beiden Frequenzen, so trifft der Laserstrahl bei einem nachfolgenden Umlauf nicht exakt auf eine Stelle am Umfang, die zuvor schon von einem Laserpuls bearbeitet wurde, sondern hat einen definierten Versatz. Damit lassen sich Rippel nahezu vollständig unterdrücken, siehe Bild 6.41 und Bild 6.42. Hier wurde eine Kupferscheibe mit einer Bohrung des Durchmessers  $d = 250 \mu\text{m}$  versehen. Durch Anpassung der Frequenzen laufen nun die Rippel nicht mehr parallel zum Bohrkanal, sondern weisen einen kleinen Winkel dazu auf. Zusätzlich bewirkt eine Verminderung der Pulsleistung und die damit einhergehende Reduzierung des Schmelzevolumens eine geringere Strukturhöhe der Rippel –  $< 1 \mu\text{m}$  – und einen verminderten Grat an der Strahleintrittsseite. Obwohl die energetischen Parameter reduziert und die dynamischen Parameter, wie Pulsfolgefrequenz und Vorschub, erhöht wurden, ergab sich keine Veränderung der Bearbeitungszeit.

## 6.6 Flächiger Abtrag

Der flächige Abtrag stellt sich als sehr unterschiedlich zu den bisher betrachteten Abtragarten dar.

- Beim Bohren erzeugen ortsfest applizierte Laserpulse, ähnlich Nadelstichen, den Abtrag. Das ablatierte Material, sowohl Metaldampf wie auch Schmelze, strebt gerichtet durch die entstehende Bohrung dem einfallenden Laserstrahl entgegen.
- Beim Wendelabtrag werden aufeinanderfolgende Laserpulse lateral überlagert. Im Material bildet sich ein Schnittpalt. Durch die

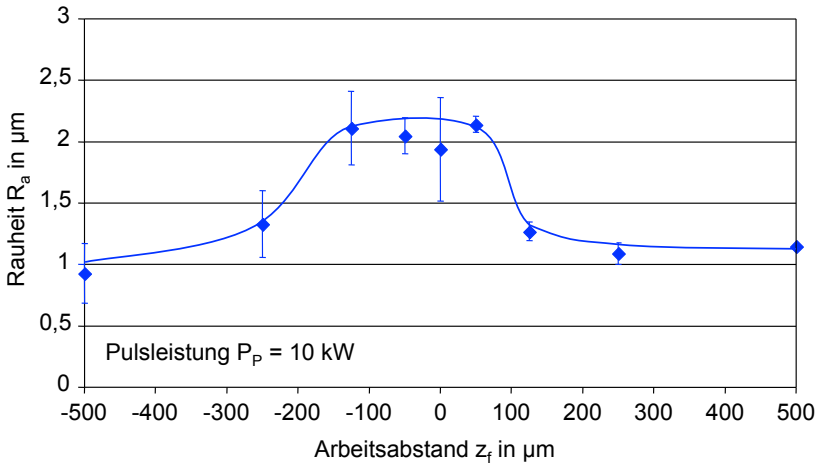
erzeugte Schnittfuge ändern sich die Strömungsverhältnisse des Abtragprozesses. Ein Teil der Schmelze wird durch den austretenden Metalldampf mitgerissen, der andere Teil entweicht in den Spalt. Dort kondensiert er in Form von Schmelzebrücken, die den Bohrkern wieder mit dem Grundwerkstoff verbinden.

- Die flächige Bearbeitung erfolgt durch Überlagerung der Laserpulse in der Ebene. Das Abtragverhalten entspricht überwiegend einem Abtrag von einer freien Oberfläche, d. h. das ablatierte Material wird nicht in eine bestimmte Richtung gezwungen. Die Prozessführung ist ähnlich zur Nutenherstellung aus Abschnitt 6.5, allerdings muss nun auch der Versatz zwischen parallelen Abtragspuren berücksichtigt werden. Und zu den bisher betrachteten Abtragsergebnissen tritt die Oberflächenqualität in Form von Rauheitswerten ( $Ra$ ,  $Rz$ ) hinzu.

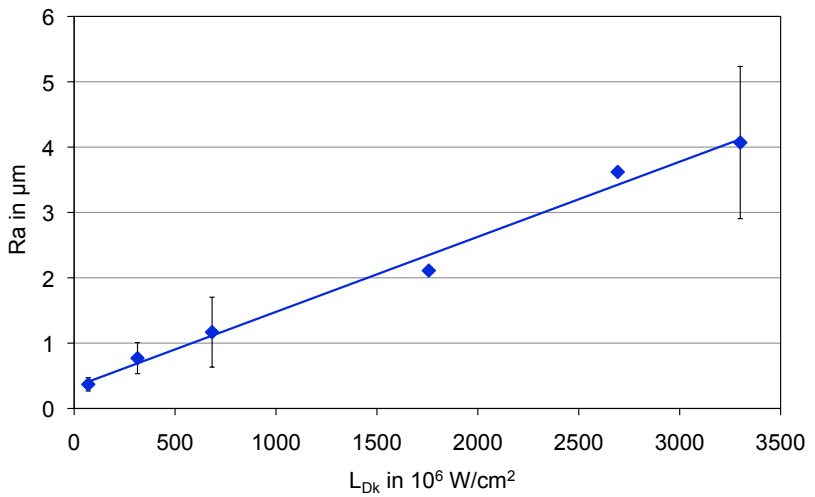
Daher werden an den Linienstrukturen aus Abschnitt 6.5 erste Daten zur Rauheit und ihrer Abhängigkeit von der Fokusslage und der Pulsleistung ermittelt. Die Anwendung der statistischen Versuchsplanung ermöglicht anschließend die Korrelation mit weiteren Parametern und Abtragergebnissen. Hierzu werden Gesenklflächen mit den Maßen  $5 \times 5 \times 0,2 \text{ mm}^3$  hergestellt und mit den bekannten Methoden charakterisiert.

### 6.6.1 Allgemeine Zusammenhänge

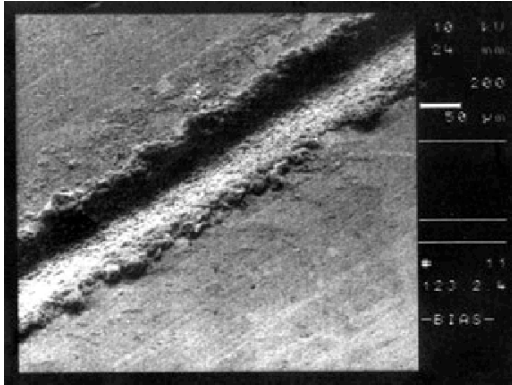
Die Analyse der Nuten hinsichtlich Rauheit, Bild 6.43, liefert für die Fokusslage eine ähnliche Abhängigkeit wie für die Tiefe der Nuten. Bei großem Arbeitsabstand beträgt  $Ra \approx 1 \mu\text{m}$ , während sie für eine Fokusslage im Bereich von  $\pm 100 \mu\text{m}$  mit rund  $2 \mu\text{m}$  den doppelten Wert aufweist. Im Modell der Iso-Intensitätslinien findet sich auch hier eine Erklärung: Mit zunehmendem Abstand des Fokus von der Oberfläche wird die eingesetzte Leistung gleichmäßiger über den Querschnitt verteilt, wobei die Leistungsdichte abnimmt. Bezieht man die aufgewendete Pulsleistung auf die Ausdehnung der Bearbeitungszone, so erhält man eine korrelierte Leistungsdichte  $L_{Dk}$ . Sie stimmt zwar betragsmäßig nicht mit der tatsächlichen Leistungsdichte  $L_D$  überein, jedoch genügt sie als leicht zu bestimmende Größe den Anforderungen zur Ermittlung prinzipieller Abhängigkeiten. Darüber hinaus folgt sie in konsequenter Weise den früheren Ausführungen dieses Abschnitts, die aufzeigen, dass die Strahlausbreitung allein die beobachteten Ergebnisse nicht beschreiben kann.



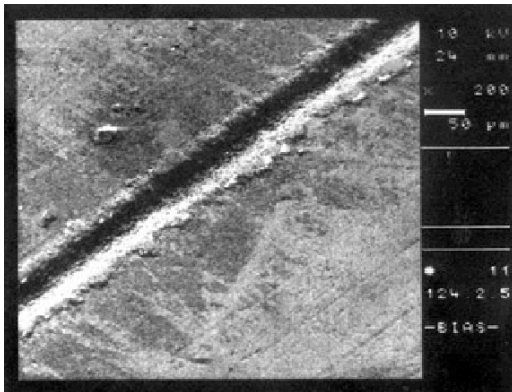
**Abbildung 6.43:** Einfluss des Arbeitsabstands auf die Rauheit



**Abbildung 6.44:** Einfluss der korrelierten Leistungsdichte auf die Oberflächenqualität



Werkstoff: Aluminium  
 Korrelierte Leistungsdichte  $L_{DK} = 680 \text{ MW/cm}^2$   
 Überlapp  $dx = 95\%$   
 Breite  $b = 42 \mu\text{m}$   
 Tiefe  $s = 20 \mu\text{m}$   
 Rauheit  $Ra = 0,7 \mu\text{m}$



Werkstoff: Aluminium  
 Korrelierte Leistungsdichte  $L_{DK} = 800 \text{ MW/cm}^2$   
 Überlapp  $dx = 90\%$   
 Breite  $b = 31 \mu\text{m}$   
 Tiefe  $s = 20 \mu\text{m}$   
 Rauheit  $Ra = 1,2 \mu\text{m}$

Abbildung 6.45: Bearbeitungsbeispiele – Linienstrukturen

Für die korrelierte Leistungsdichte findet sich schließlich bei gleichem Arbeitsabstand ( $z_f = 125 \mu\text{m}$ ) und gleichem Überlappgrad (95 %) ein linearer Zusammenhang mit der Rauheit  $Ra$ . Er ist exemplarisch in Bild 6.44 für Aluminium dargestellt. Die Rauheit steigt demnach gleichmäßig mit der korrelierten Leistungsdichte. Andererseits ist den Parametern aus Bild 6.45 zu entnehmen, dass mit abnehmender korrelierter Leistungsdichte auch die Abtragrate sinkt. Zwar ist, wie an den Geometriedaten der Abtragspuren abgelesen werden kann, der absolute Abtrag mit der niedrigen Leistungsdichte bei einem Durchgang größer. Die aufgewendete Energiemenge steigt jedoch aufgrund des höheren Überlappgrades um den Faktor 1,8, so dass mehr Material abgetragen werden kann. Dennoch sinkt die Abtragrate pro Puls. Sie reduziert sich im gleichen Maße wie die korrelierte Leistungsdichte jeweils um ca. 10 %.

Als Maß für die Abtragrate wird für den Volumenabtrag pro Puls eine ebenfalls lineare Abhängigkeit zur Pulsenergie ermittelt. Die Auswertung der experimentellen Daten liefert für Aluminium Gleichung 6.13:

$$V_P = 3 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{m}^3}{\text{J}} \cdot E_P [\text{mJ}] + 1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^3 \quad (6.13)$$

mit  $V_P$ : Volumenabtrag pro Puls,  $E_P$ : Pulsenergie

Dieses Ergebnis geht konform mit den Resultaten von [MAYERHOFER, 1997], der für die Bearbeitung von Metallen mit Kupferdampf-Laserstrahlung zeigen konnte, dass in werkstoffabhängigen Grenzen der Volumenabtrag linear verläuft.

Aus den Ergebnissen zum Einfluss der Leistungsdichte und der Pulsleistung auf die Abtragrate und die Rauheit kann auf ein ähnliches Zusammenwirken zwischen diesen beiden geschlossen werden. Und einen Schritt weitergehend lässt sich daraus eine Bearbeitungsstrategie mit der Aufteilung des Prozesses in Schruppen mit hoher Abtragrate und großer Rauheit und Schlichten mit niedriger Abtragrate bei gleichzeitig reduzierter Rauheit ableiten.

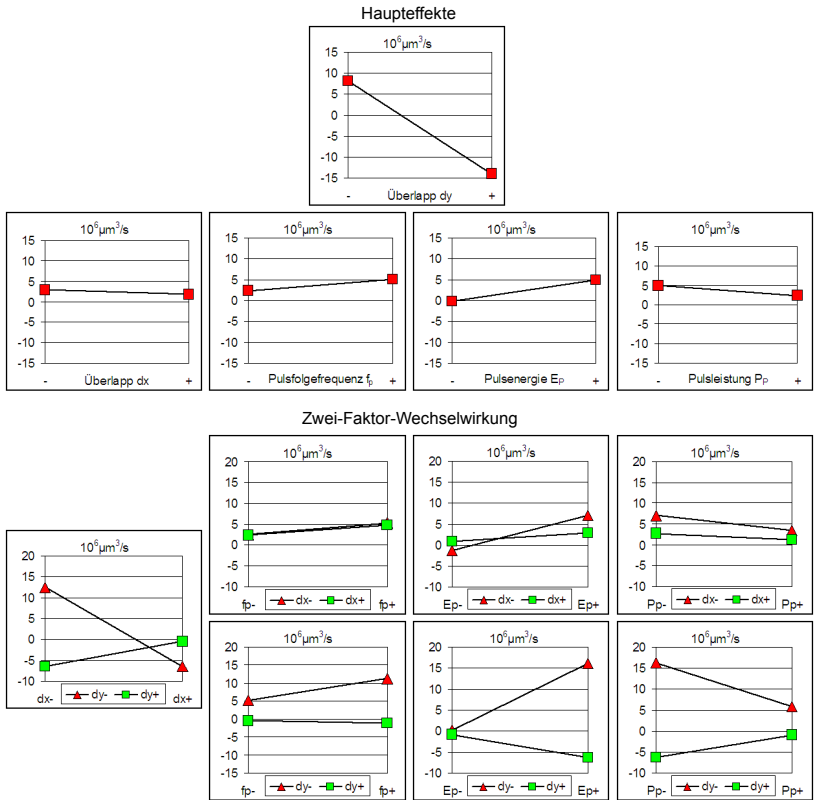
## 6.6.2 Parameterkorrelation

Die zunehmende Komplexität der Zusammenhänge erfordert nun die Einbeziehung der statistischen Versuchsplanung zur Ermittlung von Parameterabhängigkeiten. Hierzu sind für die zu untersuchenden Paarungen die Extremalwerte der Einflussgrößen miteinander zu kombinieren und anschließend hinsichtlich des gesuchten Bearbeitungsergebnisses

mittels statistischer Methoden zu analysieren. Im günstigsten Fall führt dieses Vorgehen zu einer direkten Bestimmung formelhafter Zusammenhänge, im ungünstigen Fall können zumindest Parameterkombinationen ermittelt werden, die einen signifikanten Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis haben. Aufgrund der in Abschnitt 5.1.3 vorgestellten gegenseitigen Abhängigkeit zahlreicher Laserparameter für den beim flächigen Abtrag eingesetzten Nd:YAG-Laser trifft für diese Arbeit Letzteres zu.

Zunächst werden die Einzeleffekte auf die Abtragrata  $A_R$  bestimmt, anschließend die Kombination von Parametern. In Bild 6.46 sind die graphischen Auswertungen hierzu zusammengefasst. Von den Einzelparametern hat nur der Überlapp in  $y - dy$ , also senkrecht zur Hauptbewegungsrichtung, einen signifikanten Einfluss auf die Abtragrata  $A_R$  und ist deshalb in der Darstellung vorangestellt. Es zeigt sich, dass die Abtragrata  $A_R$  maximal wird, wenn  $dy$  möglichst gering ist. Die Betrachtung der Zwei-Faktor-Wechselwirkung liefert für  $dy$  auch in Kombination mit dem Überlapp  $dx$ , der Pulsfolgefrequenz  $f_P$ , der Pulsenergie  $E_P$  und der Pulsleistung  $P_P$  eine bestimmende Wirkung. Die höchsten Abtragraten sind hiernach stets für kleine Werte des Überlapps  $dy$  zu erwarten, wobei die Pulsfolgefrequenz  $f_P$  sowie die Pulsenergie  $E_P$  maximal einzustellen sind, die Pulsleistung  $P_P$  jedoch klein. Die kombinierte Einflussnahme dieser Parameter mit dem Überlapp  $dy$  entspricht in diesem Fall auch ihrem jeweiligen Einzeleffekt. Wählt man hingegen einen hohen Überlapp  $dy$ , so kehren sich ihre Einflüsse um, dann allerdings bei deutlich geringeren Abtragraten. Für die Kombinationen mit  $dx$  ergibt sich nur in Verbindung mit dem Überlapp  $dy$  eine wesentliche Beeinflussung. Hier gilt: Bei kleinem Überlapp  $dy$  ist für eine maximale Abtragrata auch der Überlapp  $dx$  klein zu wählen und bei steigendem Überlapp  $dy$  ist  $dx$  entsprechend anzupassen. Für die weiteren oder höheren Parameterkombinationen, also Drei- und Mehrfach-Wechselwirkungen, sind keine signifikanten Einflüsse zu notieren.

Eine zusammenfassende Interpretation dieser Ergebnisse unter Berücksichtigung des Effizienzansatzes aus Gleichung 2.9, nach der zum Abtragen auch Material verdampft werden muss, führt zu der Aussage: Die Abtragrata  $A_R$  wird bei einem durch Schmelzeaustrieb – hohe Pulsenergie  $E_P$  – bestimmten punktförmigen Abtrag – Überlapp  $dx$  und  $dy$  minimal – am größten. Allerdings darf die Leistungsdichte  $L_D$  oder  $L_{Dk}$  – wegen der zugleich geforderten geringen Pulsleistung  $P_P$  bei fester Fokusslage  $z_f$ , also konstanter Bearbeitungszone – gerade die Abtragschwelle erreichen. Damit wird einer aus der Theorie zum Abtra-



**Abbildung 6.46:** Einfluss auf die Abtragrata  $A_R$  beim flächigen Abtragen

gen mit kurz-gepulster Laserstrahlung – Abschnitt 2.1.3 – ableitbaren sowie den Ergebnissen aus den vorangegangenen Abschnitten folgenden Erwartungshaltung entsprochen. Für den flächigen Abtrag genügt diese Aussage allein jedoch nicht. Hierfür müssen weitere Kriterien in Betracht gezogen werden. Für die flächige Strukturierung bietet sich die Rauheit als Qualitätsmerkmal an.

Flächige Strukturen hoher Qualität zeichnen sich u. a. durch eine geringe Rauheit aus. Bild 6.47 zeigt hierzu die gleiche Übersicht wie Bild 6.46 mit der Rauheit  $R_z$  als maßgeblicher Größe.

Die Analyse der Daten weist nur den vorangestellten Einzelparameter Überlapp  $dx$  als signifikant aus. Er ist möglichst klein zu wählen. In der Kombination sind jedoch neben den Wechselwirkungen des Überlapps  $dx$  mit dem Überlapp  $dy$ , auch die Wirkungen der beiden mit der Pulsenergie  $E_P$  und der Pulsleistung  $P_P$  zu beachten. Wechselwirkungen mit der Pulsfolgefrequenz  $f_P$  sowie höhere Parameterkorrelationen zeigen jedoch keine signifikante Beeinflussung der betrachteten Rauheit  $R_z$  auf. Um sie jedoch klein zu halten sollte die Pulsenergie  $E_P$  auch in Kombination mit den beiden Überlappgraden  $dx$  oder  $dy$  ebenfalls nur mit geringen Werten eingesetzt werden. Für die Pulsleistung ergibt sich das genaue Gegenteil. In beiden Fällen gilt jedoch, dass der Überlapp  $dx$  hohe Werte und der Überlapp  $dy$  niedrige Werte annehmen sollte. Dies steht im Widerspruch zur Zwei-Faktor-Wechselwirkung der beiden Überlappgrade  $dx$  und  $dy$ . Die geringste Rauheit  $R_z$  stellt sich demnach dann ein, wenn beide kleine Werte aufweisen. Liegen die Einstellung der beiden bei hohen Werten, steigt auch die Rauheit  $R_z$ . Und ist einer von beiden maximal, der andere jedoch minimal gewählt, so erreicht die Rauheit  $R_z$  jeweils maximale Werte.

Zusammenfassend kann daraus gefolgert werden, dass für die Einstellung der Überlappgrade ein Kompromiss gefunden werden muss, bei dem der Überlapp  $dx$  etwas höhere Werte aufweisen sollte als der Überlapp  $dy$ . Die Auswirkung von Pulsenergie  $E_P$  und Pulsleistung  $P_P$  geht wieder konform zur theoretischen Erwartung: Geringerer Energieeinsatz bei jedoch höherer Leistung verschieben das thermodynamische Gleichgewicht aufgrund gestörter Wärmeleitung in Richtung Dampfphase und der die Rauheit bestimmende Schmelzeanteil sinkt. Der Einfluss der Pulsfolgefrequenz hingegen beschränkt sich auf die Steuerung der während des Prozesses eingesetzten Gesamtenergie, die die Gesamtmasse des abgetragenen Materials bestimmt. Im Umkehrschluss ist daher bei der flächigen Bearbeitung jeder Laserpuls als Einzelereignis aufzufassen, für den die Mechanismen des stationären Abtrags gelten. Die Pulsdauer im ns-Bereich sowie der Versatz zwischen zwei Laserpulsen bewirken, dass die Wechselwirkung von zwei aufeinanderfolgenden Pulsen im Werkstoff nicht kumuliert; der nachfolgende Laserpuls trifft stets auf hinreichend kaltes und erstarrtes Material.

Für die zusammenfassende Bewertung der beiden Analysen sind in Tabelle 6.1 die qualitativen Zusammenhänge der Bearbeitungsparameter auf die untersuchten Merkmale des flächigen Abtrags, Abtragate  $A_R$  und Rauheit  $R_z$ , noch einmal erfasst. Dabei bedeutet:  $R_z$  klein,



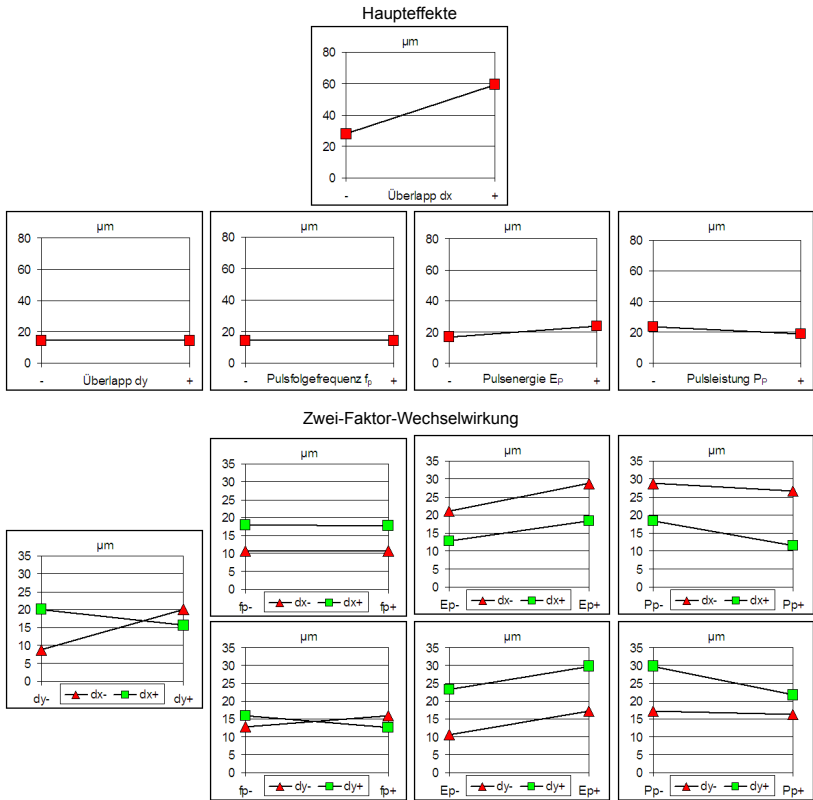


Abbildung 6.47: Einfluss auf die Rauheit  $R_z$  beim flächigen Abtragen

dass ein möglichst kleiner Wert für die Rauheit  $R_z$ , und  $A_R$  groß, dass ein möglichst großer Wert für die Abtratarate  $A_R$ , aus Gründen der Wirtschaftlichkeit angestrebt werden. Darüber hinaus zeigen „+“ und „-“ an, wie der jeweilige Parameter bzw. eine Parameterkombination gewählt werden sollte, um das vorgegebene Ziel zu erreichen. In der Spalte „Widerspruch“ deutet das Zeichen „ $\zeta$ “ an, wenn die Werte bestimmter Parameterkombinationen für die Wahl kleiner Rauheit und großer Abtratarate widersprüchlich auszuwählen sind. „0“ indiziert einen Parameter, der keinen signifikanten Einfluss auf das jeweilige Qualitätskriterium besitzt. Die Angabe von Zahlenwerten ist an dieser Stelle

**Tabelle 6.1:** Qualitatives Zusammenwirken der Bearbeitungsparameter zur Einflussnahme auf Abtragrate und Rauheit beim flächigen Abtragen

	<b>Bearbeitungs- parameter</b>	$A_R$ [groß]	$Rz$ [klein]	<b>Wider- spruch</b>
Einzel- wirkung	$dx$	–	–	
	$dy$	–	0	
	$f_P$	+	0	
	$E_P$	+	–	↯
	$P_P$	–	+	↯
Kombinierte Wirkung	$dx - dy$	– –	– –	
	$dx - f_P$	0	0	
	$dx - E_P$	0	+ –	
	$dx - P_P$	0	+ +	
	$dy - f_P$	– +	0	
	$dy - E_P$	– +	– –	↯
	$dy - P_P$	– –	– +	↯

nicht zweckmäßig, da auch die Bearbeitungsstrategien – Kapitel 7 – einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse des flächigen Abtragens haben; der höhere absolute Abtrag in Bild 6.45 bei geringerer Leistungsdichte, jedoch größerem Überlapp, weist bereits darauf hin. Erst mit ihrer Kenntnis kann diese Form der Bearbeitung in hinreichendem Maße erfasst und die Resultate der statistischen Versuchsplanung verifiziert werden.

Tabelle 6.1 verdeutlicht, dass das flächige Abtragen bezüglich der beiden bedeutenden Kriterien, Abtragrate und Rauheit, widersprüchliche Einstellungen der Bearbeitungsparameter erfordert. Eine hohe Abtragrate führt zu einer ebenfalls hohen Rauheit, worunter die Qualität leidet. Und eine geringe Abtragrate mit kleiner Rauheit geht zu Lasten der Bearbeitungszeit, was letztlich höhere Stückkosten nach sich zieht. Allerdings motiviert dieses Ergebnis, die aus der Zerspaltung bekannte Prozessaufteilung in Schruppen und Schlichten auf die Laserendbearbeitung zu übertragen.

# Kapitel 7

## Optimierungsstrategien

### 7.1 Stationäres Abtragen

#### 7.1.1 Verringerung der Bearbeitungsdauer

Die Strahlkaustik zur Gestaltung der Bohrung zu nutzen – Abschnitt 6.2 – führt zu einer Verlängerung der zum Durchbohren benötigten Zeit, wie Untersuchungen mit Linsen verschiedener Brennweite bei Variation der Fokusslage zeigen. Da die visuelle Beobachtung des Zeitpunkts der Durchbohrung nur unzureichend ist, werden die Messungen elektronisch aufgezeichnet. Ein Speicheroszilloskop empfängt hierzu das Signal einer Photodiode, die unterhalb des Blechs im Strahlengang positioniert wird. Zur Ansteuerung des Oszilloskops wird das Triggersignal des Lasers verwendet. Auf diese Weise ist eine schnelle und vom Beobachter unabhängige Ermittlung der Dauer bis zum Bohrlochdurchbruch möglich.

In Bild 7.1 sind die Messkurven dieser Versuche dargestellt. Ihnen ist zu entnehmen, dass die Bohrzeit nahezu unbeeinflusst von der Fokusslage bei Einsatz einer Linse mit 120 mm Brennweite im Vergleich zur Bohrzeit mit einer Linse der Brennweite  $f = 300$  mm um 15 ms steigt. Generell ist eine Verlängerung der Bohrzeit mit zunehmender Entfernung von der Fokusslage  $z_f = 0$  mm zu beobachten. Dabei bleibt, wie in Bild 6.21 ersichtlich, der Austrittsdurchmesser annähernd unbeeinträchtigt für beide Brennweiten. Allerdings lässt sich mit der langbrennweitigen Linse die Geometrie des Bohrkanals nicht so stark verändern wie mit der Linse kurzer Brennweite. Die Bohrungen in Titan bleiben bei der untersuchten

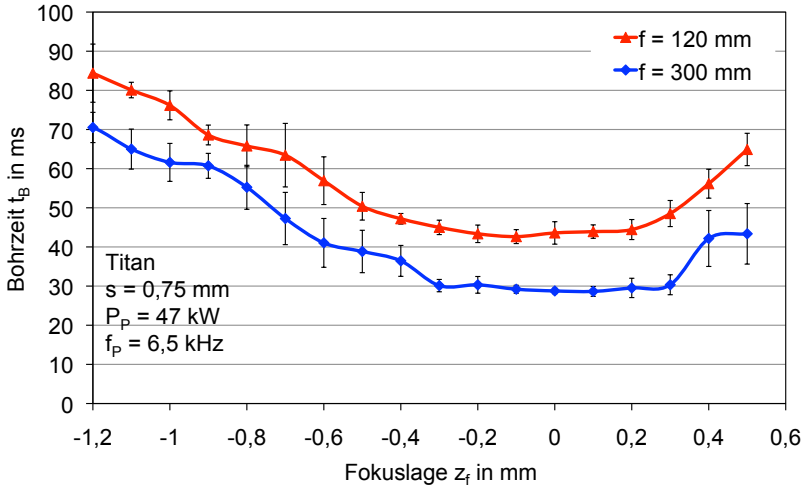


Abbildung 7.1: Bohrzeitenvergleich

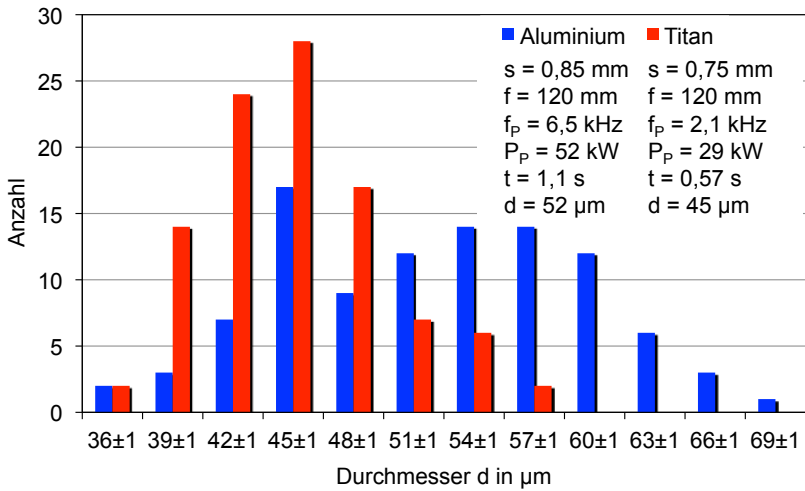
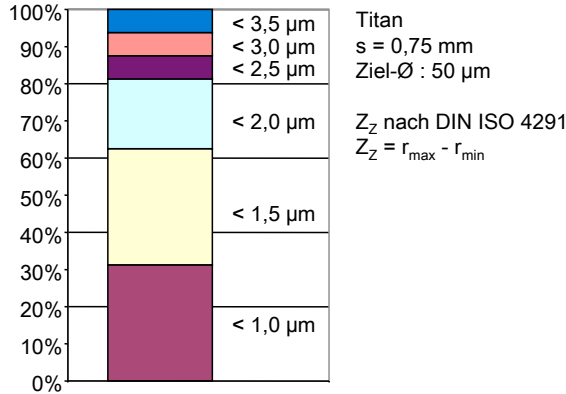


Abbildung 7.2: Reduzierung der Durchmesserschwankungsbreite



**Abbildung 7.3:** Rundheitsabweichung

Blechdicke  $s = 0,75 \text{ mm}$  und gleicher Pulsleistung  $P_P = 45 \text{ kW}$  für die Brennweite  $f = 300 \text{ mm}$  stets positiv konisch. Die Anwendung der Iso-Intensitätslinien auf diesen Fall geht analog zur Deutung der Ergebnisse aus Bild 6.19 und Bild 6.20 in Abschnitt 6.3, die den Einfluss der Blechdicke auf die Konizität zum Inhalt hat.

Die Kontraktion der Grenzintensität im Bereich der Strahltaile ist für dieses Material mit der gewählten Pulsleistung nicht zu beobachten. Aufgrund der längeren Brennweite ist die Einschnürung weniger ausgeprägt und eine negative Konizität tritt bei der betrachteten Blechdicke nicht mehr auf. Mit höherem Leistungseinsatz kann der Effekt jedoch auch in deutlich dickerem Material noch beobachtet werden, vgl. Bild 6.28.

Weitere Analysen der Bohrungen in Aluminium und Titan, die einen Durchmesser von  $d = 50 \mu\text{m}$  erreichen sollen, vgl. Bild 7.2, liefern bei Einsatz der Linse mit der Brennweite  $f = 120 \text{ mm}$  besonders für Aluminium eine große Schwankungsbreite, die bei einem mittleren Durchmesser von  $52 \mu\text{m}$  zwischen  $36 \mu\text{m}$  und  $67 \mu\text{m}$  liegt. Durch Anpassen der Bearbeitungsparameter verringert sich die Durchmesser-schwankung für Titan auf einen Bereich von  $35 \mu\text{m}$  bis  $56 \mu\text{m}$  mit einem Häufungspunkt um den Mittelwert von  $45 \mu\text{m}$ . Dabei wurde für beide Materialien eine Fokusslage auf der Blechoberfläche gewählt.

Zusätzliche Auswertungen der bei diesen Untersuchungen erzeugten Bohrungen zeigen eine weitere Auswirkung auf die Qualität der

Bohrungen. Neben der Konizität ist die Rundheitsabweichung nach DIN ISO 4291 ein Maß für die Qualität von Bohrungen. Die maximale Rundheitsabweichung der mit Strahlung eines KupferdampfLasers erzeugten Löcher in Titan, Bild 7.3, mit etwas weniger als 10 % des Zieldurchmessers korreliert gut mit der Pulsleistungsschwankung des verwendeten Lasersystems – vgl. Bild 5.13.

Über die Brennweite der Linse und den Arbeitsabstand kann also bei fokussierender Bearbeitung Einfluss auf den Prozess beim Perkussionsbohren genommen werden. Daher wird zur weiteren Optimierung, insbesondere zur Verringerung der Bohrzeit, die Mitführung des Fokus untersucht. Hierfür stehen verschiedene Variationen zur Auswahl:

- Fokusslage während der Bearbeitung fest auf der Blechoberfläche (Referenz)
- Fokusslage stets in der Blechmitte
- Mitführen des Fokus um die halbe Blechdicke, ausgehend vom Fokus auf der Blechoberfläche
- Mitführen des Fokus um die halbe Blechdicke, ausgehend von der Blechmitte
- Mitführen des Fokus um den gesamten Blechquerschnitt, ausgehend vom Fokus auf der Blechoberfläche

Die eingesetzten Parameter des Lasers und die ermittelten Ergebnisse sind in Bild 7.4 bis Bild 7.6 ersichtlich.

Bild 7.4 zeigt, dass mit dem Fokus auf der Blechoberfläche während des gesamten Bohrprozesses die längsten Bohrzeiten erreicht werden. Demgegenüber bewirkt eine kontinuierliche Mitführung des Fokus über die halbe Blechdicke eine Verkürzung der Bohrdauer um ca. 6 %. Liegt der Fokus fest in der Blechmitte, so kann eine Verkürzung der Bohrzeit um 9 % beobachtet werden; gleiches gilt, wenn der Fokus kontinuierlich von der Blechmitte bis zur Blechunterseite während des Bohrens mitgeführt wird. Bewegt sich der Fokus permanent mit dem Bohrlochgrund, von  $z_f = 0$  mm bis  $z_f = -0,8$  mm, so erfährt die Bohrzeit die maximale Reduzierung mit ca. 10 %.

Eine Auswirkung auf den Austrittsdurchmesser ist ebenfalls zu beobachten (Bild 7.5): Führt die Verlagerung des Fokus in die Blechmitte nur zu einer Verringerung um ca. 7 %, so bewirkt die Mitführung des Fokus

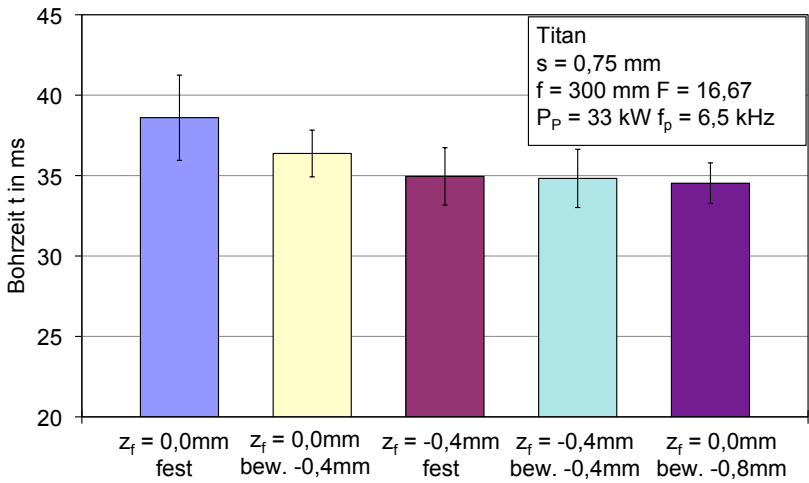


Abbildung 7.4: Verringerung der Bohrzeit

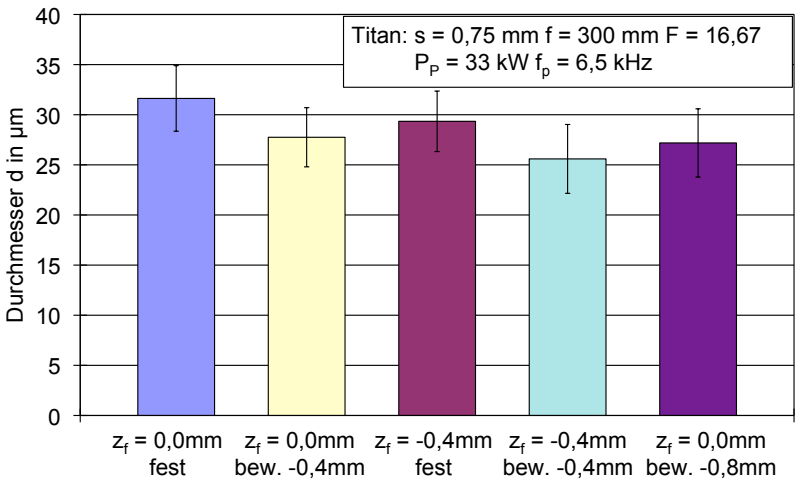
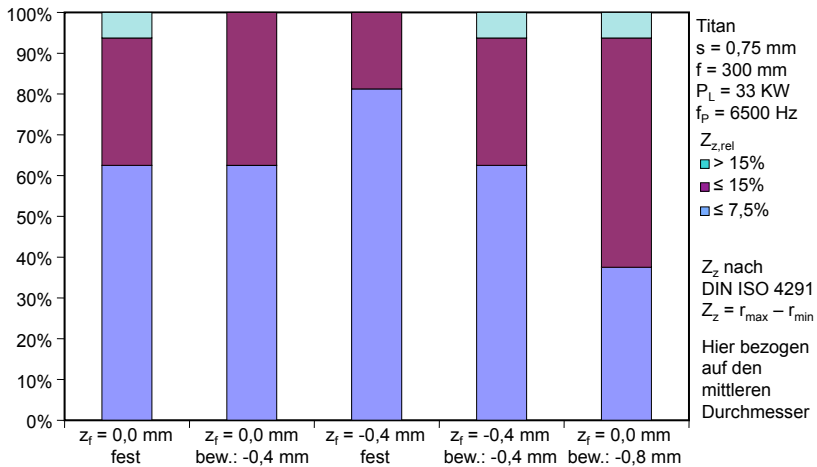


Abbildung 7.5: Beeinflussung des Austrittsdurchmessers



**Abbildung 7.6:** Relative Rundheitsabweichung bei Variation der Fokusslage

eine Reduzierung des Durchmessers zwischen 15 % und 20 %. Sie kann durch Erhöhen der Pulsleistung, wie in Abschnitt 6.2.1 gezeigt, ausgeglichen werden. Ein signifikanter Einfluss auf die Messwertschwankung ist für beide betrachteten Größen nicht zu erkennen.

Zur Klassifizierung der Rundheitsabweichung, siehe Bild 7.6, wird die Messgenauigkeit der im Mikroskop ermittelten Daten herangezogen. Somit liegt unter Beachtung der erzielten Durchmesser eine relative Rundheitsabweichung von 7,5 % innerhalb des Messfehlers. Größere Abweichungen sind als signifikant zu erachten, wobei Werte bis 15 %, im betrachteten Fall, noch als tolerierbar angesehen werden.

Damit ergibt sich folgendes Bild: Die Bearbeitung mit festem Fokus auf der Blechoberfläche oder bei um die halbe Blechdicke bewegtem Fokus liefert – unabhängig vom Startpunkt, Blechoberfläche oder Blechmitte – annähernd identische Ergebnisse. Besondere Beachtung muss der Bearbeitung bei permanent mitgeführtem Fokus geschenkt werden, da sich die Rundheitsabweichung erheblich verschlechtert. Bei der Bewegung der Linse um 0,8 mm machen sich Positionstoleranzen senkrecht zur Bewegungsrichtung der z-Achse – eine Taumbewegung – bemerkbar. Daraus resultiert die größere Streuung der relativen Rundheitsabweichung. Im Gegensatz dazu bewirkt die Positionierung des Fokus in der



Blechmitte während des gesamten Bohrvorgangs eine Verminderung der Messwertstreuung, obwohl auch hier eine deutliche Reduzierung der Bearbeitungszeit erzielt wird.

Eine Interpretation dieser Ergebnisse gelingt wiederum unter Beachtung der Iso-Intensitätslinien. Bei festem Fokus auf der Blechoberfläche wird der Abtrag nur mit dem linken Bereich aus Bild 6.26 realisiert; das abzutragende Volumen ist für eine vorgegebene Blechdicke hier maximal, woraus sich bei konstanter Pulsleistung die längste Bohrdauer und der größte Austrittsdurchmesser ergibt. Die deutlich längere Bohrzeit bewirkt eine verstärkte Wechselwirkung der Strahlung mit der Bohrungswand über Absorption aufgrund von Mehrfachreflektionen, so dass hier abschmelzendes Material den Bohrvorgang beeinträchtigt und einen instabileren Prozess nach sich zieht. Im Gegensatz dazu führt der stationäre Fokus in Mittellage zum geringsten Volumenabtrag, die Bohrzeit ist verkürzt und der Austrittsdurchmesser nimmt etwas ab. Die geringere Bohrdauer wirkt dabei prozessstabilisierend. Die beiden Fälle mit festem Fokus unterscheiden sich besonders durch die konstante Intensitätsverteilung über den Blechquerschnitt entlang des Bohrkanals während des gesamten Bohrvorgangs im Vergleich zur mitgeführten Strahltaile. Hier ändert sich die Intensitätsverteilung an einem definierten Ort in der Bohrung stetig. Daraus resultiert bei Mitführung des Fokus um die gesamte Blechdicke eine Abschattung der Strahlung am bereits erzeugten Bohrkanal, wodurch die Intensität mit zunehmender Bohrtiefe immer weiter abnimmt. Der Austrittsdurchmesser wird kleiner als im Falle eines stationären Fokus. Allerdings befindet sich der Bohrgrund immer im Fokus, was letztlich die beobachtete Verkürzung der Bohrdauer bewirkt. Beginnt der Bohrprozess mit der Strahltaile auf der Blechoberfläche und endet mit dem Fokus in der Blechmitte, so wird die einfallende Strahlung den bereits gebildeten Bohrkanal erst aufweiten, da die Iso-Intensitätslinien hinter der Strahltaile einen größeren Querschnitt aufweisen. Dies führt zu Intensitätsverlusten im Bohrgrund und zeigt sich im Austrittsdurchmesser, der ebenfalls kleiner ist als bei stationärem Fokus in der Blechmitte. Da sich der Fokus im zeitlichen und räumlichen Mittel näher am Bohrgrund befindet als bei fester Fokusslage auf der Blechoberfläche, verkürzt sich die Bohrzeit im Vergleich dazu. Gegenüber der festen Fokusslage in der Blechmitte ergibt sich wegen der Strahlabschattung kein Vorteil. Im Falle des um die halbe Blechdicke mitgeführten Fokus und einer Endposition auf der Blechunterseite entsteht wegen der Kontraktion der Iso-Intensitätslinien im Bereich

der Strahltaile der kleinste Austrittsdurchmesser. Da der Bohrprozess mit einem vergleichsweise großen Querschnitt der Iso-Intensitätslinien beginnt, jedoch mit dem schmalsten endet, findet keine oder nur eine geringe Abschwächung der Strahlung am bereits erzeugten Bohrkanal statt und die Intensität steigt bis zum Durchbohren stetig weiter an. Daher fällt die Bohrdauer, mit Ausnahme des stets im Bohrgrund positionierten Fokus, auch gegenüber allen anderen Versuchen geringer aus.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine optimale Kombination von Prozessgeschwindigkeit und Bohrqualität gewährleistet ist, wenn der Fokus während der gesamten Bearbeitungszeit in der Blechmitte liegt. Die weiteren Untersuchungen zum Bohren werden daher stets mit dem Fokus in Mittellage durchgeführt.

### 7.1.2 Debris – Redeposit

Die Beobachtung des Bohrprozesses und die Charakterisierung der Bohrungen im Mikroskop zeigen immer die Entstehung von Schmelze an. Ein beträchtlicher Anteil des Abtrages ist schließlich auf das Austreiben von Schmelze durch den Materialdampf zurückzuführen. Ein Teil des geschmolzenen Materials umgibt als feiner, gelegentlich festhaftender Niederschlag die Bohrung, die sog. Debris, und ein weiterer Teil wächst als Grat entlang des Bohrungsumfanges. Dieser kann, wie Mayerhofer gezeigt hat [MAYERHOFER, 1997], entweder eine Wulst oder eine Art Kamin bilden, der bei Versuchen im Unterdruck eine Höhe erreicht, die der Blechdicke entspricht. Da beim Perkussionsbohren das Material nur in Richtung des einfallenden Strahls entweicht, liegt auch eine Beeinflussung des Bohrprozesses und der Qualität durch die Abtragprodukte nahe. Im Folgenden werden daher Untersuchungen vorgestellt, die zum Ziel haben, das abgetragene Material effizienter aus dem sich bildenden Bohrloch zu entfernen.

Aus der Laser-Makromaterialbearbeitung sind zwei unterschiedliche Verfahren zur Prozessbeeinflussung bekannt: Zum Einen das Absaugen mit einer Querstromdüse zur Entfernung von Aerosolen und Stäuben aus Gründen der Arbeitssicherheit, zum Anderen das Spülen der Bearbeitungszone mit Gas, gegebenenfalls auch unter hohem Druck, zur Unterstützung oder zur Abschirmung des Prozesses von der umgebenden Atmosphäre. Der Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis mit ns-Laserpulsen ist in dieser Hinsicht bisher ungeklärt.

**Absaugen mittels Querstromdüse** In der Querstromdüse (Bild 5.29) wird durch einen quer zur Absaugrichtung geleiteten Gasstrom, ähnlich der Funktion einer Wasserstrahlpumpe, ein Unterdruck erzeugt, der die Ansaugleistung der Düse bestimmt. Wird die Düse auf den Ort der Bearbeitung gerichtet, so reißt das angesaugte Gas abgetragenes Material mit sich – siehe Bild 5.30 – und entfernt es somit schnell aus der Prozesszone. Die Ansaugleistung kann dabei über den Druck des querströmenden Gases reguliert werden.

Vergleichend zum Abtrag ohne Querstromdüse sind in Bild 7.7 bis Bild 7.9 die Bohrzeit, die Grathöhe und der Austrittsdurchmesser für einen Vordruck an der Querstromdüse von 0,5 bar, 1 bar und 4 bar angegeben. Eine Untersuchung mit druckloser Querstromdüse zur Ermittlung des Einflusses des Deckglases, welches die Düse zum einfallenden Strahl hin verschließt, kann nicht durchgeführt werden, da die Gefahr besteht, jenes Deckglas durch ablatiertes Material zu beschädigen. Leistungsmessungen mit und ohne Glas ergeben jeweils denselben Wert, so dass eine Korrektur der Leistung nicht erforderlich ist.

Ohne Querstromdüse kann eine Bohrdauer für ein 1 mm dickes Blech aus Aluminium von etwa 15 ms ermittelt werden; mit Querstromdüse liegt die Bohrdauer unabhängig vom eingestellten Vordruck bei etwa dem doppelten Wert. Auch die beobachtete Grathöhe nimmt mit steigendem Vordruck um mehr als 35 % zu. Lediglich der Austrittsdurchmesser bleibt nahezu unverändert.

Es treten also bei Einsatz der Querstromdüse die gleichen Effekte auf, die [MAYERHOFER, 1997] bereits beim Bohren im Unterdruck festgestellt hat. Bei ihm stieg die Grathöhe mit geringer werdendem Druck an und die Bohrdauer verlängerte sich. Der Volumenstrom in die Düse hinein bewirkt somit den gleichen Effekt wie beim Bohren im Unterdruck. Die Ablationsprodukte werden weniger abgebremst. Dies führt zu einem stärkeren Anwachsen des Grates. Der Einsatz einer Querstromdüse hat beim Perkussionsbohren mit ns-Laserpulsen somit erhebliche Nachteile hinsichtlich Grathöhe und Prozessgeschwindigkeit.

**Gaszuführung** Das Laserstrahlbohren mit ns-Laserpulsen erfordert stets den Einsatz von Prozessgas, um die erzeugte Schmelze bei hohem Druck auszublasen. Dabei entsteht sowohl auf der Strahleintrittsseite wie auch auf der Strahlaustrittsseite ein Grat, der mechanisch entfernt werden muss. Beim Bohren mit ns-Laserpulsen wird ein Grat meist nur auf der Eintrittsseite des Laserstrahls beobachtet; auf der Austrittsseite

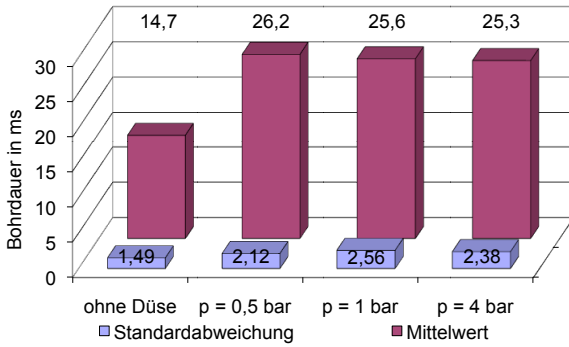


Abbildung 7.7: Bohrdauer mit Querstromdüse

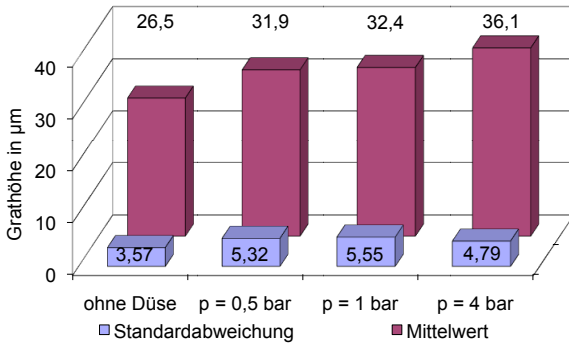


Abbildung 7.8: Grathöhe mit Querstromdüse

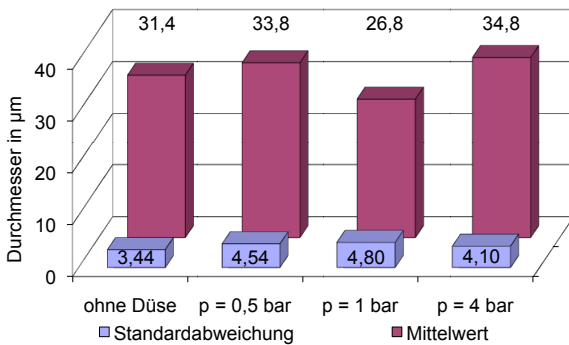


Abbildung 7.9: Austrittsdurchmesser mit Querstromdüse

finden sich, wegen des abweichenden Abtragmechanismus im Vergleich zum Bohren mit ms-Laserpulsen keine Schmelzerückstände. Ziel dieser Untersuchungen ist daher, den Teilchenstrom abgetragenen Materials, der der einfallenden Strahlung entgegen strebt, zu zerstäuben und somit die Gratbildung zu reduzieren sowie durch effizientere Abkühlung der Abtragprodukte einen festhaftenden Niederschlag um die Bohrung herum zu vermeiden.

Für diese Versuche stehen zwei unterschiedliche Düsengeometrien zur Verfügung: Eine Dreilochdüse (Bild 5.32), die den Gasstrahl ca. 5 mm unter ihrem Ende fokussiert, und eine Einlochdüse (Bild 5.31) mit dem Gasaustritt in Laserstrahlrichtung.

Der Einsatz der Dreilochdüse führt zu keinerlei Änderung des Bearbeitungsergebnisses. Bild 7.10 bis Bild 7.12 belegen die im Rahmen der Messwertstreuung – bei verschiedenem Vordruck an der Düse – konstanten Werte; sowohl für die Bohrdauer, wie auch für die Grathöhe sowie den Austrittsdurchmesser. Offensichtlich ist es mit dieser Düsenanordnung nicht möglich, das Prozessgas effizient an den Ort der Bearbeitung zu leiten.

Auch bei der Einlochdüse zeigen sich unter Berücksichtigung der Messwertstreuung für den Bereich der untersuchten Druckvariation kaum signifikante Änderungen im Bearbeitungsergebnis, vgl. Bild 7.13 bis Bild 7.15.

Die Bohrdauer ist nahezu konstant, mit Ausnahme des Wertes bei einem Vordruck von 0 bar. Hier staut sich quasi das abgetragene Material unter der Düse, die mit einem Abstand von wenigen Millimetern über der Blechoberfläche angebracht ist. Damit steht den Abtragprodukten nicht genügend freies Volumen zur Expansion zur Verfügung. Die Grathöhe bleibt unverändert oder verringert sich auf Kosten einer erhöhten Messwertstreuung. Der Austritt allerdings nimmt mit steigendem Gasvordruck ab. Da hier die Auswertung des Längsschliffes im Mikroskop keinen verwertbaren Hinweis liefert, wird die bisher kaum beachtete Messkurve der Bohrdauer bei einem Vordruck von 2 bar für eine Erklärung herangezogen. Ein Vordruck von 2 bar an der Düse führt anscheinend zu einer Verkürzung der Bohrdauer, wenn nur der Messwert betrachtet wird. Jedoch zeigt der Vergleich des Signals der Photodiode, die unter dem Blech angebracht ist, für die Herstellung einer Bohrung ohne Düse und einer Bohrung mit Düse bei 2 bar Vordruck einen signifikanten Unterschied, vgl. Bild 7.16 und Bild 7.17.

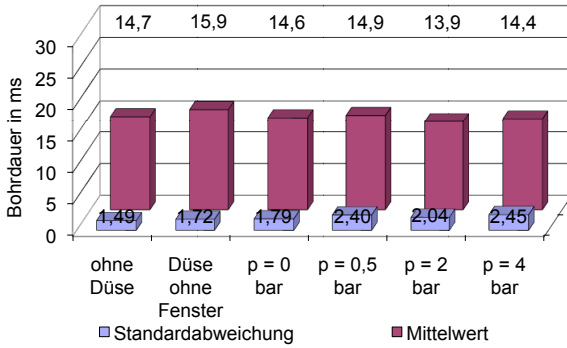


Abbildung 7.10: Bohrdauer bei Dreiloch-Gaszuführung

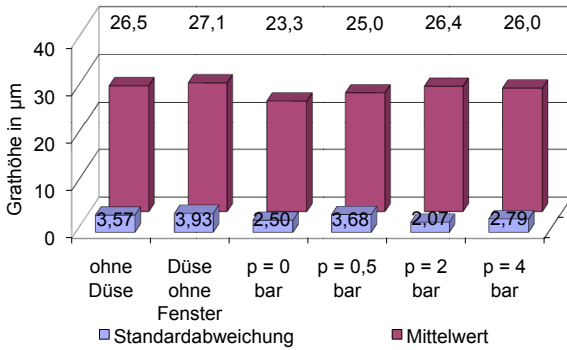


Abbildung 7.11: Grathöhe bei Dreiloch-Gaszuführung

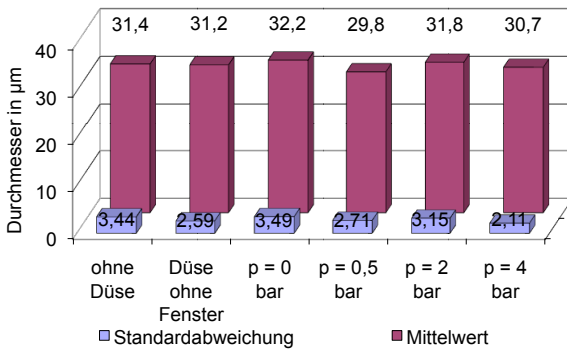


Abbildung 7.12: Austrittsdurchmesser bei Dreiloch-Gaszuführung

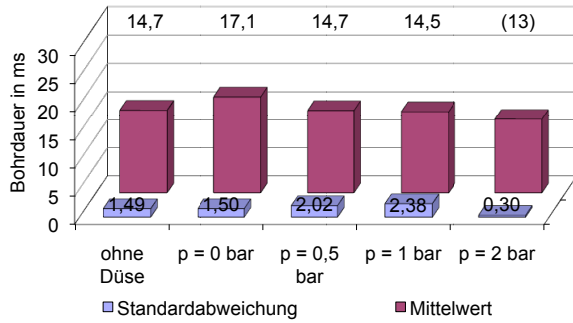


Abbildung 7.13: Bohrdauer bei konfokaler Gaszuführung

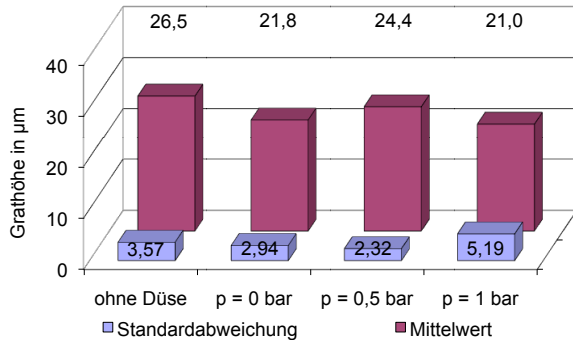


Abbildung 7.14: Grathöhe bei konfokaler Gaszuführung

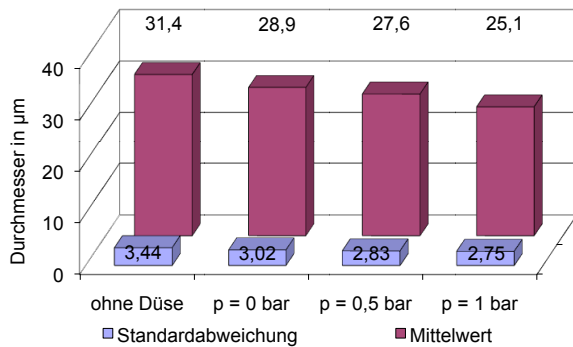


Abbildung 7.15: Austrittsdurchmesser bei konfokaler Gaszuführung

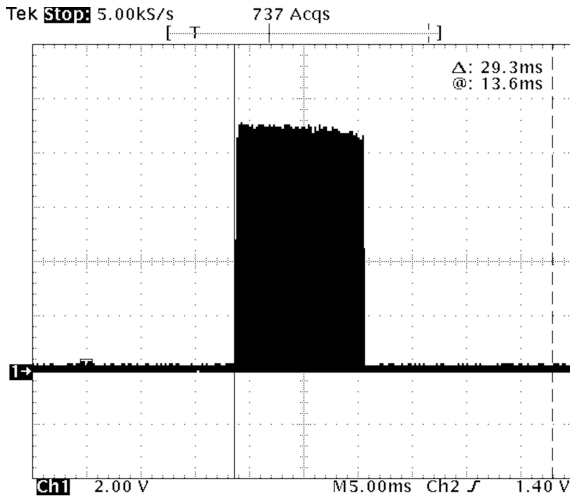


Abbildung 7.16: Bleibende Durchbohrung

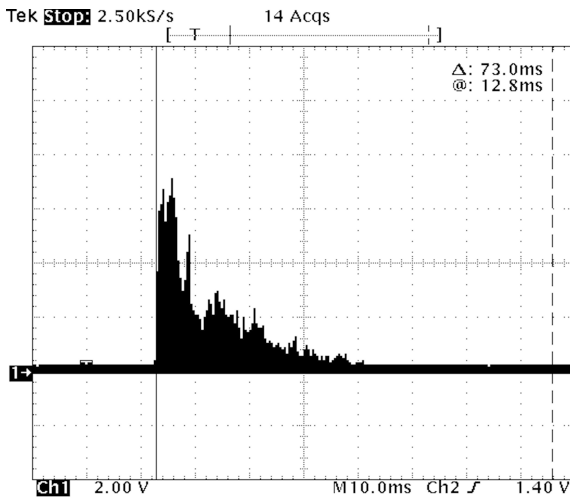
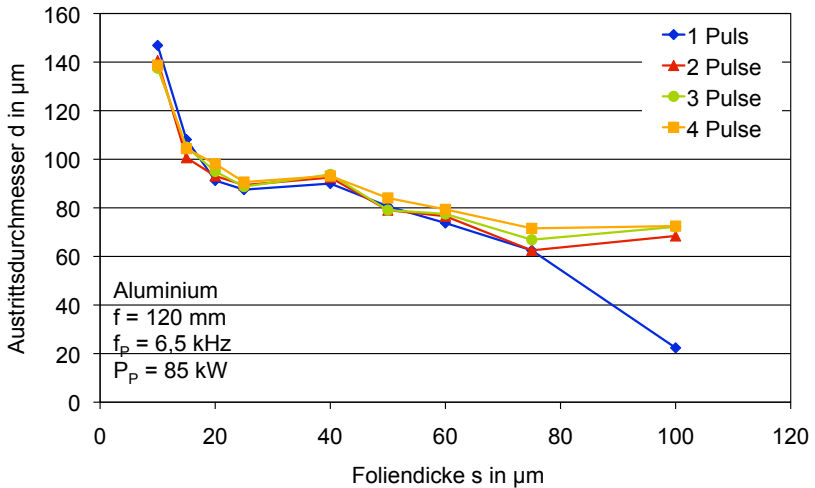


Abbildung 7.17: Bohrungsverschluss





**Abbildung 7.18:** Einfluss der applizierten Laserpulse auf den Bohrungsdurchmesser

Ohne Düse, Bild 7.16, steigt im dargestellten Fall das Signal nach 13,6 ms sprunghaft an und verharrt bis zum Deaktivieren des Lasers – hier nach 29,3 ms – auf konstantem Niveau. Nach dem Durchbohren treten offensichtlich auch bei weiterer Einstrahlung des Lasers keine Änderungen am erzeugten Loch auf. Bild 7.18 unterstützt diese Argumentation durch Beobachtungen beim Perkussionsbohren von dünnen Aluminiumfolien ohne Gasunterstützung mit unterschiedlichen Pulsanzahlen. Unabhängig von der verwendeten Anzahl an Pulsen stellen sich bei den verschiedenen Dicken der Folien jeweils gleiche Austrittsdurchmesser ein. Nur die Bohrungen mit einem Puls bei der Dicke  $s = 100 \mu\text{m}$  zeigen auf, dass die Energie des Laserpulses durch den Abtrag beinahe vollständig aufgezehrt wird. Mit zwei und mehr Pulsen erreichen die Austrittsdurchmesser jedoch wieder das Niveau der  $75 \mu\text{m}$  dicken Folie.

Mit der Düse bei 2 bar Vordruck, Bild 7.17, steigt das Signal ebenfalls sprunghaft an – hier nach 12,8 ms –, jedoch sinkt es anschließend wieder auf Null ab und selbst bei längerer Einwirkung der Laserstrahlung – hier 73 ms – ist es nicht mehr zu detektieren. Auf das erste Durchbohren erfolgt ein Verschluss des erzeugten Lochs. Wirkt der konfokale Gasstrom zunächst, d. h. bei geringer Bohrtiefe, noch unterstützend auf den Pro-

zess, so kehrt sich seine Wirkung mit steigender Bohrtiefe zunehmend ins Gegenteil. Der Gasstrom verhindert schließlich den Schmelzeaustritt in Richtung Strahleintritt. Vielmehr treibt er die Schmelze, die nahe am Austritt zur vollständigen Öffnung des Lochs noch an der Bohrungswand entsteht, zum Bohrlochgrund. In Verbindung mit der kurzen Lebensdauer der Schmelze – zwischen zwei aufeinanderfolgenden Laserpulsen erstarrt sie wieder – kondensiert das Material nahe dem Austritt und über eine Anzahl von Laserpulsen erfolgt der Verschluss des bereits gebildeten Lochs.

Die Ergebnisse aus diesem Abschnitt belegen, dass der Abtrag mit ns-Laserpulsen bei hoher Leistungsdichte an Metallen maßgeblich über eine Schmelzphase abläuft. Prozessgase oder eine Absaugung der Ablationsprodukte besitzen einen negativen Einfluss auf den Prozess und die Schmelzphase im Besonderen, so dass mit derartigen Maßnahmen keine Optimierung möglich ist. Die folgenden Untersuchungen beschäftigen sich daher mit der Wirksamkeit verschiedener Bearbeitungsstrategien zum Einbringen vieler Löcher in ein Blech.

### 7.1.3 Multilochbleche

Das Perkussionsbohren ermöglicht die sichere Herstellung von Bohrungen. Hohe Qualität hinsichtlich Rundheit, Konizität und Rippelbildung ist mit dem Wendelabtrag bei Einsatz eines schnellen Strahlablenksystems möglich, siehe Abschnitt 6.5. Hierfür werden inzwischen Systeme angeboten, die auch eine negative Konizität erlauben. Die Fertigung von Multilochblechen, also ausgedehnten Werkstücken mit Tausenden Bohrungen, ist jedoch wegen des begrenzten Arbeitsfeldes von Scannersystemen – siehe Abschnitt 5.1.2 – auf die Kombination mit konventioneller Werkstückhandhabung, Koordinatentisch und Scannertechnologie, angewiesen. Zwei Varianten der Prozessführung bieten sich an:

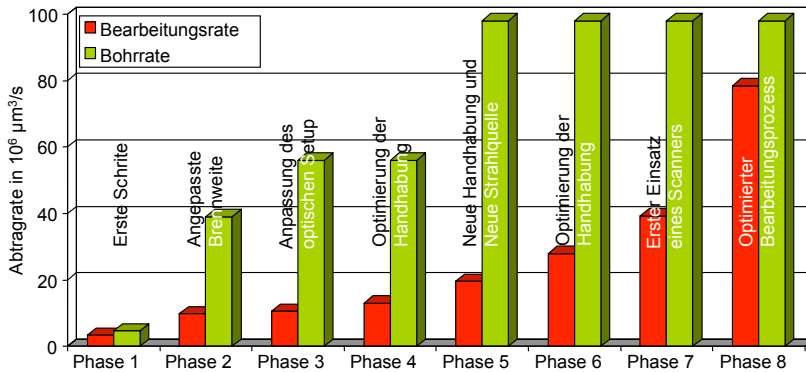
**Patchwork** Bei der Patchwork-Bearbeitung erfolgt die Positionierung des Laserstrahls während der Perforation des Bauteils durch eine 2-dimensionale Strahlablenkung mit Hilfe eines Scanners. Nach der Bearbeitung eines Patches, d. h. eines Arbeitsfeldes des Scanners, wird das Werkstück durch übergeordnete Positioniereinheiten um eine Patchlänge versetzt und danach wieder die Bearbeitung mit dem Scanner aufgenommen. Alternativ kann auch das Strahlführungssystem bis hin zur Strahlquelle bewegt werden.

**Linescan** Beim Linescan-Verfahren wird ebenfalls ein Scanner eingesetzt; jedoch beschränkt sich das Patch auf eine einzelne Linie, die sich durch geeignete Optiken über einen erweiterten Bearbeitungsbereich erstrecken kann. Auch hier wird die Bearbeitung am ruhenden Bauteil vorgenommen. Erst nach Abdeckung des Arbeitsfeldes wird das Bauteil oder das Strahlführungssystem bewegt.

Die beiden Varianten zeichnen sich durch die Bearbeitung am ruhenden Bauteil aus, wodurch Probleme durch Schwingungen der Anlage, die bei hohen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten während der Positionierung über kurze Distanzen an konventionellen Koordinatentischen auftreten können, vgl. Abschnitt 5.1.1, weitgehend vermieden werden. Außerdem sind höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erreichbar, da die bewegten Massen, also die Spiegel des Scanners, in der Regel sehr viel geringer sind als bei der Bewegung des gesamten Bauteils.

Bild 7.19 zeigt exemplarisch die iterative Entwicklung einer Verfahrensstrategie zur Herstellung von Multilochblechen in Metall (Aluminium bzw. Titan) der Dicke 1 mm unter Anwendung des Schemas aus Bild 5.26.

In Phase 1 wird abgesichert, dass im vorgegebenen Material die reproduzierbare Herstellung von Löchern mit einem Austrittsdurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  bei Einsatz des Perkussionsbohrens mit ns-Laserpulsen möglich ist. Phase 2 und 3 ergeben durch die Anpassung des optischen Systems an die Bearbeitungsaufgabe in zwei Schritten eine Steigerung der Abtragate. Dabei ist die Toleranz sowohl des Durchmessers als auch der Konizität der Bohrung einzuhalten. In dieser frühen Entwicklungsstufe wird noch ein einfaches Bearbeitungssystem, bestehend aus einer Linse zur Fokussierung der Strahlung und einem x-y-Koordinatentisch mit Spindelantrieb für die Bewegung der Bleche, eingesetzt. Dies spiegelt sich im Anstieg der Bohrrate wider, während die Bearbeitungsrate kaum zunimmt. Phase 4 zeigt eine Erhöhung der Strahlzeit durch Optimierung der Handhabung. In Phase 5 wird eine an die Bearbeitungsaufgabe angepasste Strahlquelle verwendet, die eine maximale Abtragate gestattet; gleichzeitig kann durch den Einsatz einer neuen Werkstückhandhabung – einem Linearkoordinatentisch – die Strahlzeit weiter erhöht werden. Die in Phase 6 erzielte Bearbeitungsrate nach Optimierung der neuen Handhabung zeigt allerdings, dass die zur Verfügung stehende Strahlzeit nicht optimal genutzt wird. Erst der Einsatz neuer Technologie, d. h. eines Scanners zur Strahlableitung, in Kombination mit dem vorhan-

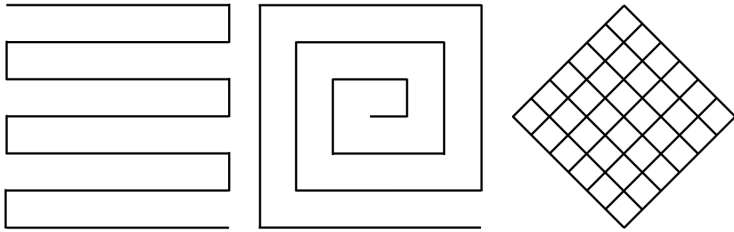


**Abbildung 7.19:** Fortschritt bei der Herstellung von Multilochblechen

denen Linearkoordinatentisch zur Bauteilbewegung sowie die damit verbundene neue Bearbeitungsstrategie, d. h. Patchwork-Bearbeitung in Phase 7 und der nachfolgende Optimierungsschritt in Phase 8, bei dem eine Synchronisation zwischen Scanner und Werkstückhandhabung realisiert wird, führt zur maximalen Strahlzeit und somit zur höchsten Bearbeitungsrate.

Weiteres Optimierungspotenzial – und zugleich eine Prozesskontrolle – ergibt sich durch die Bestimmung der Intensität der durch die Bohrung hindurchtretenden Strahlung unter dem Lochblech. Zum Einen kann, wie das Beispiel in Bild 7.16 zeigt, das Signal einer Photodiode dazu genutzt werden, um den Zeitpunkt des ersten Durchbruchs einer Bohrung zu detektieren, zum Anderen kann ein konstantes Signal als Hinweis für ein stabiles Bohrloch verwendet werden. Die Signalhöhe ist zugleich ein Maß für die durchtretende Intensität, die wiederum abhängig vom Bohrungsquerschnitt ist. Durch die Auswertung des entsprechenden Signals ergibt sich somit ein reproduzierbares Qualitätsmaß für den Bohrungsdurchmesser. Die Weiterverarbeitung des Messwertes kann zur Ansteuerung des Lasers und der Handhabung genutzt werden. Auf diese Weise lässt sich der Laser zum optimalen Zeitpunkt deaktivieren und die Handhabung in Betrieb setzen.

Auch beim Wendelabtrag kann ein Scannersystem zur Herstellung einer Vielzahl von Bohrungen in Patchwork-Bearbeitung genutzt werden, während ein Koordinatentisch die Positionierung des Werkstücks übernimmt.



**Abbildung 7.20:** (a) Mäander, (b) Spirale, (c) Kreuzschraffur

## 7.2 Abtragalgorithmen bei flächiger Bearbeitung

Die Bearbeitungsstrategien beim flächigen Abtragen beziehen sich auf die Art der Strahlwegführung oder Abtragalgorithmen (Abtragwege), d. h. nicht mit welchen Mitteln, sondern wie eine Überlagerung der Laserpulse vorgenommen wird. Die Grundlagen hierzu wurden im Abschnitt 6.6 ermittelt. Diese Ergebnisse werden nun mit verschiedenen Abtragalgorithmen kombiniert und hieraus eine optimale Bearbeitungsstrategie erarbeitet.

Zur Entwicklung der Bearbeitungsstrategien werden Strukturen mit dem Laserstrahl erzeugt, den ein Scanner in einem Bereich von 5 mm x 5 mm über die Probe führt. Als Untersuchungsgröße wird mit Hilfe des Arbeitsabstandes die Bearbeitungszone eingestellt und über die Pulsleistung eine bekannte Abtragrate gewählt. Die Auswirkungen verschiedener Strahlführungsalgorithmen auf diese Ausgangsgröße sind Gegenstand der weiteren Untersuchungen. Hierzu bieten sich mäanderförmige und spiralförmige Abtragewege an, letztere von innen nach außen und in Gegenrichtung, sowie eine Kreuzschraffur, bei mehrfacher Anwendung auch gegeneinander verdreht, (siehe Bild 7.20). Maßgeblich für die Beurteilung der erzeugten Strukturen sind die Rauheit der bearbeiteten Oberflächen sowie die tatsächliche Abtragrate.

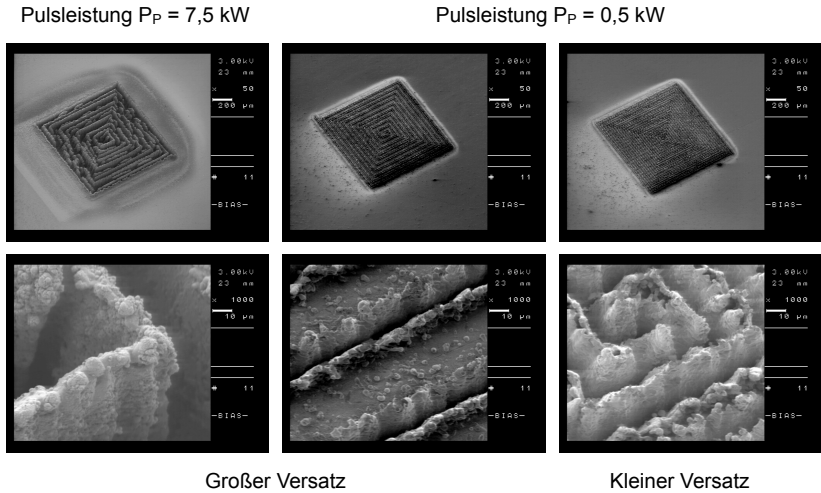
Die in Kapitel 6 ermittelten Parameterabhängigkeiten des Fertigungsergebnisses führen bei der Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie für das flächige Abtragen zu zwei weiteren Gesichtspunkten, die hinsichtlich Prozessgeschwindigkeit und Bauteilqualität ebenfalls in Erwägung zu ziehen sind.

**Fokuspachführung** Beim Multiple-Pass-Prozess, wie er für die Herstellung größerer Abtragtiefen notwendig wird, ändert sich schrittweise – von Umlauf zu Umlauf – der Arbeitsabstand, d. h. der Abstand zwischen Fokusebene und bearbeiteter Oberfläche, wenn z. B. die Fokussierlinse nicht nachgeführt wird. Dies hat, unter Beachtung von Bild 6.26, Auswirkungen auf alle abhängigen Parameter – Bearbeitungszone, Leistungsdichte, Überlappgrad und Abtragrate – und damit auch auf die Qualitätsmerkmale der Strukturen – Maßhaltigkeit und Rauheit. So können wegen der zunehmenden Bearbeitungszone Hinterschneidungen an den Seitenflächen auftreten, während die Abtragrate aufgrund der sinkenden Leistungsdichte – Bild 6.25 – abnimmt. Die Verringerung der Abtragrate lässt jedoch sinkende Rauheitswerte erwarten, vgl. Tabelle 6.1. Allerdings entspricht dies keinem gesteuerten Prozess und das Bearbeitungsergebnis entsteht zufällig. Mit einer Fokuspachführung könnten diese für die bearbeitete Oberfläche teilweise nachteiligen Auswirkungen umgangen werden. Jedoch bewirkt die Fokuspachführung eine Kantenverrundung und instabile Abtragverhältnisse, wie Abschnitt 7.1.1 zeigt. Die Bearbeitungszone an der Werkstückoberfläche vergrößert sich mit zunehmender Nachführung des Fokus, wodurch die Maßhaltigkeit beeinträchtigt wird. Eine Modellierung der Pulsüberlagerung soll die zu erwartenden Ergebnisse veranschaulichen.

**Aufteilung des Bearbeitungsprozesses in Schruppen und Schlichten** Bereits in Abschnitt 6.6 wurde die Möglichkeit zur Aufteilung in einen Schrupp- und einen Schlichtprozess, wie bei der mechanischen Bearbeitung, anhand der Bearbeitungsergebnisse abgeleitet. Allerdings ist eine derartige Aufteilung des Abtragprozesses bei kurzgepulster Bearbeitung bislang unbekannt, und die daraus resultierenden Anforderungen an eine solche Prozessführung sind noch zu bestimmen. Auch hier sollen anhand der Modellierung der Pulsüberlagerung die zu erwartenden Ergebnisse abgeschätzt werden.

### 7.2.1 Modellierung der Pulsüberlagerung

Unabhängig von den einzelnen Strahlführungsalgorithmen ist für die Modellierung der Pulsüberlagerung die Einstellung des an die Abtragbreite angepassten Versatzes paralleler Linien zu klären. Bild 7.21 verdeutlicht das Problem anhand von flächigen Strukturen mit 1 mm Kantenlänge, bei denen ein spiralförmiges Abtragemuster angewendet wurde. Rechts



**Abbildung 7.21:** Vorversuche zur Modellierung

und in der Mitte beträgt der Versatz zwischen parallelen Abtraglinien  $50 \mu\text{m}$ , im linken Bildteil  $25 \mu\text{m}$ . Bei hoher Pulsleistung reicht der eingestellte Abstand nahezu aus, um einen flächigen Abtrag zu gewährleisten. In der Mitte, bei geringer Pulsleistung also, sind nur schmale Linien mit markanten Aufwürfen und einem breiten Bereich von Restmaterial zu erkennen. Mit der Halbierung des Versatzes kann dagegen deutlich mehr Material abgetragen werden. Jedoch steigt die Bearbeitungszeit stark an: Sie verdoppelt sich beinahe, da die abzufahrende Weglänge ebenfalls fast das Doppelte beträgt.

Die Modellierung soll der Veranschaulichung der generellen Problematik bei der flächigen Pulsüberlagerung dienen; daher werden einige Vereinfachungen bei der Berechnung vorgenommen: Werkstoffliche Kenngrößen, wie Abtragschwelle oder Wärmeleitfähigkeit, die eine Vorhersage von Bearbeitungsparametern ermöglichen könnten, finden keine Beachtung. Für die Darstellung wird eine Gauß-förmige Intensitätsverteilung, wie schon bei den Iso-Intensitäten in Abschnitt 6.3, angenommen und die resultierende Intensität in äquidistanten Ebenen bei konstanter Fokuslage und Pulsanzahl ( $100 \times 100$  Pulse) für eine Bearbeitung mit festem Vorschub und gleicher Pulsfrequenz betrachtet.

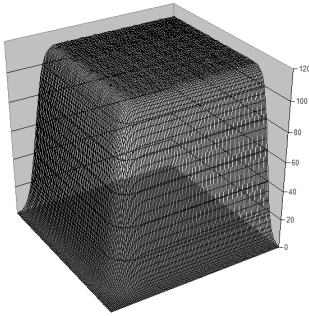


Abbildung 7.22: Pulse erste Ebene

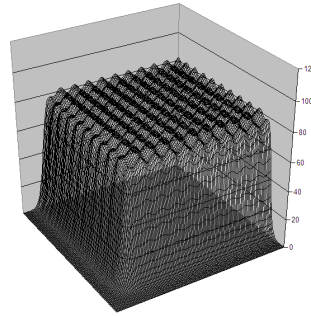


Abbildung 7.25: Pulse vierte Ebene

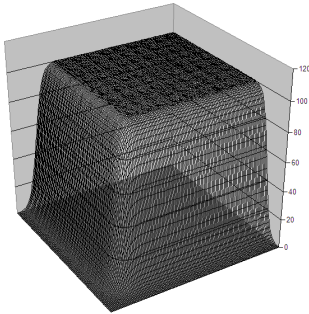


Abbildung 7.23: Pulse zweite Ebene

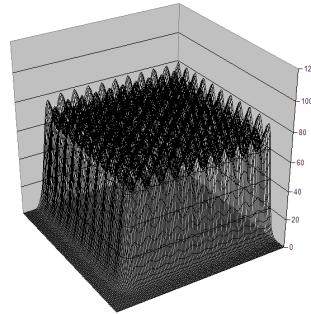


Abbildung 7.26: Pulse fünfte Ebene

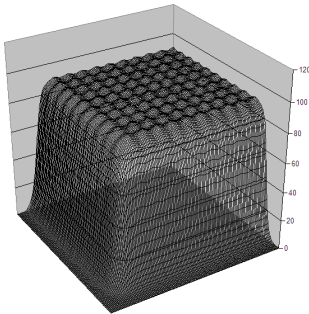


Abbildung 7.24: Pulse dritte Ebene

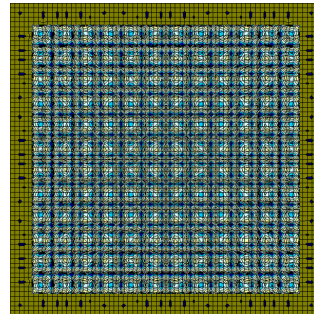


Abbildung 7.27: Vergleich der Feldgröße Ebenen 1 und 4



Bild 7.22 bis Bild 7.26 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen als Drahtmodelle für unterschiedliche Anzahlen von Schichtabträgen, während in Bild 7.27 der errechnete Strukturboden der Ebenen 1 und 4 übereinandergelegt sind.

Die Abtragsimulation mit einem Pulsüberlapp von 50 % in x- und y-Richtung liefert in Ebene 1 – erste Schicht – eine glatte Oberfläche, die sich ohne Parameteränderung in Ebene 2 zu einer näpfchenartige Struktur wandelt. Die Oberflächen der Ebenen 3 und 4 sehen eher genoppt und in Ebene 5 mehr nadelig aus. Dabei zeigt Bild 7.27, dass die bearbeitete Fläche nach dem vierten Durchgang am Strukturboden deutlich kleiner ist als die Fläche des Strukturbodens in Ebene 1 und dass der scharfe Rand in Ebene 1 von Rippeln abgelöst wird.

Im modellierten Fall kann durch gedankliches Ineinanderschachteln der Einzelmodelle der Abtrag in die Tiefe näherungsweise abgeleitet werden. Die Verknüpfung dieses Gedankenexperiments mit den Iso-Intensitätslinien aus Abschnitt 6.3 verdeutlicht einerseits die Entstehung der Flankenwinkel. Andererseits wird offensichtlich, dass mit zunehmender Abtragtiefe die Oberfläche, d. h. der bearbeitete Grund der Geometrie, eine größer werdende Rauheit aufweist.

Die Kontraktion der Iso-Intensitätslinien nach dem Maximum unterhalb der Strahltaile, vgl. Bild 6.26, führt ohne Parameteränderung makroskopisch, bei wiederholtem Abtrag und zunehmender Tiefe, zu einem Schrumpfen des Felds der aktiven Bearbeitung, was den Flankenwinkel hervorruft, und mikroskopisch, also von Puls zu Puls betrachtet, zu einem stetig kleiner werdendem Überlappgrad. Schließlich entsteht eine Oberflächenstruktur, wie sie bei einer Bearbeitung mit dem Überlappgrad 0 % zu erwarten wäre, vergleiche Bild 7.26. Der Prozess nähert sich dem Perkussionsbohren an.

Für eine gleichmäßige Bearbeitung auch bei zunehmender Tiefe folgt daraus, dass in jeder Ebene der gleiche oder ein ähnlicher Abtragprozess geschaffen werden muss wie in Ebene 1. Die einfachste Möglichkeit, also die oben angegebene Fokuspachführung, um gleiche Prozessbedingungen zu erhalten, wurde bereits beim Perkussionsbohren – Abschnitt 6.2 – ausführlich diskutiert. Die dort vorgestellten Ergebnisse lassen aufgrund des Verlaufs der Iso-Intensitätslinien weitere Nachteile wie Kantenverrundung oder eine Ausweitung der Strukturgrenzen erwarten. Daher ist eine günstigere Form der Prozesssteuerung die Anpassung des Überlapps  $dx$  und  $dy$  bei zunehmender Abtragtiefe unter Berücksichtigung der Iso-Intensitätslinien.

In Bezug auf Ebene 1 ist der Überlapp quasi zu erhöhen. Dies gelingt durch Steigerung der Pulsfolgefrequenz bei konstanter mittlerer Leistung der Laserstrahlung oder Verringern des Vorschubs bei gleichzeitiger Reduktion des Versatzes. Diese Maßnahme sollte auch zu einer Verminderung der beobachteten Rippel an den Strukturwänden führen.

Anhand der Iso-Intensitätslinien ist auch abzulesen, dass mit zunehmender Strukturtiefe die Abtrage rate sinkt, so dass sich automatisch mit fortschreitender Bearbeitung ein Schlichtprozess ergibt, wobei der Prozess nach Bild 2.2 und Bild 2.4 von überwiegend Schmelze getriebenem Abtrag in den Bereich des reinen Abdampfens mit geringer Schmelzebildung verschoben wird. Dies bewirkt, den Ausführungen in Abschnitt 6.6 folgend, eine Beruhigung des Prozesses mit entsprechend geringerer Rauheit. Damit führt diese Lösung zum Schruppen und Schlichten, der zweiten oben genannten Bearbeitungsstrategie.

Einen Beleg, dass die Modellierung der Pulsüberlagerung dem wirklichen Abtragergebnis entspricht, liefert Bild 7.28. Das wesentliche Ergebnis aus der Modellierung der Pulsüberlagerung: Der Überlappgrad – sei er bezogen auf die Strahltaile Gaußscher Strahlung oder auf die Bearbeitungszone entsprechend den Iso-Intensitätslinien – ist während des flächigen Abtragens mehrerer Schichten nicht konstant, zeigt auf, dass eine Interpretation der Resultate aus der statistischen Versuchsplanung, Tabelle 6.1, keine numerisch greifbaren Abhängigkeiten aufdecken kann. Selbst bei genauer Kenntnis des Verlaufs der Iso-Intensitätslinien können die Laserparameter nicht in ausreichendem Maße unabhängig voneinander variiert werden, siehe Abschnitt 5.1.3, um geeignete formelhafte Zusammenhänge zu entwickeln.

Die Untersuchungen zu den Bearbeitungsstrategien zielen daher auf eine Strahlwegführung, optimiert für eine geringe Rauheit nach der Strukturierung, d. h. einer optimalen Anpassung des Überlappgrades, um eine Endbearbeitung zu realisieren. Dabei liegt dem weiteren Vorgehen stets das Diagramm (Bild 5.26) aus Abschnitt 5.5 zugrunde, mit dessen Hilfe die Prozessparameter der einzelnen Abtragalgorithmen im Verlauf der Untersuchungen, ausgehend von den Vorergebnissen, insbesondere aus Abschnitt 6.6, kontinuierlich für ein optimales Bearbeitungsresultat angepasst werden. Für die direkte Mikrostrukturierung mit kurz-gepulster Laserstrahlung bieten sich, wie weiter oben in diesem Kapitel bereits dargelegt, drei unterschiedliche Varianten der Strahlführung über die Objektoberfläche an.

## 7.2.2 Spiralförmiger Abtragweg

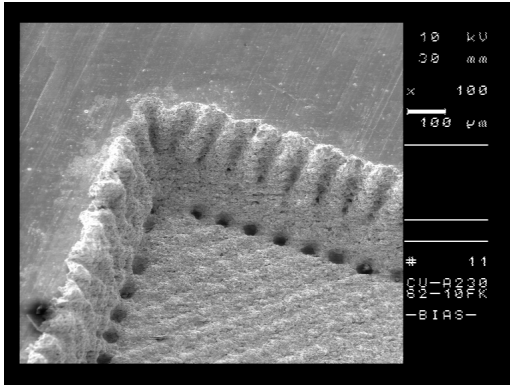
Die Anwendung dieses Abtragalgorithmus erfordert einen erheblichen Aufwand an Steuerungstechnik, der für die eingesetzten Systeme nicht umzusetzen ist. Bei der Darstellung einer echten Spirale, z. B. zur Herstellung zylindrischer Vertiefungen, ist eine konstante Umfangsgeschwindigkeit einzustellen, so dass der Überlappgrad mit größer werdender Spirale gleich bleibt. Steuerungstechnisch kann jedoch nur eine konstante Kreisfrequenz realisiert werden; somit ist der Überlapp im Inneren der Kreisfläche sehr hoch, erreicht dann ein Prozessfenster mit guten Abtragergebnissen und wird schließlich so groß, dass keine Überlagerung aufeinanderfolgender Pulse mehr stattfindet. Auf diese Weise kann kein homogener Abtrag über die Kreisfläche erzielt werden.

Die Erzeugung einer spiralartigen Bahn, die sich aus senkrecht aufeinanderstehenden Teilstrecken zusammensetzt wie in Bild 7.20(b), führt zu einem erheblichen Aufwand an Programmierung, insbesondere, wenn unterschiedliche Abstände zwischen benachbarten Abtragspuren untersucht oder eingestellt werden sollen. Zudem sind so keine komplexeren Geometrien darstellbar. Diese Verfahrensvariante erweist sich somit aus anlagentechnischer Sicht als ungeeignet.

## 7.2.3 Kreuzschraffur

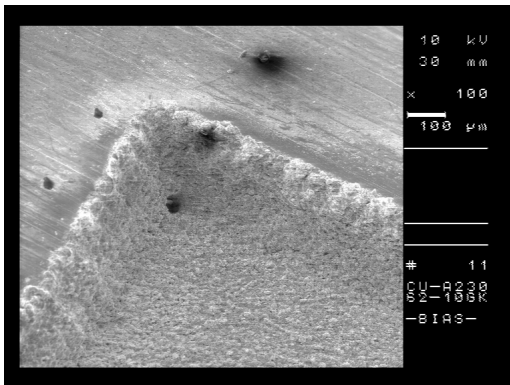
Bei der herkömmlichen Kreuzschraffur wird zunächst eine Ebene der Struktur durch parallele Linien abgetragen, in einem weiteren Schritt erfolgt die Bearbeitung der nächsten Ebene, wobei das Abtragsmuster um einen festgelegten Winkel zur vorhergehenden Schraffur gedreht wird. Die folgende Ebene besitzt wiederum die Ausrichtung der Ersten, und so fort. Bei zehnfacher Überlagerung dieser Ebenen wird ein Bearbeitungsergebnis erzielt, wie es in Bild 7.28 dargestellt ist.

Nach der Optimierung der Bearbeitungsparameter für maximalen Abtrag zeigen sich Kerben an den Flanken und deutliche Einstichstellen am Beginn jeder Abtragslinie. Ferner ist am Strukturgrund noch das Abtragsmuster der letzten beiden Bearbeitungsebenen zu erkennen. Der Flankenwinkel beträgt ohne Berücksichtigung der Einkerbungen ca.  $5^\circ$ . Die Einstichstellen und Scharten sind auf die Leistungsüberhöhung des ersten Pulses nach dem Öffnen des Güte-Schalters zurückzuführen. Das Muster am Strukturgrund ist, wie in Abschnitt 7.2.1 diskutiert, ein Resultat der Kontraktion der Iso-Intensitätslinien und des damit



Werkstoff: E-Kupfer  
 Nd:YAG TEM<sub>00</sub>  
 Wellenlänge  $\lambda = 1064 \text{ nm}$   
 Pulsfolgefrequenz  $f_p = 10 \text{ kHz}$   
 Pulsleistung  $P_p = 6 \text{ kW}$   
 Pulsenergie  $E_p = 1,5 \text{ mJ}$   
 10fach gerastert  
 Überlapp  $d_x = 58\%$   
 $d_x = 50\%$   
 Abtragtiefe  $s = 150 \text{ }\mu\text{m}$   
 Rauheit  $R_a = 3,3 \text{ }\mu\text{m}$   
 mittl. Abtragate  $A_R = 1,21 \text{ mm}^3/\text{min}$

Abbildung 7.28: Feste Kreuzschraffur



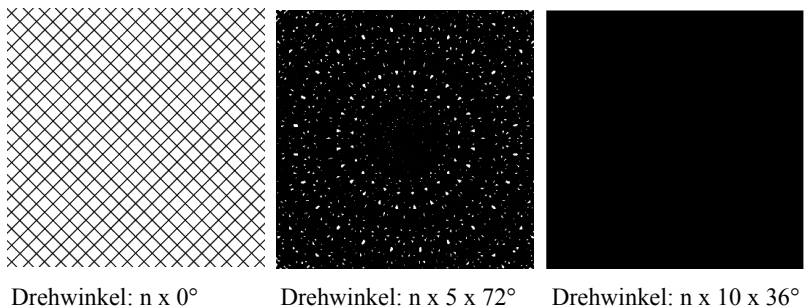
Werkstoff: E-Kupfer  
 Nd:YAG TEM<sub>00</sub>  
 Wellenlänge  $\lambda = 1064 \text{ nm}$   
 Pulsfolgefrequenz  $f_p = 10 \text{ kHz}$   
 Pulsleistung  $P_p = 6 \text{ kW}$   
 Pulsenergie  $E_p = 1,5 \text{ mJ}$   
 10fach gerastert  
 Überlapp  $d_x = 58\%$   
 $d_x = 50\%$   
 Drehwinkel  $\alpha = 60^\circ$   
 Abtragtiefe  $s = 150 \text{ }\mu\text{m}$   
 Rauheit  $R_a = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$   
 mittl. Abtragate  $A_R = 1,21 \text{ mm}^3/\text{min}$

Abbildung 7.29: Variable Kreuzschraffur

verbundenen sinkenden Überlapps bei zunehmender Tiefe. Diese Art der Kreuzschraffur mit zwei festen Winkeln zwischen den Abtragschichten ist offensichtlich für eine hochwertige abtragende Bearbeitung wenig geeignet.

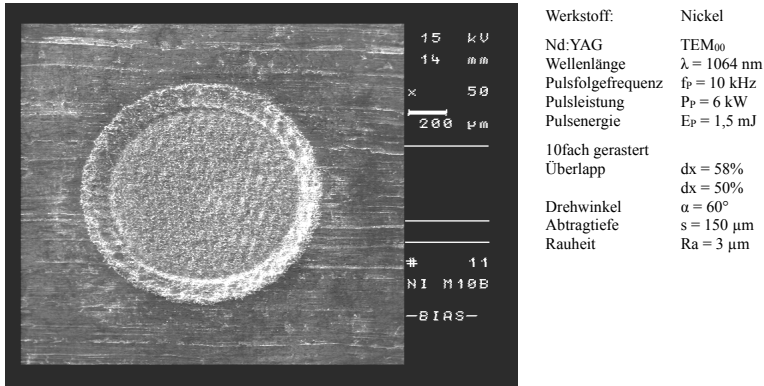
Der Übergang zu einer variablen Kreuzschraffur, d. h. die ersten beiden Ebenen werden wie bei der festen Kreuzschraffur bearbeitet, die nachfolgenden Bearbeitungspaarungen sind jedoch um definierte Winkel gedreht, führt dazu, dass die Muster aufeinanderfolgender Abtragschichten nicht deckungsgleich sind. Bild 7.29 verdeutlicht den erzielbaren Fortschritt im Bearbeitungsergebnis nach zehnfachem Abtrag mit einem Drehwinkel von  $60^\circ$  zwischen zwei Bearbeitungspaarungen, aber sonst gleichen Fertigungsparametern.

Bei gleicher Abtragrate wie in Bild 7.28 ergibt sich eine klare Verbesserung des Strukturgrundes, das Abtragsmuster ist hier nicht mehr zu erkennen und die Rauheit weist einen geringeren Wert auf. Zudem können die Einkerbungen an den Flanken signifikant verringert werden, ohne den Flankenwinkel zu erhöhen. Bei optimaler Einstellung des Drehwinkels kann diese Welligkeit nahezu vollständig vermieden werden. Zur besseren Vergleichbarkeit mit Bild 7.28 wurde jedoch auf diese Darstellung verzichtet. Das Fehlen der Einstichstellen, durch den jeweils ersten Puls, am Übergang zwischen Wand und Boden weist bereits auf dieses Resultat hin.



**Abbildung 7.30:** Überdeckung bei variabler Kreuzschraffur

Bild 7.30 vermittelt einen Eindruck der Wirkung der variablen Kreuzschraffur. Hierzu ist links das Abtragsmuster für eine Bearbeitung ohne Drehung der Bearbeitungsebenen dargestellt. Es zeigt das aus Bild



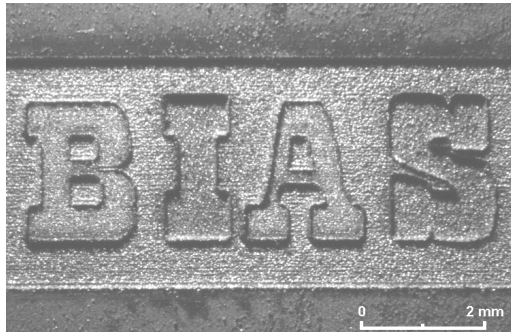
**Abbildung 7.31:** Variable Kreuzschraffur für Kreisflächen

7.28 bekannte Muster. Bei einer Drehung der Bearbeitungsebenen um jeweils  $72^\circ$  fallen nach fünf Bearbeitungsschritten die Ebenen bereits wieder aufeinander. Unter Berücksichtigung einer endlichen Breite der Bearbeitungsspuren ergibt sich das in der Mitte gezeigte Muster. Die Füllung ist gegenüber der festen Kreuzschraffur deutlich erhöht, aber die Fläche wird nicht vollständig bedeckt. Durch Verringern des Drehwinkels kann eine vollständige Flächendeckung erreicht werden, jedoch ist hierzu eine größere Anzahl an Bearbeitungsebenen notwendig.

Die Eignung der variablen Kreuzschraffur auch für runde Geometrien belegt Bild 7.31. Für komplexere Formen ist die variable Kreuzschraffur allerdings nicht zweckmäßig. Diese erfordern einen anderen Abtragalgorithmus, der zeilenweise arbeitet. Das schnelle Ein- und Ausschalten des Lasers ermöglicht dabei die Herstellung unterschiedlicher Abtragtiefen im bearbeiteten Bereich.

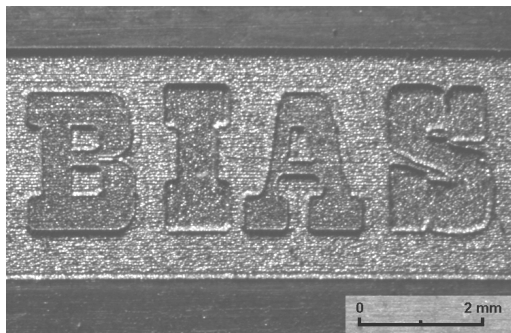
## 7.2.4 Mäander – Bit-Mapping

Diese Methode wurde weiter oben in diesem Abschnitt als Mäander eingeführt. Jedoch erweist sich die Bezeichnung *Bit-Mapping* als zutreffender, da für die Strukturierung Bitmaps, also Pixelkarten, zugrunde gelegt werden. Damit sind auch Geometrien höherer Ordnung darstellbar, da bei diesem Verfahren die Struktur zeilenweise, vergleichbar dem Drucken, in den Werkstoff geschrieben wird. Die bidirektionale Bearbei-



Werkstoff:	E-Kupfer
Nd:YAG	TEM <sub>00</sub>
Wellenlänge	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Pulsfolgefrequenz	$f_p = 20 \text{ kHz}$
Pulsleistung	$P_p = 3,3 \text{ kW}$
Pulsenergie	$E_p = 0,73 \text{ mJ}$
Überlapp	$dx = 69\%$ $dx = 58\%$
Abtragtiefe	$s = 200 \text{ }\mu\text{m}$
Rauheit	$R_a = 2 \text{ }\mu\text{m}$ $R_z = 7 \text{ }\mu\text{m}$
mittl. Abtragrata	$A_R = 1,1 \text{ mm}^3/\text{min}$

Abbildung 7.32: Bit-Mapping in Kupfer



Werkstoff:	Nickel
Nd:YAG	TEM <sub>00</sub>
Wellenlänge	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Pulsfolgefrequenz	$f_p = 20 \text{ kHz}$
Pulsleistung	$P_p = 2,7 \text{ kW}$
Pulsenergie	$E_p = 0,65 \text{ mJ}$
Überlapp	$dx = 69\%$ $dx = 58\%$
Abtragtiefe	$s = 200 \text{ }\mu\text{m}$
Rauheit	$R_a = 2 \text{ }\mu\text{m}$ $R_z = 7 \text{ }\mu\text{m}$
mittl. Abtragrata	$A_R = 1,1 \text{ mm}^3/\text{min}$

Abbildung 7.33: Bit-Mapping in Nickel

tion, d. h. der Abtrag wird von links nach rechts und in der folgenden Zeile in Gegenrichtung durchgeführt, erzielt dabei eine hohe Effektivität.

Bild 7.32 und Bild 7.33 zeigen jeweils eine Struktur, die mit diesem Verfahren in Kupfer und Nickel „geschrieben“ wurden. Sie besteht aus einer Grundfläche, die um  $120 \text{ }\mu\text{m}$  zur Probenoberfläche vertieft ist; hierzu sind die Buchstaben „B“ und „A“ um  $80 \text{ }\mu\text{m}$  erhaben, während „I“ und „S“  $80 \text{ }\mu\text{m}$  tiefer liegen als die Basis. Um die geringere Absorption des Kupfers für die fundamentale Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers gegenüber Nickel auszugleichen, muss hier eine etwas höhere Pulsleistung eingesetzt werden. Die beiden Bearbeitungsergebnisse sind identisch und weisen gegenüber den o. g. Beispielen eine ähnliche Abtragrata auf.

Die Ergebnisse der verschiedenen Bearbeitungsstrategien führen anhand der Prozessparameter und Abtragergebnisse auf ein Optimierungspotenzial hinsichtlich der Qualität hin. Wird bei der Kreuzschraffur noch eine Pulsenergie  $E_P$  von 1,5 mJ eingesetzt, die zu einer Rauheit  $Ra$  von ca. 3  $\mu\text{m}$  führt, so zeigt sich beim Bit-Mapping ein  $Ra$ -Wert von 2  $\mu\text{m}$ , der entsprechend den Resultaten aus Abschnitt 6.6.2 auf die geringere Pulsenergie  $E_P$  von 0,65 mJ zurückgeführt werden kann. Dabei zeigt sich für den Überlappgrad ein Wert zwischen 50 % und 70 % mit einem höheren Wert für den Überlapp  $dx$  als für  $dy$  als optimal. Damit bestätigen die Optimierungsergebnisse den Trend für die Bearbeitungsparameter, die in Abschnitt 6.6 mit der statistischen Versuchsplanung ermittelt wurden. Dies aber erst nachdem in einer ersten Bearbeitung die Oberfläche aufgeraut wurde. Die Laserstrahlung koppelt dann aufgrund von Mehrfachreflektionen besser in das Material ein als auf einer gewalzten oder geschliffenen Oberfläche, vgl. Abschnitt 2.1.3.

## 7.2.5 Schruppen und Schlichten

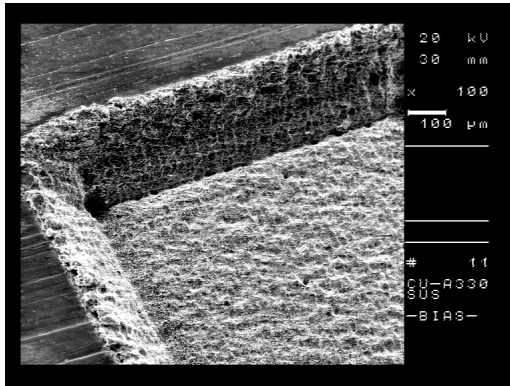
Die Erkenntnisse aus den Abschnitten 6.6.2 „Parameterkorrelation“ sowie 7.2.1 „Modellierung der Pulsüberlagerung“ und die Untersuchungen zu den Bearbeitungsstrategien legen die Aufteilung des Prozesses in zwei Schritte, nämlich in Schruppen und Schlichten, wie sie aus der mechanischen Bearbeitung seit langem bekannt sind, als mögliche Optimierungsmaßnahme nahe. In einem ersten Schritt wird bei großer Abtrage rate mit den bekannten Nachteilen, z. B. hoher Rauheit, endkonturnahe vorgearbeitet, um anschließend die Bearbeitungsqualität durch einen Abtrag mit geringer Rate zu steigern.

Der Vergleich der Bearbeitungsergebnisse von Bild 7.28 und Bild 7.34 zeigt, dass durch eine Aufteilung des Prozesses in Schruppen und Schlichten eine Steigerung der Fertigungsqualität erreicht werden kann. So sinkt die Rauheit um etwa 50 % auf  $Ra = 1,6 \mu\text{m}$  gegenüber der ursprünglichen Abtragemethode mit festem Kreuzraster. Die Flanken weisen keine Welligkeit mehr durch Einstichmarkierungen auf und der Flankenwinkel beträgt wiederum ca. 5°.

Die Analyse der Oberflächen nach dem Schruppen beziehungsweise nach dem Schlichten liefert ein tieferes Verständnis für die wirkenden Abtrage mechanismen bei den unterschiedlichen Bearbeitungsschritten.

Beim Schruppen erfolgt die endkonturnahe Herstellung einer Struktur mit hoher Pulsenergie und entsprechend hohem Abtrag. Die Rauheit





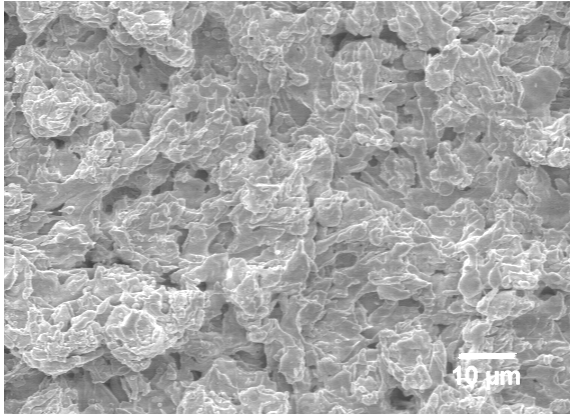
Werkstoff:	E-Kupfer
Nd:YAG	TEM <sub>00</sub>
Wellenlänge	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Pulsfolgefrequenz	$f_p = 10 \text{ kHz}$
<b>Schuppen (5fach gerastert)</b>	
Drehwinkel	$\alpha = 72^\circ$
Pulsenergie	$E_p = 1,5 \text{ mJ}$
Überlapp	$dx = dy = 55\%$
<b>Schichten (10fach gerastert)</b>	
Drehwinkel	$\alpha = 36^\circ$
Pulsenergie	$E_p = 0,5 \text{ mJ}$
Überlapp	$dx = dy = 50\%$
Abtragtiefe	$s = 150 \text{ }\mu\text{m}$
Rauheit	$R_a = 1,6 \text{ }\mu\text{m}$
mittl. Abtragrate	$A_R = 0,5 \text{ mm}^3/\text{min}$

**Abbildung 7.34:** Schuppen und Schichten mit variabler Schraffur

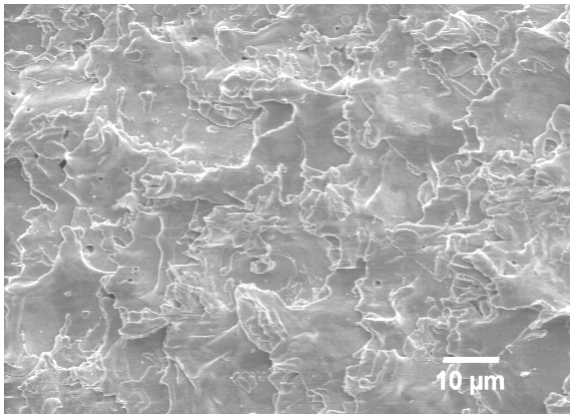
kann dabei je nach Werkstoff und Bearbeitungsparametern über  $20 \text{ }\mu\text{m}$   $R_z$  betragen; die in Bild 7.35 gezeigte Oberfläche von Kupfer weist nach dem Schuppen einen  $R_z$ -Wert von  $13 \text{ }\mu\text{m}$  auf. Weitere Bearbeitungsschritte bei verminderter Pulsenergie, dem sog. Schichten, führen dann sukzessiv zu einer Verminderung der Rauheit.

Bild 7.36 zeigt die Wirksamkeit einer Schichtbearbeitung auch beim Materialabtrag mit kurz-gepulster Laserstrahlung: Die Rauheit der bearbeiteten Kupferoberfläche wird hier von  $R_z = 13 \text{ }\mu\text{m}$  nach dem Schuppen durch einen Schlichtschritt auf  $R_z = 5 \text{ }\mu\text{m}$  verringert. Unter Beachtung der Energietransportgleichung in ihrer vereinfachten Form, Gleichung 2.8, führt die geringere eingesetzte Pulsenergie auch zu einer Reduktion der vom Werkstoff absorbierten Energie und damit zu einer niedrigeren Temperatur im Werkstoff in Strahlausbreitungsrichtung. Daher reduziert sich die erzielte Schmelzschichtdicke und der Abtragmechanismus verlagert sich, der Beschreibung von Bild 2.2 folgend, zu einem Abtrag vom Typ C. Zudem kann die Bearbeitung, da zum Einen die Pulsdauer klein ist und zum Anderen eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche stattfindet, als quasi-Einzelpulsabtrag aufgefasst werden. Somit wird beim Schlichten unter Einsatz sinkender Pulsenergie eine Reduzierung der Rauheit bewirkt.

Die erzeugte Schmelze legt sich wegen der hohen Oberflächenspannung annähernd wie ein glatter Film auf die bearbeitete Oberfläche. Der Vergleich von Bild 7.35 mit Bild 7.36 belegt dies deutlich.



**Abbildung 7.35:** Schuppen von Kupfer



**Abbildung 7.36:** Schichten von Kupfer

Durch Schruppen und Schlichten kann, wie in der spanenden Fertigung, auch bei der Materialbearbeitung mit kurz-gepulster Laserstrahlung die Bearbeitungszeit ohne Qualitätsverlust verkürzt werden. Dabei erfolgt nach dem Schruppen mit raschem Volumenabtrag und mäßiger Rauheit durch das Schlichten eine Reduzierung der Rauheit. Mehrfaches Wiederholen des Schlichtvorganges mit jeweils verminderter Pulsenergie führt zu einer weiteren Reduktion der Rauheit.

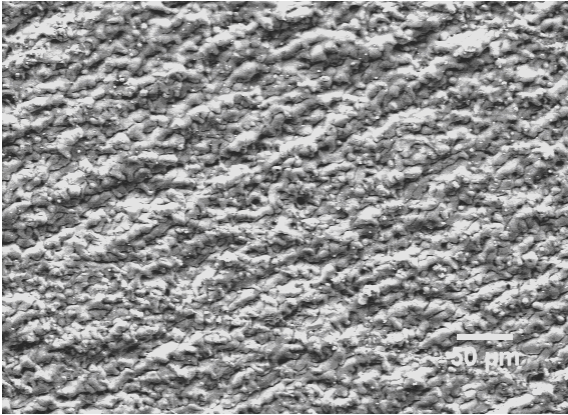
Die Ergebnisse zur Rauheitsminderung und der dabei beobachtete Überzug der Oberfläche mit einer Schicht erstarrter Schmelze legen Untersuchungen zur Beeinflussung der Rauheit durch Erzeugung eines definierten Schmelzefilms als letzten Bearbeitungsschritt nahe.

### 7.3 Glätten mit Laserstrahlung

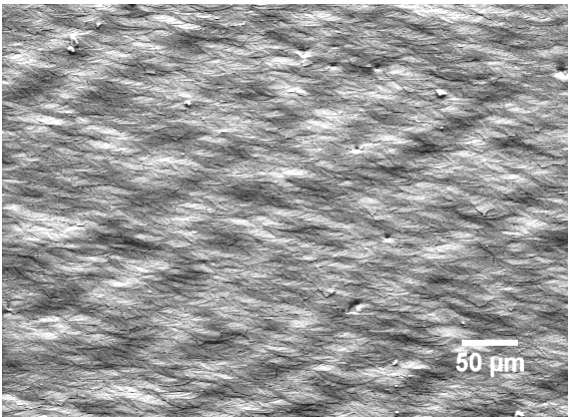
Die Oberflächenqualität kann beim flächigen Abtrag mit kurz-gepulster Laserstrahlung durch Verringerung der eingesetzten Pulsenergie gesteigert werden. Jedoch liegen die Rauheitswerte mit  $Ra \approx 1 \mu\text{m}$  auch nach Anpassung der Prozessparameter noch über den Anforderungen z. B. aus dem Formenbau. Dort liegt die Rauheit polierter Formeinsätze typischerweise bei  $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ . Um zusätzliches Optimierungspotential aufzudecken, müssen die Parametereinstellungen zur bisher erzielten Prozessbeeinflussung beachtet werden.

Den Ergebnissen von Abschnitt 6.6.2 folgend sollte die Rauheit dann minimal werden, wenn die Pulsenergie verringert und gleichzeitig die Pulsleistung erhöht würde. Dies gelingt entsprechend Gleichung 5.2, wenn die Pulsdauer verkürzt werden könnte. Es zeigt sich aber, dass mit der Verminderung der Pulsenergie stets eine Reduzierung der Pulsleistung einhergeht, da die Pulsdauer im verwendeten Lasersystem keine frei wählbare Größe darstellt. Andererseits erlaubt die Beobachtung eines erstarrten Schmelzefilms im vorhergehenden Abschnitt unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Strahlquelle einen weiteren Ansatz zur Rauheitsminderung: Die gezielte Erzeugung einer Schmelze mit kontinuierlicher Strahlung, vergleichbar dem Laserstrahlschweißen.

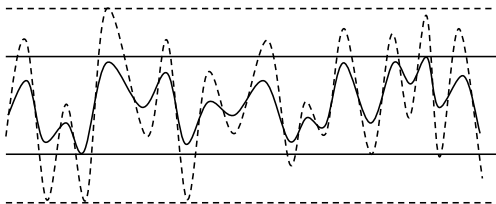
Die Verwendung eines kontinuierlich angeregten Nd:YAG-Lasers mit akusto-optischem Güteschalter erlaubt neben dem gepulsten auch einen cw-Betrieb durch Deaktivieren des Schalters. In diesem Regime kann die applizierte Energie über die Strahlungsleistung und die Bearbeitungsdauer gesteuert werden, d. h. die Verknüpfung von Leistung



**Abbildung 7.37:** gepulste Strahlung: Schichten von Stahl



**Abbildung 7.38:** cw Strahlung: Umschmelzen von Stahl



**Abbildung 7.39:** Laserumschmelzen

und Energie ist nicht mehr allein durch die Strahlquelle vorgegeben, sondern hängt wie beim Laserstrahlschweißen auch von äußeren Verfahrensparametern ab, beispielsweise dem Vorschub. Damit ergibt sich die Möglichkeit, in ein Werkstück bei einmaligem Aufspannen zuerst eine Struktur einzuarbeiten und danach die gewünschte Oberflächenqualität durch Umschmelzen zu erzielen.

Erste Resultate der Kombination: Abtragen mit kurz-gepulster und Umschmelzen mit kontinuierlicher Laserstrahlung zur Reduktion der Rauheit sind in Bild 7.37 und Bild 7.38 dargestellt. Durch die gepulste Bearbeitung wird an dem Werkstück aus Einsatzstahl eine Rauheit  $Rz = 8,2 \mu\text{m}$  erzielt (Bild 7.37). Nach dem Umschmelzen dieser Oberfläche mit kontinuierlicher Strahlung erreicht die Rauheit einen Wert für  $Rz = 3 \mu\text{m}$  und  $Ra = 0,5 \mu\text{m}$ .

Die Bilder verdeutlichen auch die Wirkungsweise der kontinuierlichen Laserstrahlung und erlauben dadurch die Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie für das Laserglätten. Die kontinuierliche Strahlung des Lasers bewirkt ein Schmelzen der Oberfläche, wobei besonders Spitzen im Material bevorzugt werden, da dort eine geringere Wärmeableitung auftritt. Die Erzeugung eines permanenten Schmelzefilms sorgt dann über die Oberflächenspannung für einen Materialausgleich zwischen Spitzen und Tälern, d. h. die Schmelze fließt in die Vertiefungen. Bild 7.39 stellt diese Auswirkung schematisch dar. Die gestrichelten Kurven symbolisieren den Zustand nach dem Schlichten und die durchgezogenen nach dem Umschmelzen.

In der vereinfachenden Darstellung bewirkt das Umschmelzen eine Stauchung der Höhenachse. Durch mehrfaches Umschmelzen ist eine weitere Reduzierung der Rauheit vorstellbar. Jedoch lieferten bereits die Ergebnisse aus den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels, dass die Einkopplung der Laserstrahlung auf angerauten Oberflächen aufgrund von Mehrfachreflektionen deutlich höher ist. Im Versuch, Bild 7.40, zeigt sich folglich eine Rauheitsminderung durch wiederholtes Anwenden von Schlichten und Umschmelzen bei jeweils reduzierter Pulsenergie von Schlichtstufe zu Schlichtstufe bzw. verringerter mittlerer Leistung zwischen den einzelnen Umschmelzschritten. Das Laserglätten verkörpert somit ein kombiniertes Verfahren aus Abtragen und Umschmelzen.

Neben der Prozessführung zeigt auch der Einsatz von Prozessgasen einen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Hierzu wird vergleichend Kupfer mit denselben Parametern bearbeitet, jedoch einmal an Luft

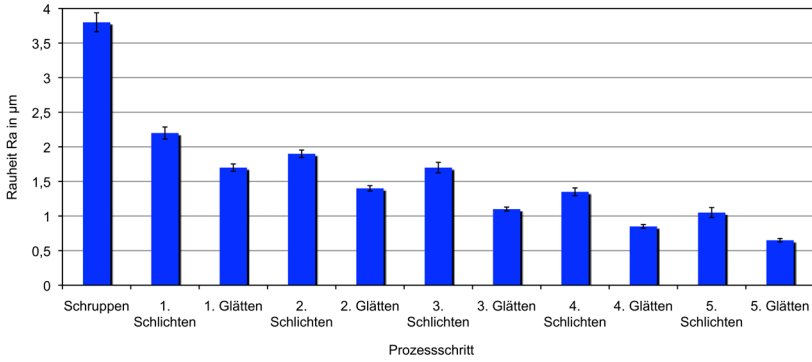


Abbildung 7.40: Prozessführung beim Laserglätten

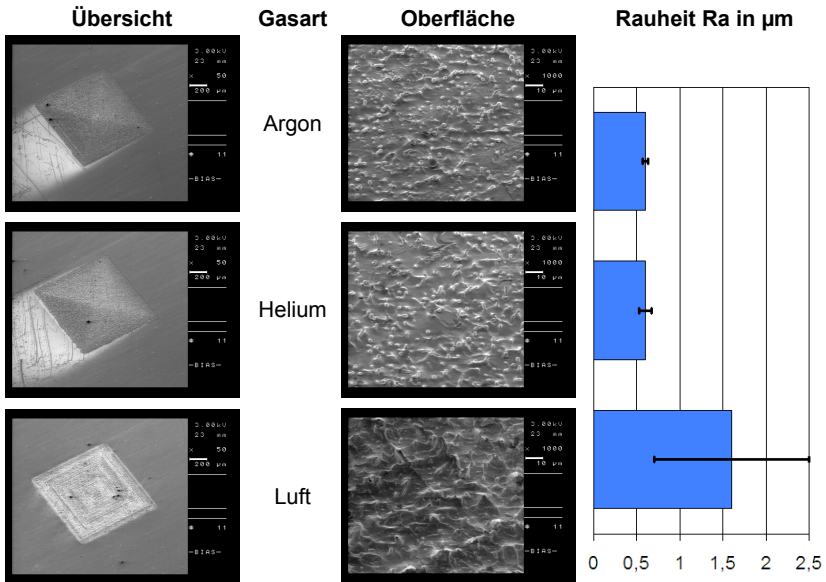


Abbildung 7.41: Einfluss von Schutzgasen

Werkstoff: E-Cu,  $f_P = 10 \text{ kHz}$ ,  $\lambda = 511 \text{ nm}$ ,  $P_P = 1,65 \text{ kW}$ ,  $E_P = 50 \mu\text{J}$

und jeweils in einem Gasstrom von Helium bzw. Argon. Dabei ergibt sich (Bild 7.41), dass sowohl bei der Bearbeitung mit Helium als auch mit Argon deutlich bessere Rauheitswerte zu erzielen sind.  $Ra$  sinkt von  $1,6\ \mu\text{m}$  an Luft auf  $0,6\ \mu\text{m}$  bei Helium und Argon für eine Abtragtiefe von jeweils ca.  $5\ \mu\text{m}$ . Ein deutlicher Einfluss ergibt sich auch auf die Messwertschwankung. An Luft beträgt sie ungefähr 50 % des Absolutwertes, während bei den Inertgasen kaum eine Varianz zu erkennen ist.

Eine EDX-Analyse der strukturierten Oberflächen hierzu liefert für Argon und Helium eine geringere Sauerstoffaufnahme der strukturierten Oberfläche als bei der Bearbeitung an Luft. Daher liegt eine Reduzierung der prozessbedingt ablaufenden Reaktionen, im vorliegenden Fall der Oxidation von Kupfer, als Erklärung nahe. Durch die Verdrängung der Luft und damit einhergehend der verminderten Bereitstellung von Sauerstoff in der Bearbeitungszone nimmt die Wachstumsrate der Oxidschicht ab. Beim wiederholten Bearbeiten derselben Stelle müssen also je nach Prozessgas unterschiedlich dicke Oxidschichten aufgebrochen werden, bevor ein weiterer Abtrag des Materials stattfinden kann. Je dicker nun die Oxidschicht ist, desto größer ist im Anschluss die Rauheit.

Allerdings wird bei einer Bearbeitung unter Sauerstoffausschluss auch beobachtet, dass die Bearbeitung erschwert ist. Ohne Sauerstoff bekommen die Werkstückoberflächen einen metallischen Glanz, d. h. die Oberfläche liegt nahezu oxidfrei vor. Bei den geringen Leistungsdichten, die zum Glätten eingesetzt werden, kommt es daher zu keiner weiteren Einkopplung in das Material; der Prozess bricht zusammen. Erst mit einer zusätzlichen Schlichtbearbeitung an Luft kann wiederum ein nächstes Glätten durchgeführt werden.

Weiterführende Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine metallische Oberfläche durch den Einsatz von kontinuierlicher Laserstrahlung entweder hinsichtlich Rauheit oder in Bezug auf Glanz optimiert werden kann. Die derzeit besten Rauheitswerte an Stahl (Wkst.-Nr.: 1.4122) mit  $Ra = 0,07\ \mu\text{m}$  und  $Rz = 0,4\ \mu\text{m}$  werden bei einer Bearbeitung an Luft erzielt. Die unter Schutzgas umgeschmolzene Oberfläche weist zwar einen deutlich höheren Glanz auf, jedoch fallen die Rauheitswerte mit  $Ra = 1,1\ \mu\text{m}$  und  $Rz = 5,46\ \mu\text{m}$  erheblich höher aus. Bild 7.42 dokumentiert die gemessene Rauheit der beiden Oberflächen.

Besonders augenfällig im Rauheitsprofil der glatten Oberfläche ist die Mikrorauheit, die zu diffuser Reflexion und damit zu erhöhter Absorption im Vergleich zur glänzenden Oberfläche führt. Deren Rauheitswerte lie-

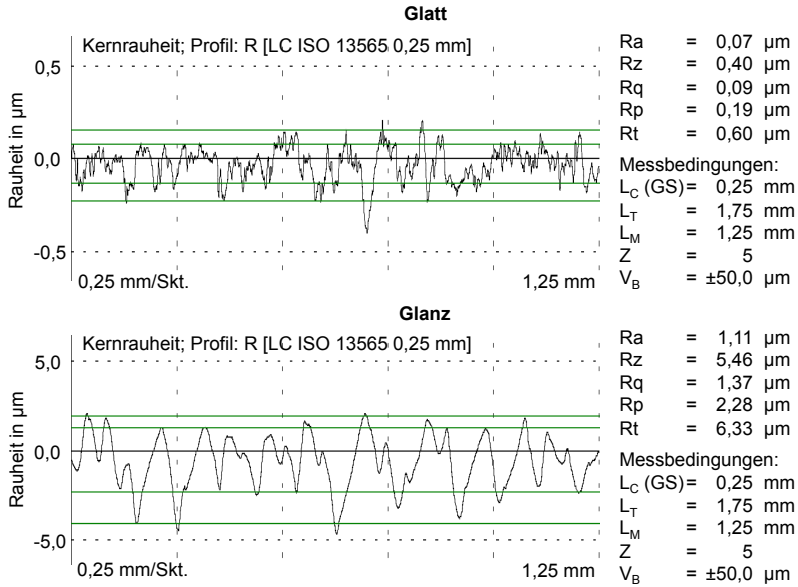


Abbildung 7.42: Vergleich von Rauheitsprofilen

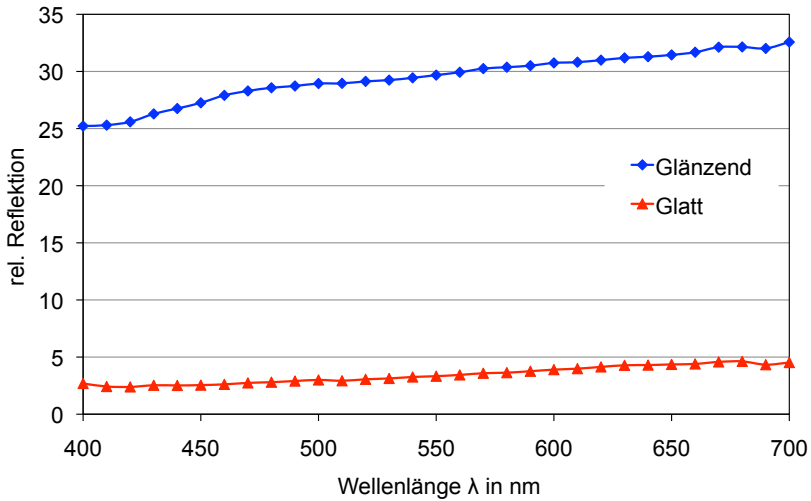


Abbildung 7.43: Relative Reflektion



gen zwar über denen der glatten Oberfläche, jedoch kann unter gleichen Messbedingungen keine Mikrorauheit detektiert werden. Die Flanken des Profils sind anscheinend glatt.

Eine Glanzmessung – Bild 7.43 – belegt den Anstieg der Reflektion und damit die Reduktion der Mikrorauigkeit. Die relative Reflektion liegt bei der glänzenden Probe in etwa um den Faktor 10 oberhalb des Reflektionsgrads der geglätteten. Die mikroskopische Analyse der glatten Oberfläche fördert schließlich eine optische Korngrenzenätzung zu Tage.

Bild 7.44 zeigt eine Aufnahme der Oberfläche im Rasterelektronenmikroskop nach der Laserbehandlung. Die Bearbeitung mit einer Leistung von 10 W, bei einer Pulsfrequenz von 23 kHz, einem Vorschub von 130 mm/s und einem Überlapp von 60 % bei ca. 100 µm Durchmesser der Bearbeitungszone führt offenbar zu einem bevorzugten Abtrag an den Korngrenzen. Der Vergleich mit den Korngrößen der chemisch geätzten Oberfläche, lichtmikroskopische Aufnahme in Bild 7.45, belegt, dass die in beiden Darstellungen ermittelten Abmessungen der Körner, 5 µm bis 9 µm, gut übereinstimmen.

Die geringe Leistungsdichte bewirkt hier einen Abtragmechanismus, der in Bild 2.2 mit Typ B bezeichnet ist. Demzufolge ermöglichen die Inhomogenitäten entlang der Korngrenzen eine bessere Absorption der intensitätsarmen Laserstrahlung als die Körner selbst, wodurch die Korngrenzen sichtbar werden.

Weitere Überlegungen zu den Grenzen des Laserglättens sowie zur optimalen Prozessgestaltung führen zu Berechnungen der Wärmeleitung und der Einschmelztiefe. Mit dem verwendeten Nd:YAG-Laser errechnet sich für die Parameter, die zur Erzeugung der in Bild 7.38 gezeigten Oberfläche eingesetzt wurden (mittlere Leistung: 10 W, Durchmesser der Bearbeitungszone: 100 µm; Vorschub: < 8 m/min) der in Bild 7.46 dargestellte Temperaturgradient in Stahl (obere Kurve). Die Einschmelztiefe erreicht dabei rund 20 µm. Dies entspricht näherungsweise der Strukturhöhe, die bei Stahl mit diesem Verfahren noch in einem Schritt eingeebnet werden kann.

Die Betrachtung berücksichtigt jedoch nicht den Versatz paralleler Bearbeitungsspuren, der ebenfalls einen Einfluss auf den erzielbaren Glätteffekt hat. In Bild 7.38 sind erhabene Strukturen mit ungefähr 50 µm Ausdehnung erkennbar, die auf eine Welligkeit der Oberfläche hinweisen. Sie kann aus dem verwendeten Überlapp von 50 % bei einem Durchmesser der Schmelzlinse – die Bearbeitungszone – von 100 µm und

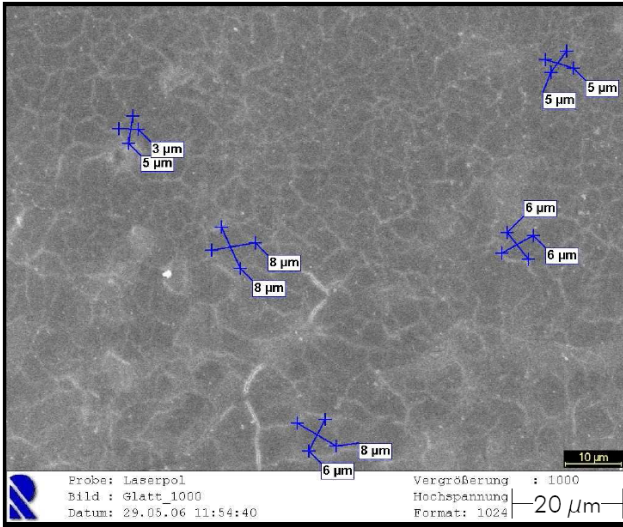


Abbildung 7.44: optisches Ätzen – REM

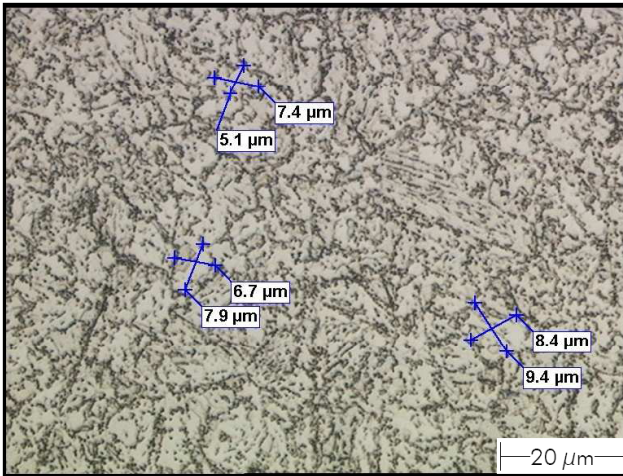


Abbildung 7.45: Chemische Ätzung – Lichtmikroskop

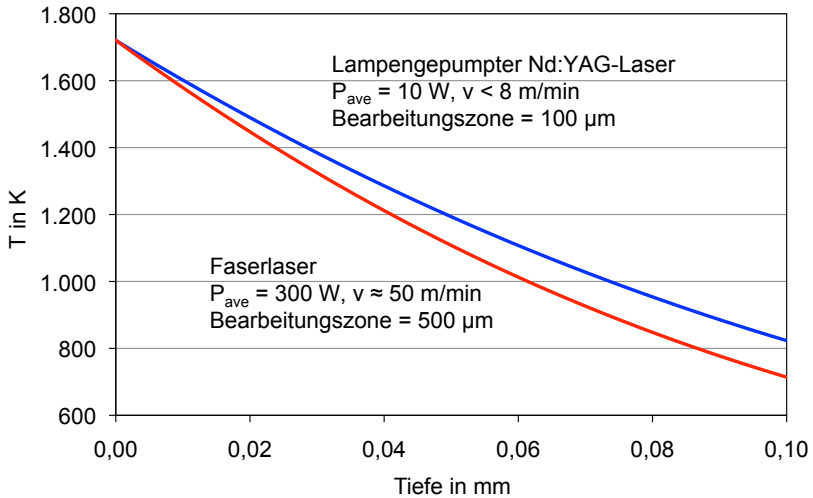


Abbildung 7.46: Prozessoptimierung

der Kreuzschraffur zur Strahlablenkung abgeleitet werden. Mit dieser Prozessführung wird ein maximaler lateraler Materialtransport in der Größenordnung der überlagerten Bearbeitungsspuren erzielt, der die beobachtete Oberflächenstruktur bewirkt.

Eine Verringerung dieses Phänomens könnte durch eine Vergrößerung der Bearbeitungszone erzielt werden. Jedoch ist für eine hohe Prozesssicherheit auf einen ähnlichen Temperaturgradienten zu achten, wie er sich bei Verwendung des lampengepumpten Nd:YAG-Lasers ergibt. Berechnungen zeigen, dass durch den Einsatz neuer Faserlaser mit höherer mittlerer Leistung eine ähnliche Wärmeleitung im Bauteil bei gleicher Einschmelztiefe, jedoch deutlich vergrößerter lateraler Ausdehnung erzielt werden kann, vgl. Bild 7.46.

Eine mittlere Leistung von 300 W in Verbindung mit einer Ausweitung der Bearbeitungszone – hier um den Faktor 5 – ermöglicht die Vergrößerung des Schmelzbades ohne die Einschmelztiefe signifikant zu verändern. Aufgrund der sich dann verringernden Grenzflächenenergie kann auch ein Absenken der Oberflächenspannung erwartet werden. Dadurch verringert sich der Kurvenradius der aufschwimmenden Schmelze und zusammen mit der Erweiterung ihrer lateralen Ausdehnung kann von einer zusätzlichen Reduktion der Rauheitswerte ausgegangen wer-

den: Die Bereiche mit erhabenen Strukturen, wie sie in Bild 7.38 zu beobachten sind, erfahren eine Verbreiterung.

Der in Bild 7.46 gezeigte Temperaturgradient erfordert aber auch eine Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, wiederum um etwa den Faktor 5. Hinzu kommt der größere Versatz wegen der erweiterten Bearbeitungszone, so dass diese Überlegungen, rein rechnerisch betrachtet, zu einer Steigerung der Prozessgeschwindigkeit bei gleichzeitig reduzierten Rauheitswerten um den Faktor 25 führen.

## Kapitel 8

# Bewertende Zusammenfassung

Die Prozesse der Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe mit kurzgepulster Laserstrahlung, also der abtragenden Mikromaterialbearbeitung mit Laserpulsen von ns-Dauer, sind in erster Linie geprägt durch die Pulsleistung  $P_P$ , die Pulsenergie  $E_P$  sowie durch die in dieser Arbeit eingeführten Bearbeitungszone – das ist der Bereich offensichtlicher Wechselwirkung zwischen Werkstoff und einfallender Laserstrahlung – und den darauf bezogenen Überlapp.

Die vorliegenden Ergebnisse belegen auch, dass sog. abhängige Parameter, wie die Leistungsdichte  $L_D$ , also der Quotient der Pulsleistung und des Strahldurchmessers  $2\omega$  – vereinfacht auch als korrelierte Leistungsdichte  $L_{Dk}$  angenommen, das ist der Quotienten aus Pulsleistung und Durchmesser der Bearbeitungszone – Eingang in die Prozessgestaltung finden. Erst wenn die Leistungsdichte einen genügend hohen Wert –  $> 10^6 \text{ W/cm}^2$  – erreicht [HERZIGER ET AL., 1993], übernimmt die Pulsenergie die führende Rolle beim Abtrag. Dies gilt nun nicht mehr nur im stationären Fall, wie durch [KÖRNER ET AL., 1996] zur Typisierung der stationären Abtragmechanismen beschrieben, sondern zeigt sich auch beim dynamischen Abtrag, d. h. bei einer Relativbewegung zwischen einfallendem Laserstrahl und Bauteil.

Eine Erklärung hierfür findet sich mit Gleichung 2.7, der instationären, eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung, die den Energietransport in das Werkstück unter Einwirkung von Laserstrahlung beschreibt.

Ihrzufolge erhöht sich während eines Laserpulses die Temperatur des Werkstoffs proportional zur absorbierten Energie. Bricht der Laserpuls zusammen, so sinkt die Temperatur wieder ab. Damit findet ein Wechselspiel von Schmelze- und Dampferzeugung und schneller Erstarrung bei Einwirkzeiten der Laserstrahlung im ns-Bereich statt. Wird diesem Vorgang eine Relativbewegung überlagert, so ist die Wegstrecke, die der Laserstrahl während eines Pulses auf dem Werkstück zurücklegt zu beachten. Dieser Versatz beträgt aufgrund der kurzen Wechselwirkungszeiten (ca. 100 ns) selbst bei einer für die Mikromaterialbearbeitung hohen Vorschubgeschwindigkeit von 1.000 mm/s nur wenige 1/10.000 mm, d. h. er ist im Vergleich zum Querschnitt der Laserstrahlung – selbst für den Fall fokussierter Strahlung – sehr klein. Damit behält die instationäre Wärmeleitungsgleichung auch beim dynamischen Abtrag ihre Gültigkeit, ebenso wie die aus ihr abgeleiteten Abtragmechanismen.

Es zeigt sich, je höher die Pulsenergie  $E_P$  wird, desto höher liegt die Abtrage rate  $A_R$ . Sowohl die Ergebnisse beim Perkussionsbohren mit Kupferdampf lasern können in dieser Art interpretiert werden wie auch die Resultate des flächigen Abtragens, überwiegend mit Nd:YAG-Lasern erzeugt. Beim Perkussionsbohren wird eine exponentielle Abhängigkeit des Austrittsdurchmessers bei fester Materialdicke von der Pulsleistung, die bei dieser Strahlquelle über die Pulsdauer direkt proportional zur Pulsenergie ist, ermittelt. Dies steht im Einklang mit den Arbeiten Mayerhofers [MAYERHOFER, 1997], der für die erzielte Bohrlochtiefe beim Perkussionsabtrag ebenfalls eine exponentielle Abhängigkeit entwickelte (Gleichung 2.12). Für den Abtrag von einer freien Oberfläche, wie sie die flächige Bearbeitung nach [NIKONCHUK, 1991] darstellt, ergibt sich ein linearer Zusammenhang für das durch einen Laserpuls abgetragene Volumen mit der Pulsenergie. Auch die Ergebnisse anderer Wissenschaftler belegen diesen Sachverhalt, z. B. bei [JANDELEIT ET AL., 1998], die bei vergleichenden Abtraguntersuchungen zwischen ns-, ps- und fs-Laserpulsen feststellten, dass die Abtrage rate überwiegend von der Pulsenergie bestimmt ist.

Einen fünften Parameter der Bearbeitung, die Pulsfolgefrequenz  $f_P$ , berücksichtigt die Energietransportgleichung jedoch nicht. Schon [MAYERHOFER, 1997] bemerkte beim Perkussionsbohren eine erhöhte Abtrage rate bei hoher Pulsfolgefrequenz. Auch die Ergebnisse dieser Arbeit beim flächigen Abtragen deuten auf die zunehmende Abtrage rate mit steigender Pulsfolgefrequenz hin. Jedoch reduziert sich ihr Einfluss beim Formabtrag auf eine Steuerung der gesamten im Prozessverlauf einge-

brachten Energie. Eine ähnliche Wechselwirkung aufeinander folgender Pulse wie beim Perkussionsabtrag ist aufgrund der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil nicht zu beobachten. Weitere übergreifende Prozessparameter können nicht identifiziert werden.

Das Bearbeitungsresultat beim flächigen Abtragen hängt dennoch von zwei zusätzlichen Größen, dem Überlapp  $dx$ , in Vorschubrichtung, und senkrecht dazu, dem Überlapp  $dy$ , ab. Für diese Parameter zeigt bereits die statistische Versuchsplanung auf, dass sie gegenläufige Effekte auf die Rauheit und die Abtragraten haben. Allerdings ist auch eine Möglichkeit zur Optimierung zu erkennen, wenn beide Parameter bei etwa 60 % liegen und der Überlapp  $dx$  etwas größer gewählt wird. Die Ergebnisse der Optimierung liefern schließlich ein Prozessfenster mit dem Überlapp  $dx$  zwischen 60 % und 70 % und dem Überlapp  $dy$  im Bereich von 50 % bis 60 %, in dem die Abtragraten möglichst groß und die Rauheit möglichst klein werden. Dabei bezieht sich der Überlapp jeweils auf die Überlagerung der Bearbeitungszone verschiedener Pulse und nicht auf den Durchmesser der Strahltaile, da für den Abtrag die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie bedeutender ist als die reinen physikalischen Größen.

Dennoch wird die Bearbeitungszone nicht nur von den thermo-physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs sondern auch von der Strahlausbreitung bestimmt, wie die lineare Abhängigkeit ihres Durchmessers von der Fokuslage  $z_f$  zeigt. Darüber hinaus ergibt sich ein linearer Zusammenhang mit der Pulsleistung, die zu einer Beschreibung dieser beiden Abhängigkeiten der Bearbeitungszone in einer Ebenengleichung führt.

Betrachtungen zur Strahlausbreitung und ihre Einwirkung auf die Bearbeitungsergebnisse bestätigten die stetig wechselnden Bedingungen während der Abtragprozesse. Die Interpretation der Abtragresultate beim Perkussionsbohren und die Einführung der Iso-Intensitätslinien – das sind Linien gleicher Intensität – ermöglicht schließlich die Modellierung der Pulsüberlagerung für die flächige Bearbeitung. Die Beachtung der Kaustik der Laserstrahlung allein erweist sich nämlich als ungenügend für die Entwicklung eines Prozesses zur präzisen Bearbeitung. Vielmehr muss die Intensitätsverteilung entlang des fokussierten Laserstrahls, insbesondere die Grenzintensität, bei der der Werkstoff noch mit der Strahlung in Wechselwirkung tritt, in Augenschein genommen werden. Dabei verhindern die unterschiedlichen thermo-physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, die ihre Abtragschwelle bestimmen, eine

allgemein gültige Beschreibung. Dennoch kann eine Vorstellung zum Verlauf und zum Verhalten der Iso-Intensitätslinien bei unterschiedlichen Randbedingungen für die Simulation der Pulsüberlagerung beim flächigen Abtrag entwickelt werden.

Der Ansatz über das telezentrische optische Modell, einen einfachen Zugang zu gewinnen, ermöglicht zwar die Vorhersage einer definierten Strahlformung, z. B. eines *Photonenrohrs*, jedoch liegen bei eingehender Untersuchung die theoretischen Werte etwa eine Größenordnung über den experimentellen Beobachtungen. Ursache hierfür sind die Forderungen des telezentrischen Modells nach einer homogenen Ausleuchtung der optischen Elemente bei gleichzeitig geringer Divergenz der Strahlung, welche von den eingesetzten Strahlquellen (CVL: top-hat-Profil bei einem  $M^2 \approx 16$ ; Nd:YAG-Laser:  $TEM_{00}$  bei  $M^2 \approx 1,3$ ) nicht erfüllt werden.

Die Anwendung der Gaußschen Strahlausbreitung hingegen liefert gute Übereinstimmungen für beide Lasertypen und erlaubt darüber hinaus die Berechnung ähnlicher Strahlformen wie mit dem telezentrischen Ansatz. Unter der Annahme einer Gaußschen Strahlung, die, wie in Abschnitt 2.2.2 ausgeführt, im kleinsten Querschnitt eine transversale Gauß-förmige Intensitätsverteilung aufweist, welche sich entlang der Ausbreitungsrichtung mit sinkenden Intensitäten reproduziert, gelingt schließlich eine Simulation, die den experimentellen Resultaten entspricht und die bei der Entwicklung von Prozessstrategien für den flächigen Abtrag eingesetzt werden kann. Außerdem gestattet sie eine Beschreibung der Iso-Intensitätslinien und ihres Verhaltens bei unterschiedlichen Eingangsparametern, die gut mit den Untersuchungsergebnissen korreliert.

Demnach bildet die Grenzintensität, in vereinfachter Darstellung als Ebenenprojektion, bei geringer Pulsleistung eine auf der Strahlachse langgezogene Raute, deren größte Breite in die Strahltaile fällt. Bei höheren Pulsleistungen dupliziert sich diese Raute, wobei die beiden Rauten symmetrisch entlang der Strahlachse verschoben werden. Ihre Schnittlinie liegt dabei in der Strahltaile, so dass die Grenzintensität, die der Kontur der geometrischen Figur folgt, oberhalb und unterhalb des kleinsten Strahlquerschnitts ihre größten Ausdehnungen besitzt. Mit steigender Pulsleistung entfernen sich die beiden zunehmenden Maxima von einander und die beiden Rauten strecken sich weiter entlang der Strahlachse. Damit trägt diese Vorstellung einerseits der Intensitätsverteilung eines Gaußschen Strahls und andererseits der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie nicht nur im Bereich der Strahltaile



Rechnung. Die daraus entwickelte Simulation der Pulsüberlagerung für den flächigen Abtrag liefert als wesentliche Erkenntnis die permanente Änderung des Überlapps mit fortschreitender Abtragtiefe.

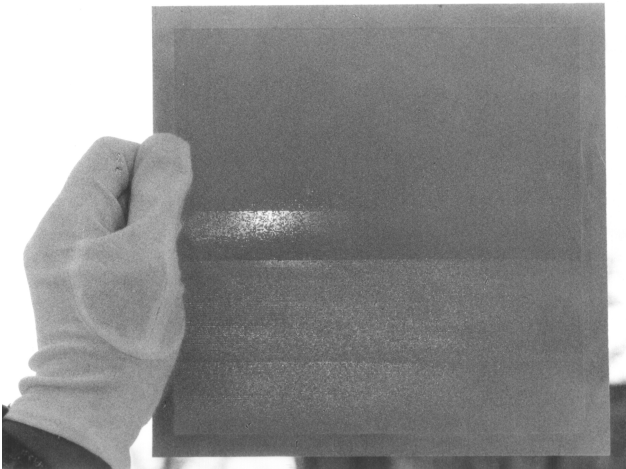
Aufgrund des speziellen Verlaufs der Iso-Intensitäten ist der Überlapp bei der schichtweisen Bearbeitung, wie sie das Formabtragen zur Lasereindbearbeitung erfordert, in keiner Ebene konstant. Dementsprechend resultiert eine stetige Anpassung von Pulsfolgefrequenz oder Vorschub und Versatz für gleichbleibende Prozessbedingungen und damit konstante Fertigungsqualität, sowohl hinsichtlich der Oberflächengüte wie auch der Geometrietreue.

Die angesichts ihrer Vielfältigkeit komplexen Beziehungen der Bearbeitungsparameter untereinander sowie die enge Verknüpfung der interessierenden Größen auf der technologischen Seite verhindert eine quantitative Aufarbeitung der prozessualen Zusammenhänge. Dennoch können über die qualitative Beschreibung hinaus für einige Größen, z. B. die Bearbeitungszone oder den Volumenabtrag pro Puls, formelhafte Beziehungen erarbeitet werden.

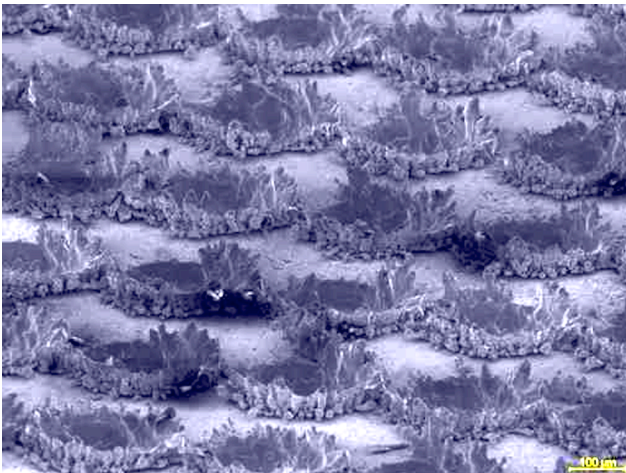
Der Ansatz, über die Betrachtung der Einzelprozesse Korrelationen für eine ganzheitliche Darstellung der Lasereindbearbeitung zu erarbeiten, führt zu einem tieferen Verständnis der Prozesse. Darüber hinaus ermöglicht er unter Berücksichtigung der Werkstückhandhabung sowie der Strahlführungssysteme einerseits die beispielhafte Entwicklung von optimierten Bearbeitungsstrategien und bietet andererseits Hilfestellung für ein strukturiertes Vorgehen zur Lösung neuer Aufgaben.

Besonderes Augenmerk bei der Entwicklung von Bearbeitungsstrategien liegt auf Abtragprozessen mit hoher Abtragrates bei sonst günstigen Randeigenschaften wie geringer Rauheit oder gratarmen Bohrungen. Aber auch die Handhabungssysteme finden hierbei Berücksichtigung. So konnten verschiedene Bauteilmuster mit Anwendungspotenzial auf der Grundlage der hier vorgestellten Erkenntnisse erstellt werden:

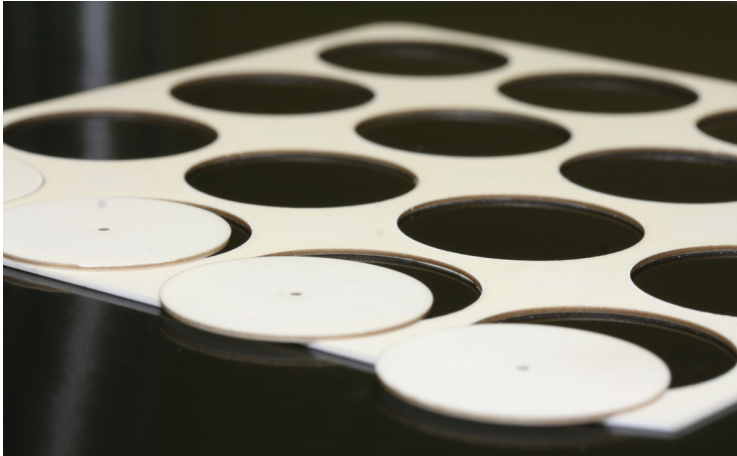
Bild 8.1 zeigt ein Multilochblech aus 1 mm dickem Aluminium mit Tausenden Bohrungen, deren Austrittsdurchmesser 50  $\mu\text{m}$  betragen. Solche Bauteile, die an Tragflächen und Leitwerken von Flugzeugen eingesetzt werden, können zur Treibstoffeinsparung durch Reduktion des aerodynamischen Widerstands beitragen. Die Erfahrungen wurden außerdem eingesetzt um sonst unerwünschte Nebeneffekte gezielt zur Bauteiloptimierung zu nutzen, wie in Bild 8.2 dargestellt. Die Aufwürfe sichern die Lagerschale im Pleuelauge durch Erzeugen einer formschlüssigen Verbindung zwischen den beiden Partnern gegen Verdrehen.



**Abbildung 8.1:** Multilochblech aus Aluminium; ca. 130.000 Bohrungen



**Abbildung 8.2:** Strukturiertes Pleuel aus C70



**Abbildung 8.3:** Modenblenden aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Auch beim Wendelbohren führen die Erkenntnisse zu einer Prozessoptimierung. Insbesondere die Berücksichtigung der Schmelzeverdrängung aufgrund des Ablationsdrucks in den gebildeten Schnittspalt hinein mit der Ausbildung von Brücken aus kondensiertem Material, wie es bereits [NIKONCHUK & POLYAKOV, 1992] beim Schneiden dünner Folien beobachtet hatten, ermöglicht eine Steigerung der Prozesseffizienz. Die Anpassung der Parameter erlaubt nun auch die Bearbeitung von thermoschockempfindlichem Material, wie dünnen Keramikplatten. Bild 8.3 zeigt eine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kachel (150 mm x 150 mm x 0,6 mm) aus der 16 Modenblenden herausgetrennt wurden. Modenblenden filtern im Resonator eines Lasers höher divergente Anteile aus der Strahlung, wodurch sich die Strahlqualität verbessert. Nach dem Einbringen der Modenbohrung ( $\text{Ø}$ : 0,9 mm bis 1,5 mm) wurden die Blenden mit einem Durchmesser von 25 mm ausgeschnitten, ohne das Substrat zu zerstören.

Beim Formabtrag interessieren unter Berücksichtigung der ermittelten Korrelationen, wie die Abhängigkeit der Rauheit von der Pulsleistung bzw. Pulsenergie, vor allem die Auswirkungen verschiedener Strukturierungsmuster auf das Abtragverhalten. Dabei zeigte sich an einfachen Geometrien, dass die Bearbeitung mit Kreuzschraffur, wie sie heute oft eingesetzt wird, sehr empfindlich auf Abweichungen im Überlappgrad reagiert, was das Prozessfenster stark einschränkt. Eine Rotation des

Abtragsmusters nach jedem Bearbeitungsschritt, d. h. nach dem Abtrastern eines Ebenenpaars, um einige Grad führt zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengüte ohne die Abtragsrate zu beeinflussen. Allerdings sind mit dieser Art der Geometriefüllung kaum komplexe Konturen oder nur mit geringer lateraler Auflösung herzustellen.

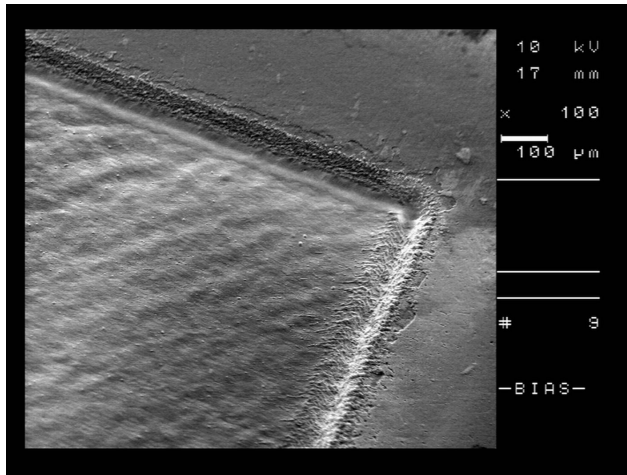
Eine deutliche Verbesserung sowohl in Bezug auf die Komplexität von Geometrien wie auch in Hinsicht auf eine reduzierte Rauheit bietet das Bit-Mapping, bei dem die abzutragenden Strukturen durch Übereinanderlegen von zeilenweise abzuarbeitenden Abtrageebenen erstellt werden, vergleichbar der Graustufen-Beschriftung von Smart-Cards, die jedoch mit der Bearbeitung einer einzelnen Lage auskommt. Die Kombination verschiedener Abtragsmuster ermöglicht ohne Verlust bei der Abtragsrate auch die Fertigung komplexer Geometrien mit geringer Rauheit.

Eine weitere Reduzierung der Rauheit ist nur bei verringerter Abtragsrate durch Absenken der Pulsenergie möglich. Damit geht jedoch ein erhöhter Zeitbedarf einher. Eine Minimierung der Bearbeitungsdauer gelingt durch eine Prozessaufteilung in Schruppen und Schlichten. Dabei wird analog zu den spanenden Verfahren der Materialbearbeitung zunächst grob vorgearbeitet, d. h. mit hoher Pulsenergie, wodurch eine raue Oberfläche entsteht, die im nachfolgenden Bearbeitungsschritt unter Verwendung niedrigerer Pulsenergie eingeebnet werden kann. Mit den zur Verfügung stehenden Pulsenergien  $E_P \approx 1 \text{ mJ}$  kann schließlich eine Abtragsrate  $A_R$  bis  $6 \text{ mm}^3/\text{min}$  erzielt werden, wobei die Rauheit  $Ra \approx 5 \text{ }\mu\text{m}$  beträgt. Mit Absenken der Pulsenergie reduziert sich bei Einsatz des Bit-Mapping die Abtragsrate auf  $1,1 \text{ mm}^3/\text{min}$ , wobei ein Mittenrauwert von  $2 \text{ }\mu\text{m}$  erzielt wird und bei einer Abtragsrate  $A_R = 0,5 \text{ mm}^3/\text{min}$  beträgt die Rauheit nur noch  $1,6 \text{ }\mu\text{m}$ . Die geringste Rauheit mit  $Ra = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$  beim Abtragen kann bei einer Abtragsrate  $A_R = 0,075 \text{ mm}^3/\text{min}$  erreicht werden. Die Reduzierung der Rauheit durch Verringerung der Pulsenergie folgt dabei den Mechanismen des stationären Abtrags. Letztlich wird jeweils Einfluss auf die erzeugte Schmelzschichtdicke genommen.

Höchste Ansprüche hinsichtlich der Rauheit sind schließlich durch das Laserglätten zu befriedigen. Diese Verfahrensvariante beinhaltet eine abwechselnde Behandlung des Werkstücks mit gepulster Strahlung bei stets sinkender Pulsenergie und kontinuierlicher Laserstrahlung. Die kontinuierliche Strahlung sorgt dabei für die Entfernung von Mikrorauigkeiten im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich durch gezielte Erzeugung einer Um-

schmelzschicht, wobei die makroskopische Rauheit überwiegend erhalten bleibt. Mit der gepulsten Bearbeitung werden zwar wieder Mikrorauheiten erzeugt, jedoch wird die Makrorauheit abgetragen. Dies zeigt sich an einem matten Aussehen der gepulst bearbeiteten Oberflächen, während die mit kontinuierlicher Laserstrahlung bearbeiteten Bereiche blank erscheinen. Auf diese Weise ist eine Reduktion der Rauheit auf  $Ra = 0,07 \mu\text{m}$  mittels Laserglätten möglich. Bei Einsatz von Schutzgas können auch oxidfreie Oberflächen mit hohem Glanz erzeugt werden. Allerdings ist selbst bei einer Glanzsteigerung um den Faktor 10 durch Entfernen der Mikrorauheit noch ein Mittenrauwert von  $Ra > 1 \mu\text{m}$  möglich.

Auch diese Erfahrungen konnten zur Herstellung von industriell eingesetzten Bauteilen genutzt werden. Bild 8.4 zeigt eine Aussparung für einen Dünnschichtsensor, der als Druckaufnehmer an einer Laufrolle aus Einsatzstahl dienen sollte.



**Abbildung 8.4:** Sensoraufnahme

Typische Bearbeitungszeiten für die dargestellte Sensoraufnahme mit den Abmessungen 5 mm x 1 mm x 0,06 mm sind:

Schruppen: ~ 2 min  
Schlichten: ~ 1 min  
Glätten: ~ 1 min

Für die Maßhaltigkeit von Vorteil erwies sich bei der Herstellung dieser Struktur die Bearbeitung in einer Aufspannung. Die Möglichkeit die verwendete Strahlquelle sowohl gepulst als auch kontinuierlich emittierend zu betreiben, erlaubt es, das Werkstück bei den verschiedenen Fertigungsschritten in der Aufnahme zu belassen und so Positionierfehler zu vermeiden.

## Kapitel 9

# Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass selbst einfache Ansprüche bei der Lasereindbearbeitung einerseits eine gezielte und detaillierte Auseinandersetzung mit der Systemtechnik – Strahlformung, Strahlführung und Handhabung –, andererseits aber auch mit dem Prozess, d. h. mit der Strahl-Stoff-Wechselwirkung, erfordern. Für einen industriellen Einsatz der Lasereindbearbeitung ist der daraus resultierende Aufwand zur Herstellung eines ersten Bauteils enorm, insbesondere in Anbetracht möglicher, etablierter Konkurrenzverfahren wie dem Hochgeschwindigkeitsmikrofräsen oder dem Mikrofunkenerodieren. Legt man aber die Erkenntnisse dieser Arbeit zu Grunde, so kann für die Lasereindbearbeitung dennoch ein Eingang in die industrielle Fertigung prognostiziert werden. Voraussetzung hierfür wäre eine Aufgabenteilung, wie oben bereits angedeutet, in Systemtechnik, also einen Anlagenhersteller, und Prozesstechnik, die sich der Anwender als Alleinstellungsmerkmal erarbeitet. Die hierzu erforderliche Maschine kann anhand der nun vorliegenden Erkenntnisse als Anlage für die lasergestützte Mikromaterialbearbeitung mit kombinierter Oberflächenveredelung konfiguriert werden.

Als Strahlquelle bietet sich ein güte-geschalteter Faserlaser mit einer mittleren Leistung von einigen 100 W an, der sowohl cw als auch gepulst betrieben werden kann. Dabei sind Pulsfolgefrequenzen bis 100 kHz und eine Pulsdauer von ca. 50 ns anzustreben. Die maximale Pulsenergie sollte ca. 10 mJ betragen. Zur Strahlablenkung ist ein Scannersystem mit einer Taumleinheit, für die Korrektur der Flankenwinkel, und

einem z-Hub zur schnellen, taumelfreien Fokuseinstellung vorzusehen. Als Fokussiereinheit ist eine telezentrische Linse zu wählen. Da der Laserstrahl berührungsfrei arbeitet, ist eine Sensorik zur Tiefenmessung unerlässlich. Diese soll in einem Regelkreis die dynamische Anpassung der Pulsfolgefrequenz mit der Abtragtiefe zum Ausgleich der sinkenden Iso-Intensitäten und der damit verbundenen Änderung der Bearbeitungszone und des Überlapps ermöglichen. Für größere Werkstücke kann das System um eine mechanische Dreiachs-Positionierung erweitert werden.

Damit sind die Systemvoraussetzungen für die Laserendbearbeitung gegeben, die gegenüber den oben genannten möglichen Konkurrenzverfahren einige Vorteile aufweist:

- Kein Werkzeugverschleiß
- Keine kontaminierten Kühl-Schmierstoffe oder Dielektrika
- Nahezu unbeschränkte Palette an bearbeitbaren Werkstoffen



# Anhang A

# Verzeichnisse



# Symbole und Abkürzungen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$A$	%	Absorptionsgrad
$A_R$	mm <sup>3</sup> /min, μm <sup>3</sup> /s	Abtrage rate
$a$	μm, mm	Breite
$b$	mm mrad	Strahlparameterprodukt
$c_p$	J/g K	Spezifische Wärmekapazität
$d, D$	μm, mm	Durchmesser
$d_b$	μm, mm	Höhe der Abbildung
$d_f$	μm, mm	Strahlweite im telezentrischen Modell
$d_m$	μm	Mittlerer Durchmesser
$d_x$	%	Überlappgrad in Vorschubrichtung
$d_y$	%	Relativer Versatz senkrecht zur Vorschubrichtung
$E_B$	J	Energieeintrag
$E_P$	mJ, J	Pulsenergie
$f$	mm	Brennweite, objektseitige Brennweite
$f'$	mm	Bildseitige Brennweite
$f_P$	kHz	Pulsfolgefrequenz, Repetitionsrate
$F$		F-Zahl – Linsenausleuchtung: Quotient aus Brennweite und Durchmesser der einfallenden Strahlung
$h$	mm	Neue Rayleighlänge

Symbol	Einheit	Beschreibung
$h_f$	mm	Halbe Photonenrohlänge
$H_V$	J/mol	Verdampfungsenthalpie
$I, I_0$	Counts/s	Intensität
$l, L$	mm, m	Abstand vom objektseitigen Fokus
$L_D$	W/cm <sup>2</sup>	Leistungsdichte
$L_{DK}$	W/cm <sup>2</sup>	Korrelierte Leistungsdichte – Leistung bezogen auf die Bearbeitungszone
$m_V$	g	Abgetragene Masse
$M_i$		Matrix i
$M^2$		Strahlqualitätskennzahl
$n$		Brechungsindex
$N$		Anzahl
$p$	bar, Pa	Druck
$P_{ave}$	W	Mittlere Leistung
$P_P$	kW	Pulsleistung
$q$	J/s	Wärmeleitungsstrom
$q_L$	J	Absorbierte Energie
$r$	μm, mm	Radius
$R$	%	Reflexionsgrad
$Ra$	μm	Mittenrauwert
$Rz$	μm	Gemittelte Rautiefe nach DIN 10 Punkt Methode
$R(Z)$	μm	Kurvenradius der Wellenfront
$s$	μm, mm	Tiefe, Dicke
$t$	mm/mm	Konizität
$t$	s	Zeit
$t_B$	s	Bearbeitungszeit
$t_P$	ns, s	Pulsdauer
$T, T_0$	°C, K	Temperatur, Ausgangstemperatur
$T_S$	°C, K	Schmelztemperatur
$T_V$	°C, K	Verdampfungstemperatur
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$V$		Auflösungsvermögen
$V_P$	μm <sup>3</sup>	Volumenabtrag pro Puls
$X_i$		Messwert
$\langle X \rangle$		Mittelwert der Messwerte $X_i$
$z$	μm	Abstand der Oberflächen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$z_f$	mm	Fokuslage, Arbeitsabstand – Abstand des Fokus zur Oberfläche
$Z$	mm	Abstand zur Strahltaille
$Z_R$	mm	Rayleighlänge
$Z_Z$	$\mu\text{m}$	Rundheitsabweichung nach DIN 4291
$\Delta f$	mm	Shift der neuen Strahltaille
$\alpha$	$^\circ$ , mrad	Divergenz, Divergenzwinkel
$\mu$	$\text{mm}^{-1}$	Linearer Absortionskoeffizient
$\eta$	%	Effizienz
$\kappa$	$\text{m}^2/\text{s}$	Temperaturleitfähigkeit
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\lambda_W$	$\text{W}/\text{cm K}$	Wärmeleitzahl
$\rho$	$\text{g}/\text{cm}^3$	Dichte
$\sigma$		Standardabweichung
$\omega, \omega_0$	$\mu\text{m}$	Radius der Strahlweite
$\omega(Z)$		
$\xi$		Faktor

Abkürzung	Beschreibung
AOM	Akusto-optischer Modulator
$\text{CO}_2$	Kohlendioxid
CVL	Copper Vapour Laser, Kupferdampfaser
cw	Continuous wave, kontinuierliche Strahlung
EDM	Electro discharge machining, Funkenerosion
EDX	Energiedispersive Analyse
FWHM	Full width half maximum, Halbwertbreite
Nd:YAG	$\text{Nd}^{3+}$ -Ionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
$\text{TEM}_{00}$	Grundmode
WLI	Weißlichtinterferometer



# Literaturverzeichnis

- AFANAS'EV, Y. V.; KROKHIN, O. N.: *Vaporization of Matter Exposed to Laser Emission*. Soviet Physics JETP 25(4) (1967) S. 639–645.
- VON ALLMEN, M.; BLATTER, A.: *Laser-Beam Interactions with Materials: Physical Principles and Application*. Nr. 2 In Springer Series in Materials Science. Springer-Verlag, Berlin [u.a.] 1995, 2. Auf. ISBN 3-540-59401-9.
- ASHKENASI, D.; ROSENFELD, A.: *Materialbearbeitung von transparenten Dielektrika mit Femtosekunden-Laserimpulsen*. LaserOpto 31 (1999) S. 91 ff. ISSN 1437-3041.
- BLEHER, J.: *Markieren mit diodengepumpten Festkörperlasern*. Laser-Opto 31 (1999) S. 56 ff.
- BLEYS, P.; KRUTH, J.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROYEN, L.; HUMBEECK, J. V.: *Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM*. Advanced Engineering Materials 8(1-2) (2006) S. 15–25. ISSN 1438-1656.
- CAMPANELLI, S. L.; LUDOVICO, A. D.; BONSERIO, C.; CAVALLUZZI, P.; CINQUEPALMI, M.: *Experimental Analysis of the Laser Milling Process Parameters*. Journal of Materials Processing Technology 191(1-3) (2007) S. 220–223.
- CAMPBELL, B. R.; PALMER, J. A.; SEMAK, V. V.: *Peculiarity of Metal Drilling with a Commercial Femtosecond Laser*. Applied Surface Science 253(15) (2007) S. 6334–6338.
- COMPALA: *Cost-Effective Series and Mass-Production of High-Precision Metallic Microparts and Optical Structures in Moulds by Laser*

- Submicron-Machining (COMPALA)*. Quality Validation Report Contract no.: BRPR-CT95-0104. Project no.: BE95-1228, Brite Euram III 1999.
- DAUSINGER, F.; ABELN, T.; BREITLING, D.; RADTKE, J.; KONOV, V. I.; GARNOV, S. V.; KONONENKO, T. V.; TSARKOVA, O.: *Bohren keramischer Werkstoffe mit Kurzpuls-Festkörperlasern*. *LaserOpto* 31(3) (1999) S. 78–85.
- DICKMANN, K.; VON ALVENSLEBEN, F.; FRIEDL, S.: *Fein- und Mikroborenen mit Nd:YAG-Q-switch-Laser hoher Strahlqualität*. *Laser & Optoelektronik* 23(6) (1991) S. 56–62. ISSN 0722-9003.
- DIERKEN, R.: *Untersuchungen zur Entstehung von Emissionen bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung und deren Entfernung bei abtragenden Verfahren*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 1996.
- DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: *Statistische Verfahren zur Qualifikation von Messmitteln, Maschinen und Prozessen : mit 62 Tabellen*. Hanser, München, Wien 1998, 3., bearb. und erw. Auf. ISBN 9783446193598.
- DUBEY, A. K.; YADAVA, V.: *Laser Beam Machining – a Review*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48(6) (2008) S. 609–628.
- EBERT, G.; SUTOR, U.: *Lasercaving Offers new Machining Method*. *Industrial Laser Review* S. 23–26.
- EMMEL, A.: *Persönliche Mitteilung aus der Vorlesung für Lasermaterialbearbeitung an der FH Amberg-Weiden* 2006.
- GILLNER, A.: *Produktionstechnik zum Mikrostanzen und Mikroprägen metallischer Bauteile*. Fraunhofer Institut Lasertechnik Aachen 1999.
- GILLNER, A.; HELLRUNG, D.; POPRAWA, R.: *Micro-structuring with Nd:YAG-lasers*. In *Laser Assisted Net Shape Engineering 2. Proceedings of the 30th International Cirp Seminar on Manufacturing Systems*, S. 561–569. Meisenbach, Bamberg 1997.
- HANEMANN, T.; HAUSSELT, J. H.; RUPRECHT, R.; SKRIFVARIS, M.; GAHR, K. H. Z.; PFLEGING, W.: *Rapid Fabrication of Microcomponents*. In B. COURTOIS; S. B. CRARY; K. J. GABRIEL; J. M.



- KARAM; K. W. MARKUS; A. A. O. TAY (Hrsg.), *Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS*, Bd. 4019, S. 436–443. SPIE, Paris, France 2000.
- HECHT, E.; ZAJAC, A.: *Optics*. Addison-Wesley, Reading Mass. 1977, 2. print. Auf. ISBN 9780201028355.
- HENNING, P.: *Persönliche Mitteilung. FH Bremen* 2003.
- HERZIGER, G.; LOOSEN, P.; BACKES, G.: *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung: Grundlagen, Systeme, Verfahren*. C. Hanser, München 1993. ISBN 9783446159150.
- HEYL, P.; OLSCHESKI, T.; WIJNAENDTS, R. W.: *Manufacturing of 3D Structures for Micro-Tools using Laser Ablation*. Microelectronic Engineering 57-58 (2001) S. 775–780. ISSN 0167-9317.
- HOFFMANN, E.; POPRAWA, R.: *Aufgaben zur Lasertechnik für Ingenieure und Physiker: 60 Aufgaben und 300 Fragen*. Berichte aus der Lasertechnik. Shaker, Aachen 2000. ISBN 3-8265-7303-X.
- HOLTZ, R.; WESTPHÄLING, T.: *Pulsed Solid State Lasers for Fine Material Processing and Its Applications*, Bd. DVS-Berichte 221. DVS Media GmbH, Düsseldorf 2002. ISBN 978-3-87155-678-4.
- HUMMEL, R.: *Optische Eigenschaften von Metallen und Legierungen*. Springer, Berlin 1971.
- HUNGER, H.: *Werkstoffanalytische Verfahren : eine Auswahl - mit 40 Tabellen*. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart 1995, 1. Auf. ISBN 9783342004301.
- IHLEMANN, J.; SIMON, P.; MAROWSKY, G.: *Sub- $\mu\text{m}$ -Machining of Metallic Materials with Femtosecond Excimer Lasers*. LaserOpto 31(3) (1999) S. 86–89.
- JANDELEIT, J.; HORN, A.; WEICHENHAIN, R.; KREUTZ, E. W.; POPRAWA, R.: *Fundamental Investigations of Micromachining by Nano- and Picosecond Laser Radiation*. Applied Surface Science 127 (1998) S. 885–891.

- JANDELEIT, J.; URBASCH, G.; HOFFMANN, D.; TREUSCH, H. G.; KREUTZ, E. W.: *Mikrostrukturierung von Metallen und Halbleitern durch ultrakurze Laserimpulse*. In W. WAIDELICH (Hrsg.), *Laser in Forschung und Technik : Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95: Laser in research and engineering*. Springer, Berlin [u.a.] 1996. ISBN 9783540613169.
- KALDOS, A.; PIEPER, H. J.; WOLF, E.; KRAUSE, M.: *Laser Machining in Die Making—a Modern Rapid Tooling Process*. *Journal of Materials Processing Technology* 155 (2004) S. 1815–1820.
- KOCH, J.: *Elementarprozesse beim Abtrag mit dem Kupferdampfaser*. Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 1996.
- KOCH, J.; LANG, A.: *Feinstbohren mit KupferdampfLasern (in einer Verstärkerkette)*. In *Präzisionslaserstrahlfertigungstechnik für den Maschinenbau*. blz, Erlangen 1997.
- KÖRNER, C.: *Theoretische Untersuchungen zur Wechselwirkung von ultrakurzen Laserpulsen mit Metallen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 1997.
- KÖRNER, C.; MAYERHOFER, R.; HARTMANN, M.; BERGMANN, H. W.: *Physical and Material Aspects in using Visible Laser Pulses of Nanosecond Duration for Ablation*. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 63(2) (1996) S. 123–131.
- KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik mit zahlreichen Bildern und Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München 2007, 19. Auf. ISBN 9783446410282.
- LI, C.; SHANNON, M. A.: *A Simplified Cavity Analysis for Estimating Energy Coupling During Laser Ablation and Drilling of Solids - Experiment*. *Applied Surface Science* 150(1-4) (1999) S. 211–226.
- LIU, J. S.; LI, L. J.; JIN, X. Z.: *Accuracy Control of Three-Dimensional Nd:YAG Laser Shaping by Ablation*. *Optics & Laser Technology* 31(6) (1999) S. 419–423. ISSN 00303992.

- MAYERHOFER, R.: *Mikromaterialbearbeitung mit KupferdampfLasern - Prozeßcharakterisierung und Werkstoffabhängigkeit des Abtrags*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 1997.
- MAYERHOFER, R.; WRBA, P.: *Auf oder ab? - Formgebende Lasermaterialbearbeitung im Werkzeugbau*. Sonderdruck aus Laser-Praxis - Laser in der Produktion 2.
- MEIJER, J.: *Laser Beam Machining (LBM), State of the Art and New Opportunities*. Journal of Materials Processing Technology 149(1-3) (2004) S. 2-17.
- MEINERS, E.: *Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozess*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 1995.
- MURPHY, S.: *Laser Drilling: Capabilities and Trends*. Lasers & Applications 6 (1987) S. 59 ff.
- NIKONCHUK, M. O.: *Copper Vapor Laser Precision Processing*. In J. J. KIM; F. K. TITTEL (Hrsg.), *Gas and Metal Vapor Lasers and Applications*, Bd. 1412, S. 38-49. SPIE, Los Angeles, CA, USA 1991.
- NIKONCHUK, M. O.; POLYAKOV, I. V.: *Efficiency of Vaporization Cutting by Copper Vapor Laser*. In R. C. WADE; P. B. ULRICH (Hrsg.), *Intense Laser Beams*, Bd. 1628, S. 336-339. SPIE, Los Angeles, CA, USA 1992.
- OHMURA, E.; FUKUMOTO, I.: *Modified Molecular Dynamics Simulation on Laser Ablation of Metal*. Int. J. JSPE 31(3) (1997) S. 206-207.
- OLSEN, F. O.; HECKERMAN, S.: *High Speed Laser Drilling*. In S. L. REAM (Hrsg.), *Proceedings of the Laser Materials Processing : [November 4-9, 1990, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts, USA]*, LIA ; 71, S. 141 ff. Laser Inst. of America, Orlando, FL 1991. ISBN 0-912035-42-0.
- PFLEGING, W.: *Lasermaterialbearbeitung in der Medizintechnik und Mikrosystemtechnik*. Laser Opto 31 (1999) S. 54 ff.

- RADTKE, J.; FÖHL, C.; JASPER, K.; DAUSINGER, F.: *Helical Drilling of High Quality Micro Holes in Steel and Ceramics with Short and Ultrashort Pulsed Lasers*. In *Proceedings WLT-Conference: Laser in Manufacturing*. 2001.
- RAIBER, A.: *Grundlagen und Prozesstechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 1999.
- RIZVI, N. H.; APTE, P.: *Developments in Laser Micro-Machining Techniques*. *Journal of Materials Processing Technology* 127(2) (2002) S. 206–210.
- SAMANT, A. N.; DAHOTRE, N. B.: *Laser Machining of Structural Ceramics—a Review*. *Journal of the European Ceramic Society* 29(6) (2009) S. 969–993.
- SCHAAF, P.: *Laser Nitriding of Metals*. *Progress in Materials Science* 47(1) (2002) S. 1–161. ISSN 00796425.
- SCHRÖDER, G.: *Technische Optik : Grundlagen und Anwendungen*. Vogel, Würzburg 1990, 7th ed. Auf. ISBN 9783802300677.
- SCHUBART, D.: *Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung*, Bd. 92; Dissertation von *Berichte aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*. Meisenbach, Bamberg 1999.
- SEMEROK, A.; CHALÉARD, C.; DETALLE, V.; LACOUR, J. L.; MAUCHIEN, P.; MEYNADIER, P.; NOUVELON, C.; SALLÉ, B.; PALIANOV, P.; PERDRIX, M.; PETITE, G.: *Experimental Investigations of Laser Ablation Efficiency of Pure Metals with Femto-, Pico- and Nanosecond Pulses*. *Applied Surface Science* 138-139 (1999) S. 311–314. ISSN 0169-4332.
- SEPOLD, G.; STEPHEN, A.; LILIENKAMP, T.; METEV, S.: *Precise Laser-Assisted 3D Microstructuring of Metals and Alloys*. In *Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, S. 429–436. Singapore 2002.
- SHANNON, M. A.: *A Simplified Cavity Analysis for Estimating Energy Coupling During Laser Ablation and Drilling of Solids - Theory*. *Applied Surface Science* 127 (1998) S. 218–225.

- SIEBER, A.: *Dreidimensionales Laserabtragen im Werkzeugbau*. blz, Erlangen 2003.
- STEEN, W. M.: *Laser Material Processing*. Springer, London [etc.] 1998, 2nd ed. Auf. ISBN 9783540761747.
- TÖNSHOFF, H. K.; STÜRMER, M.: „Laserfräsen“- Formabtrag mit Hochleistungslasern. *Laser Magazin* 6 (1991) S. 16 ff.
- TREUSCH, H. G.; HERZIGER, G.; POPRAWA, R.: *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Tl.8. Bohren mit Laserstrahlung*. *Feinwerktechnik und Meßtechnik* 95(6) (1987) S. 381–388. ISSN 03440-1952.
- TUNNA, L.; KEARNS, A.; O'NEILL, W.; SUTCLIFFE, C. J.: *Micromachining of Copper using Nd:YAG Laser Radiation at 1064, 532, and 355 nm Wavelengths*. *Optics and Laser Technology* 33(3) (2001) S. 135–144.
- TURIGIN, I. A.: *Angewandte Optik - Mashinostroenie*. Moskau 1966.
- WELLEGEHAUSEN, B.; CHICHKOV, B. N.: *Erzeugung von leistungsstarker kurzwelliger Subpikosekunden-Laserstrahlung – Ein zukünftiges Werkzeug für die Mikromaterialbearbeitung?* *LaserOpto* 31 (1999) S. 41 ff.
- WU, B.; SHIN, Y. C.: *A Simplified Predictive Model for High-Fluence Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Semiconductors and Dielectrics*. *Applied Surface Science* 255(9) (2009) S. 4996–5002. ISSN 01694332.
- YOUN, S. W.; TAKAHASHI, M.; GOTO, H.; MAEDA, R.: *Fabrication of Micro-Mold for Glass Embossing using Focused Ion Beam, Femto-Second Laser, Eximer Laser and Dicing Techniques*. *Journal of Materials Processing Technology* 187 (2007) S. 326–330.
- ZHANG, Y.; LOWE, R. M.; HARVEY, E.; HANNAFORD, P.; ENDO, A.: *High Aspect-Ratio Micromachining of Polymers with an Ultrafast Laser*. *Applied Surface Science* 186(1-4) (2002) S. 345–351. ISSN 01694332.
- ZHAO, J.; HÜTTNER, B.; MENSCHIG, A.: *Microablation with Ultrashort Laser Pulses*. *Optics & Laser Technology* 33(7) (2001) S. 487–492.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Absorptionskurven verschiedener Metalle . . . . .	20
2.2	Einteilung der stationären Abtragmechanismen . . . . .	24
2.3	Tiefenwirkung der Laserstrahlung . . . . .	24
2.4	Werkstoffeinfluss beim stationären Abtrag . . . . .	25
2.5	Telezentrische Strahlausbreitung . . . . .	29
2.6	Fokussierung und Abbildung im telezentrischen Modell .	30
2.7	Formung eines Photonrohrs . . . . .	32
2.8	Gaußsche Strahlausbreitung . . . . .	33
2.9	Fokussierendes System Gaußscher Strahlung . . . . .	34
5.1	Positionier- und Scannersystem . . . . .	46
5.2	Aufbau des Lineartisches . . . . .	47
5.3	Schematischer Aufbau eines Galvanometerscanners . . .	49
5.4	Schritt- (a), Raster- (b) und Vektor- (c) Scan . . . . .	50
5.5	Sprungzeit . . . . .	50
5.6	Leistung von Scannern . . . . .	51
5.7	Schritt-Scan-Charakteristika . . . . .	51
5.8	Vektor-Scan-Charakteristika . . . . .	52
5.9	Positionsfehler . . . . .	53
5.10	Wirkungsweise von Scannerlinsen . . . . .	53
5.11	CVL-Anlage ATZ-EVUS, Vilseck . . . . .	56
5.12	CVL-Anlage BIAS, Bremen . . . . .	56
5.13	<i>Puls-zu-Puls</i> -Stabilität . . . . .	58
5.14	Konstanz der mittleren Leistung . . . . .	58
5.15	Nd:YAG-Laser BIAS, Bremen . . . . .	59
5.16	Verlauf der mittleren Leistung . . . . .	60
5.17	Verlauf der Pulsbreite . . . . .	61

5.18	Pulsleistungscharakteristik . . . . .	62
5.19	Pulsenergiecharakteristik . . . . .	62
5.20	Optische Leistungssteuerung . . . . .	63
5.21	Auswertung des Fokusmonitors . . . . .	64
5.22	Schema des optischen Aufbaus . . . . .	65
5.23	Einfluss der Abtastnadel . . . . .	68
5.24	Taktils Messsystem . . . . .	69
5.25	Optisches Messsystem . . . . .	69
5.26	Schema der Prozessoptimierung . . . . .	72
5.27	Einfluss der Intensitätsverteilung . . . . .	74
5.28	Definition der Bearbeitungszone . . . . .	75
5.29	Cross-Jet-Düse . . . . .	76
5.30	Wirkung des Cross-Jets . . . . .	76
5.31	Einlochdüse . . . . .	77
5.32	Dreilochdüse . . . . .	77
5.33	Prinzip des Wendelabtrags . . . . .	78
6.1	Einfluss: Ausleuchtung Fokussierlinse beim Bohren . . .	83
6.2	Einfluss: Teleskoplinsenabstand auf Divergenz . . . . .	83
6.3	Einfluss: Teleskoplinsenabstand auf Strahltaille . . . . .	84
6.4	Einfluss: Teleskoplinsenabstand auf Rayleighlänge . . . . .	85
6.5	Einfluss: Linsenausleuchtung auf Strahltaille . . . . .	85
6.6	Einfluss: Abstand Strahlquelle-Fokussierlinse auf Strahl- taille . . . . .	86
6.7	Einfluss: Abstand Strahlquelle-Fokussierlinse auf Ray- leighlänge . . . . .	87
6.8	Vergleich zwischen Modell und Experiment . . . . .	88
6.9	Sphärische Aberrationen im Experiment . . . . .	89
6.10	Aufbau des optischen Systems . . . . .	90
6.11	Abhängigkeit der Strahltaille vom Abstand der Teleskop- linsen . . . . .	92
6.12	Abhängigkeit der Rayleighlänge vom Abstand der Tele- skoplinsen . . . . .	93
6.13	Abhängigkeit der Strahltaille vom Abstand Fokussierlinse- Strahlquelle . . . . .	94
6.14	Abhängigkeit der Rayleighlänge vom Abstand Fokussierlinse- Strahlquelle . . . . .	94
6.15	Bohrung in Stahl . . . . .	95
6.16	Vergleich fokussierter Strahlausbreitung . . . . .	96



6.17	Photonenrohr bei Gaußscher Strahlausbreitung . . . . .	97
6.18	Position der Strahlteile . . . . .	98
6.19	Einfluss auf den Austrittsdurchmesser in Aluminium . .	100
6.20	Beeinflussung des Austrittsdurchmessers in Titan . . . .	100
6.21	Einfluss der Fokusslage in Einsatzstahl . . . . .	102
6.22	Beeinflussung der Bohrkanalgeometrie in Titan . . . . .	103
6.23	Bohrkanal in Titan . . . . .	104
6.24	Strahlprofilvergleich . . . . .	105
6.25	Intensitätsquerschnitte . . . . .	105
6.26	Iso-Intensitätslinien . . . . .	105
6.27	Bohrlochbildung . . . . .	107
6.28	Düsenbohrung in Stahl . . . . .	107
6.29	2 µm Bohrung in Stahlfolie . . . . .	108
6.30	Variation der Grenzintensität mit der Pulsleistung . . .	109
6.31	Einfluss auf die Bearbeitungszone in Kupfer . . . . .	110
6.32	Linienabtrag mit niedriger Pulsleistung . . . . .	112
6.33	Linienabtrag mit hoher Pulsleistung . . . . .	112
6.34	Abtragprofil bei niedriger Pulsleistung . . . . .	114
6.35	Abtragprofil bei hoher Pulsleistung . . . . .	114
6.36	Bearbeitungszone des Abtrags aus Bild 6.33 . . . . .	115
6.37	Breite und Tiefe von Linienstrukturen in Aluminium . .	116
6.38	Arbeitsabstand $z_f = 125 \mu\text{m}$ . . . . .	117
6.39	Arbeitsabstand $z_f = 50 \mu\text{m}$ . . . . .	117
6.40	Abtragen und Wendelbohren einer W-beschichteten Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Keramik . . . . .	119
6.41	Wendelabtrag in Kupfer . . . . .	120
6.42	Detail aus Bild 6.41 . . . . .	120
6.43	Einfluss des Arbeitsabstands auf die Rauheit . . . . .	123
6.44	Einfluss der korrelierten Leistungsdichte auf die Oberflä- chenqualität . . . . .	123
6.45	Bearbeitungsbeispiele – Linienstrukturen . . . . .	124
6.46	Einfluss auf die Abtragraten beim flächigen Abtragen . .	127
6.47	Einfluss auf die Rauheit beim flächigen Abtragen . . . .	129
7.1	Bohrzeitenvergleich . . . . .	132
7.2	Reduzierung der Durchmesserschwankungsbreite . . . .	132
7.3	Rundheitsabweichung . . . . .	133
7.4	Verringerung der Bohrzeit . . . . .	135
7.5	Beeinflussung des Austrittsdurchmessers . . . . .	135

7.6	Relative Rundheitsabweichung . . . . .	136
7.7	Bohrdauer mit Querstromdüse . . . . .	140
7.8	Grathöhe mit Querstromdüse . . . . .	140
7.9	Austrittsdurchmesser mit Querstromdüse . . . . .	140
7.10	Bohrdauer bei Dreiloch-Gaszuführung . . . . .	142
7.11	Grathöhe bei Dreiloch-Gaszuführung . . . . .	142
7.12	Austrittsdurchmesser bei Dreiloch-Gaszuführung . . . . .	142
7.13	Bohrdauer bei konfokaler Gaszuführung . . . . .	143
7.14	Grathöhe bei konfokaler Gaszuführung . . . . .	143
7.15	Austrittsdurchmesser bei konfokaler Gaszuführung . . . . .	143
7.16	Bleibende Durchbohrung . . . . .	144
7.17	Bohrungsverschluss . . . . .	144
7.18	Einfluss der applizierten Laserpulse auf den Bohrungsdurchmesser . . . . .	145
7.19	Fortschritt bei der Herstellung von Multilochblechen . . . . .	148
7.20	Mäander, Spirale, Kreuzschraffur . . . . .	149
7.21	Vorversuche zur Modellierung . . . . .	151
7.22	Pulse erste Ebene . . . . .	152
7.23	Pulse zweite Ebene . . . . .	152
7.24	Pulse dritte Ebene . . . . .	152
7.25	Pulse vierte Ebene . . . . .	152
7.26	Pulse fünfte Ebene . . . . .	152
7.27	Vergleich der Feldgröße Ebenen 1 und 4 . . . . .	152
7.28	Feste Kreuzschraffur . . . . .	156
7.29	Variable Kreuzschraffur . . . . .	156
7.30	Überdeckung bei variabler Kreuzschraffur . . . . .	157
7.31	Variable Kreuzschraffur für Kreisflächen . . . . .	158
7.32	Bit-Mapping in Kupfer . . . . .	159
7.33	Bit-Mapping in Nickel . . . . .	159
7.34	Schruppen und Schichten mit variabler Schraffur . . . . .	161
7.35	Schruppen von Kupfer . . . . .	162
7.36	Schichten von Kupfer . . . . .	162
7.37	gepulste Strahlung: Schichten von Stahl . . . . .	164
7.38	cw Strahlung: Umschmelzen von Stahl . . . . .	164
7.39	Laserumschmelzen . . . . .	164
7.40	Prozessführung beim Laserglätten . . . . .	166
7.41	Einfluss von Schutzgasen . . . . .	166
7.42	Vergleich von Rauheitsprofilen . . . . .	168
7.43	Relative Reflektion . . . . .	168

---

7.44	optisches Ätzen – REM . . . . .	170
7.45	Chemische Ätzung – Lichtmikroskop . . . . .	170
7.46	Prozessoptimierung . . . . .	171
8.1	Multilochblech aus Aluminium . . . . .	178
8.2	Strukturiertes Pleuel aus C70 . . . . .	178
8.3	Modenblenden aus $\text{Al}_2\text{O}_3$ . . . . .	179
8.4	Sensoraufnahme . . . . .	181



# Tabellenverzeichnis

2.1	<i>ABCD</i> -Matrizen optischer Elemente . . . . .	34
4.1	Prozesse der Laserendbearbeitung . . . . .	41
5.1	Ausstattung und Eigenschaften des Scanners . . . . .	55
5.2	Eigenschaften der verwendeten Strahlquellen . . . . .	57
5.3	Physikalische Eigenschaften der technisch reinen Metalle	71
6.1	Qualitatives Zusammenwirken der Bearbeitungsparameter zur Einflussnahme auf Abtrage- und Rauheit beim flächigen Abtragen . . . . .	130
B.1	<i>ABCD</i> -Matrizen optischer Elemente . . . . .	209
B.2	Abhängigkeit der Kaustik vom Abstand Strahlquelle – Fokussierlinse . . . . .	217
B.3	Strahlparameter bei variiertem Abstand der Teleskoplinsen und festem Abstand Fokussierlinse-Strahlquelle . . .	218
B.4	Strahlparameter bei variiertem Abstand Strahlquelle-Fokussierlinse und festem Abstand der Teleskoplinsen .	219
B.5	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	220
B.6	Experimentelle Ergebnisse – Fortsetzung . . . . .	221



## Anhang B

# Berechnungen und Daten





# Lösung der *ABCD*-Matrix

Zur Beschreibung eines Gaußschen Strahls in einem optischen System werden *ABCD*-Matrizen verwendet. Dabei wirkt auch ein Luftspalt als Komponente, wie Tabelle B.1 zeigt.

**Tabelle B.1:** *ABCD*-Matrizen optischer Elemente

Optisches Element	<i>ABCD</i> -Matrix
Strahlausbreitung durch ein Medium mit dem Brechungsindex $n$ und der Länge $Z$	$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & n \end{bmatrix}$
Strahlausbreitung durch eine dünne Linse mit der Brennweite $f$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$

Damit ergeben sich für das in Abschnitt 6.1.3 angegebene optische System die dort aufgezeigten Systemmatrizen. Zur Berechnung des Matrixproduktes (Gleichungen 6.1 und 6.2) ist nun schrittweise vorzugehen:

$$M_2 \cdot M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix}$$

$$M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1) = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{L}{f_1} & L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix}$$

$$M_4 \cdot (M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1)) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \frac{L}{f_1} & L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{L}{f_1} & L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) & -\frac{1}{f_2} \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) + 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & M_5 \cdot (M_4 \cdot (M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1))) = \\
 & \begin{bmatrix} 1 & g \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \frac{L}{f_1} & L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) & -\frac{1}{f_2} \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) + 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) \cdot g + 1 - \frac{L}{f_1} & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) + g \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) & -\frac{1}{f_2} \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) + 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & M_6 \cdot (M_5 \cdot (M_4 \cdot (M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1)))) = \\
 & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) \cdot g + 1 - \frac{L}{f_1} & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) + g \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) & -\frac{1}{f_2} \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) + 1 - \frac{Z}{f_1} \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) \cdot g + 1 - \frac{L}{f_1} & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) + g \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) & -\frac{1}{f_2} \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) + 1 - \frac{Z}{f_1} \\ \left(1 - \frac{g}{f_3}\right) - \frac{1}{f_3} \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(-\frac{1}{f_3} \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) - \frac{1}{f_2}\right) + \left(1 - \frac{g}{f_3}\right) \cdot \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & M_7 \cdot (M_6 \cdot (M_5 \cdot (M_4 \cdot (M_3 \cdot (M_2 \cdot (M_1)))))) = \\
 & \begin{bmatrix} 1 & f_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) \cdot g + 1 - \frac{L}{f_1} & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) + g \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) \cdot \left(1 - \frac{g}{f_3}\right) - \frac{1}{f_3} \left(1 - \frac{L}{f_1}\right) & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(-\frac{1}{f_3} \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) - \frac{1}{f_2}\right) + \left(1 - \frac{g}{f_3}\right) \cdot \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -f_3 \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) & -\frac{f_3}{f_2} \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) + f_3 \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}\right) \cdot \left(1 - \frac{g}{f_3}\right) + \frac{1}{f_3} \left(\frac{L}{f_1} - 1\right) & \left(L + Z \left(1 - \frac{L}{f_1}\right)\right) \cdot \left(-\frac{1}{f_3} \left(1 - \frac{g}{f_2}\right) - \frac{1}{f_2}\right) + \left(1 - \frac{g}{f_3}\right) \cdot \left(1 - \frac{Z}{f_1}\right) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Damit ergibt sich

$$\begin{aligned}
 M_{System} &= \\
 &= M_7 \cdot (M_6 \cdot (M_5 \cdot (M_4 \cdot (M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1)))))) = \\
 &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

mit

$$\begin{cases}
 A = -f_3 \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \\
 B = -f_3 \left[ \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \cdot Z + \frac{L}{f_2} - 1 \right] \\
 C = - \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{g}{f_3} \right) + \frac{1}{f_3} \left( \frac{L}{f_1} - 1 \right) \\
 D = Z \left[ - \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{g}{f_3} \right) + \right. \\
 \left. + \frac{1}{f_3} \left( \frac{L}{f_1} - 1 \right) \right] - \left( 1 - \frac{g}{f_3} \right) \cdot \left( \frac{L}{f_2} - 1 \right) - \frac{L}{f_3}
 \end{cases}$$

die vollständige Beschreibung der  $ABCD$ -Matrix. – Die hier entwickelten Lösungen  $A$  bis  $D$  entsprechen den Gleichungen 6.3 bis 6.6.

Zur einfacheren Darstellung der Parameter, Rayleighlänge  $Z_R$ , Strahlweite  $\omega$ , Krümmungsradius der Wellenfront  $R$  und der Wellenlänge  $\lambda$ , wird eine komplexe Größe  $q$  als Funktion dieser Parameter definiert

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - j \frac{1}{Z_R} \tag{B.1}$$

und

$$q(Z) = Z + jZ_R \tag{B.2}$$

mit  $Z$ : Abstand in Richtung der Strahlausbreitung

Dann kann aus der bekannten  $ABCD$ -Matrix der Parameter  $q_2$  am Ausgang des optischen Systems abgeleitet werden

$$q_2 = \frac{A \cdot q_1 + B}{C \cdot q_1 + D} \tag{B.3}$$

wobei  $q_1$  der komplexe Parameter am Eintritt des optischen Systems ist.

Durch Umschreiben von  $q_1$  mit  $Z_R$ ,  $\omega$ ,  $R$  und  $\lambda$  ergibt sich

$$q_2 = \frac{\left( (B - Z_{\omega_1} \cdot A) \cdot (D - Z_{\omega_1} \cdot C) + A \cdot C \cdot (Z_{R_1})^2 \right)}{(D - Z_{\omega_1} \cdot C)^2 + (Z_{R_1} \cdot C)^2} + \quad (\text{B.4})$$

$$+ i \cdot \frac{(A \cdot (D - Z_{\omega_1} \cdot C) - C \cdot (B - Z_{\omega_1} \cdot A)) \cdot Z_{R_1}}{(D - Z_{\omega_1} \cdot C)^2 + (Z_{R_1} \cdot C)^2}$$

Per definitionem folgt daraus schließlich

$$Z_{\omega_2} = \text{Re}(q_2) = \frac{(B - Z_{\omega_1} \cdot A) \cdot (D - Z_{\omega_1} \cdot C) + A \cdot C \cdot (Z_{R_1})^2}{(D - Z_{\omega_1} \cdot C)^2 + (Z_{R_1} \cdot C)^2} \quad (\text{B.5})$$

$$Z_{R_2} = \text{Im}(q_2) = \frac{Z_{R_1}}{(D - Z_{\omega_1} \cdot C)^2 + (Z_{R_1} \cdot C)^2} \quad (\text{B.6})$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} Z_{R_2}} \quad (\text{B.7})$$

mit  $Z_{\omega_2}$ : transformierte Position der Strahltaile,  $Z_{R_2}$ : transformierte Rayleighlänge und  $\omega_2$ : transformierte Weite der Strahltaile

# Mittelwertberechnung

Die Spalte mit der Bezeichnung „Mittelwert“ in Tabelle B.6 gibt den Mittelwert  $\langle X \rangle$  wieder

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N X_i \quad (\text{B.8})$$

mit  $X_i$ : Wert der gemessenen Größe und  $i = 1 - N$ : Anzahl der Messungen

Der Toleranzbereich des Mittelwertes ist durch die Standardabweichung  $\sigma$  gegeben

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (X_i - \langle X \rangle)^2}{N - 1}} \quad (\text{B.9})$$

mit  $X_i$ : Wert des gemessenen Parameters,  $\langle X \rangle$ : sein Mittelwert und  $i = 1 - N$ : Anzahl der Messungen

# Ergebnistabellen



**Tabelle B.2:** Abhängigkeit der Kaustik vom Abstand Strahlquelle – Fokussierlinse

Abstand Strahlquelle - Fokussierlinse $g$ in m	Mittelwert der Strahltaile $\omega_0$ in $\mu\text{m}$	Standard- abweichung der Strahltaile $\sigma_\omega$ in $\mu\text{m}$	Mittelwert der Rayleighlänge $Z_R$ in mm	Standard- abweichung der Rayleighlänge $\sigma_{Z_R}$ in mm
1,2	91,3	1,14	18,48	0,07
1,3	86,0	1,0	17,58	1,16
1,4	82,0	2,0	15,65	0,07
1,5	80,6	1,53	15,40	0,02
1,6	74,6	2,5	13,23	0,02
1,7	70,6	1,5	12,32	0,03
1,8	69,0	1,0	11,83	0,03
1,9	67,6	0,6	11,74	0,02
2,0	65,3	0,6	10,15	0,04
2,1	61,0	1,0	8,74	0,03
2,2	56,3	1,1	7,93	0,03
2,3	57,6	0,6	8,01	0,07

**Tabelle B.3:** Experimentelle und berechnete Werte der Strahlparameter bei variiertem Abstand der Teleskoplinse und festem Abstand Fokussierlinse-Strahlquelle (2,3 m)

Abstand der Teleskop- linsen $L$ in mm	Teleskop- trisches Modell		Radius der Strahltaile		Gauß- sches Modell		Rayleighlänge	
	$\omega_{0TM}$ in $\mu\text{m}$	$\omega_{0G}$ in $\mu\text{m}$	Gauß- sches Modell	WinLens in $\mu\text{m}$	Mittelwert Experiment	$Z_{RG}$ in mm	WinLens in mm	Mittelwert Experiment
	$\omega_0$ in $\mu\text{m}$	$\omega_{0WL}$ in $\mu\text{m}$	$\omega_0$ in $\mu\text{m}$	$\omega_0$ in $\mu\text{m}$	$\omega_0$ in $\mu\text{m}$	$Z_{RWL}$ in mm	$Z_R$ in mm	
-	19	30,59	30	35	2,77	2,99	2,23	
-	17,1	30,59	30	35	2,77	2,99	2,23	
150	660,25	26,62	10	42,3	2,10	0,2	0,78	
152	574,75	28,04	10	40	2,33	0,22	0,8	
154	473,1	29,63	10	34,7	2,60	0,27	0,76	
156	388,55	31,42	10	32,3	2,92	0,35	0,78	
158	338,2	33,42	15	28	3,31	0,45	0,72	
160	290,7	35,70	15	27	3,77	0,61	0,81	
162	202,35	38,31	20	27,3	4,35	0,87	1,05	
164	151,05	41,30	20	28,3	5,05	1,33	1,37	
166	82,65	44,70	30	35,7	5,92	2,2	2,44	
168	4,75	47,15	40	50,7	6,58	3,98	5,79	
170	7,6	47,76	50	56	6,75	7,38	7,7	

**Tabelle B.4:** Experimentelle und berechnete Werte der Strahlparameter bei variiertem Abstand Strahlquelle-Fokussierlinse und festem Abstand der Teleskoplinsen (170 mm)

Abstand Strahlquelle – Fokussierlinse $g$ in m	Radius der Strahltaille		Rayleighlänge	
	Gausches Modell $\omega_{0G}$ in $\mu\text{m}$	WinLens Experiment $\omega_0$ in $\mu\text{m}$	Gausches Modell $Z_{RG}$ in mm	WinLens Experiment $Z_R$ in mm
1,2	80,27	90	19,09	23,45
1,3	76,42	85	17,30	20,82
1,4	72,82	80	15,70	18,54
1,5	69,46	75	14,29	16,56
1,6	66,33	70	13,03	14,85
1,7	63,43	65	11,91	13,36
1,8	60,73	65	10,92	12,06
1,9	58,22	60	10,04	10,93
2,0	55,88	60	9,25	9,95
2,1	53,70	55	8,54	9,08
2,2	51,67	55	7,90	8,31
2,3	49,77	50	7,33	7,63

Tabelle B.5: Experimentelle Ergebnisse

Abstand zwischen den Teles- kop- linsen $L$ in mm	Divergenz $\alpha = \frac{D - d_{ap}}{g}$ mrad	Radius der Strahltaile		Rayleighlänge		$M^2$	
		Mittel- wert $\omega_0$ in $\mu\text{m}$	Stan- dard- abwei- chung $\sigma_{\omega_0}$ in $\mu\text{m}$	Mittel- wert $Z_R$ in mm	Stan- dard- abwei- chung $\sigma_{Z_R}$ in mm	Mittel- wert $M^2$	Stan- dard- abwei- chung $\sigma_{M^2}$
-	0,20	35,0	-	2,23	-	1,69	-
-	0,18	35,0	-	2,23	-	1,42	-
150	6,95	42,3	0,6	0,78	0,01	6,66	0
152	6,05	40,0	1,0	0,8	0,03	5,89	0,12
154	4,98	34,7	0,6	0,76	0,04	4,71	0,14
156	4,09	32,3	0,6	0,78	0,03	3,95	0,03
158	3,56	28,0	1,0	0,72	0,02	3,18	0,09
160	3,06	27,0	2,6	0,81	0,08	2,63	0,27
162	2,13	27,3	0,6	1,05	0,03	2,18	0,03
164	1,59	28,3	0,6	1,37	0,03	1,76	0,02
166	0,87	35,7	0,6	2,44	0,08	1,52	0,03
168	0,05	50,7	2,1	5,79	0,35	1,33	0,10
170	0,08	56,0	0	7,7	0,12	1,21	0,04

**Tabelle B.6:** Experimentelle Ergebnisse – Fortsetzung

Abstand zwischen Teles- kop- linsen $L$ in mm	Divergenz $\alpha = \frac{D - d_{ap}}{g}$ mrad	Strahlradius auf der Fokussierlinse		Strahl- para- meter- produkt $b$ in mm mrad	Strahl- taillen- posi- tion $Z_{pos}$ in mm
		Mittel- wert $D/2$ in mm	Stan- dard- abwei- chung $\sigma_{D/2}$ in mm		
-	0,20	3,5	-	0,6	20,116
-	0,18	3,45	-	0,5	19,895
150	6,95	10,14	0,02	1,8	10,714
152	6,05	9,62	0,29	1,7	10,885
154	4,98	8,65	0,35	1,3	10,926
156	4,09	7,84	0,13	1,1	11,174
158	3,56	7,34	0,03	0,9	11,404
160	3,06	6,27	0,04	0,8	11,825
162	2,13	5,06	0,06	0,7	12,298
164	1,59	3,96	0,02	0,5	12,392
166	0,87	2,76	0,06	0,5	12,96
168	0,05	1,68	0,08	0,4	8,913
170	0,08	1,38	0,03	0,4	10,912



# Thesen

1. Die Lasereindbearbeitung metallischer Werkstoffe unterzieht die bisher getrennt untersuchten Einzelprozesse der abtragenden Mikromaterialbearbeitung mit Laserpulsen von ns-Dauer einer ganzheitlichen Betrachtung. Damit können prozessübergreifende Bearbeitungsparameter ermittelt sowie die Vorstellung der beim Abtragen ablaufenden Vorgänge erweitert werden. Dies zusammen mit der Beachtung der Strahlausbreitung einschließlich der Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt führt zu einer geschlossenen Modellbildung für die Entwicklung einer optimierten Bearbeitungsstrategie unter Verkürzung der Prozesskette bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität der bearbeiteten Oberflächen.
2. Untersuchungen der experimentellen Strahleigenschaften zeigen, dass das telezentrische Modell der technischen Optik nicht zur Beschreibung der beobachteten Ergebnisse genügt.
3. Vielmehr ist für die verwendeten Strahlquellen die Gaußsche Strahlausbreitung zur Erklärung der Bearbeitungsergebnisse heranzuziehen.
4. Jedoch wird der Nachweis erbracht, dass die vom telezentrischen Modell vorhergesagten Strahlformungen auch für Gaußsche Strahlung berechnet werden können, wenn ihre spezifischen Eigenschaften einbezogen werden.
5. Unter Berücksichtigung bereits vorliegender Erkenntnisse bestätigen weitergehende Untersuchungen zum Perkussionsbohren die von den Mechanismen des stationären Abtrags her bekannten

Einflussgrößen auf den überwiegend durch Schmelzeaustrieb bestimmten abtragenden Prozess. Für den Austrittsdurchmesser bei fester Materialdicke ergibt sich eine exponentielle Abhängigkeit von der Pulsleistung.

6. Allerdings können weder die Mechanismen des stationären Abtrags noch allein die Strahlausbreitung die Geometrie der Bohrungen erklären, die sich aufgrund des Einflusses der Fokuslage ergeben.
7. Hierfür sind in die Betrachtungen die Iso-Intensitätslinien – das sind Linien gleicher Intensität, insbesondere der Intensität, die gerade oberhalb der Abtragschwelle liegt, nämlich die Grenzintensität – einzubeziehen. Die Grenzintensität berücksichtigt zugleich die Strahlausbreitung und die Wechselwirkung der Strahlung mit dem Werkstoff. Sie ist bei gegebenem Werkstoff durch dessen Abtragschwelle, der Intensitätsverteilung und dem Betrag der Intensität bestimmt.
8. Für eine anschauliche Darstellung stark vereinfacht, entspricht der Verlauf der Grenzintensität bei Einsatz einer Gauß-förmigen Strahlung in der Ebenenprojektion zwei entlang der Strahlachse gestreckten Rauten, die sich auf der Strahlachse überlagern. Ihre gedachte Schnittlinie quer zur Strahlausbreitung bildet die Strahltaile. Bei genügend hoher Leistung deuten ihre kurzen Achsen oberhalb und unterhalb der Strahltaile zwei Maxima der Ausdehnung der Grenzintensität an, die bei steigender Leistung zunehmen und sich weiter voneinander entfernen. Es kommt zu einer Kontraktion der Grenzintensität im Bereich der Strahltaile. Bei niedriger Leistung fallen die beiden quer zur Strahlausbreitung liegenden Achsen in der Strahltaile zusammen. Es existiert dann nur noch eine „Raute“.
9. Die Grenzintensität liefert somit eine Erklärung für die beobachteten Ergebnisse bei unterschiedlichen Fokuslagen bzw. bei einem während des Perkussionsbohrens mit dem Vortrieb bewegten Fokus.
10. Ebenso erklärt sie die Beobachtung, dass beim Perkussionsbohren von Titan mit niedriger Pulsleistung die Bohrungen einen größeren Austrittsdurchmesser als in Aluminium aufweisen, bei hoher Pulsleistung jedoch den kleineren.



11. Sie veranschaulicht auch die Bildung von Bohrungsdurchmessern, kleiner als der Strahlquerschnitt, bei der Bearbeitung dünner Folien. Das Werkstück liegt dann so im Strahlengang, dass nur die Spitze der Raute – bei kleiner Pulsleistung – das Bauteil durchdringt.
12. Zusätzliche Optimierungsansätze wie das Absaugen der Ablationsprodukte durch eine Querstromdüse führen zu ähnlichen Ergebnissen, wie sie auch bei einer Bearbeitung im Vakuum beobachtet werden. Es entstehen kaminartige Grate ohne eine Verbesserung der Bohrungsqualität zu erzielen. Die entgegen der einfallenden Laserstrahlung gerichtete Absaugung bewirkt sogar eine Erhöhung der Bearbeitungsdauer durch vermehrte Streuung am abgesaugten Material.
13. Auch das gerichtete Einblasen von Prozessgas in die entstehende Bohrung ist beim Einsatz von ns-Laserpulsen nicht zur Optimierung des Bearbeitungsprozesses geeignet. Vielmehr vermag die kurzzeitig entstehende Schmelze eine bereits gebildete Öffnung wieder zu verschließen. Aufgrund der konischen Bohrgeometrie zwingt der Ablationsdruck die Schmelze in Richtung einfallender Laserstrahlung, jedoch drängt sie der Prozessgasstrom in die Bohrung zurück.
14. Weiterführende Betrachtungen der Iso-Intensitätslinien gestatten nicht nur eine Erklärung der beobachteten geometrischen Phänomene beim stationären Abtrag, sie erlauben auch die Entwicklung einer Modellvorstellung für den dynamischen Fall, d. h. wenn aufeinanderfolgende Laserpulse nicht mehr ortsfest sondern lateral versetzt mit einem Überlapp auf das Werkstück einwirken.
15. Hierzu ist es jedoch erforderlich, den Überlapp nicht mehr auf den gemessenen Strahlquerschnitt, sondern auf den Bereich unmittelbarer Wechselwirkung zwischen einfallender Laserstrahlung und Werkstoff zu beziehen, die Bearbeitungszone. Für sie kann ein linearer Einfluss sowohl durch die Pulsleistung wie auch durch die Fokuslage ermittelt werden, die – zusammengefasst – in einer Ebenengleichung darstellbar sind.
16. Damit ist auch die für den Abtragmechanismus bestimmende Leistungsdichte als korrelierte Leistungsdichte, d. h. als Quotient

der eingesetzten Pulsleistung und des Durchmessers der Bearbeitungszone, neu zu definieren. Ihr Einfluss entspricht dem der traditionellen Leistungsdichte, jedoch berücksichtigt sie zugleich die Strahl-Stoff-Wechselwirkung.

17. Unter Einbeziehung der Iso-Intensitätslinien gelingt eine Optimierung des Abtragprozesses beim Wendelbohren – das ist das sukzessive Ausschneiden einer Geometrie durch mehrfaches Abfahren der gewünschten Kontur – durch Positionierung der Strahltaille in der Blechmitte des zu bearbeitenden Werkstückes, ohne dabei die Zusammenhänge der Verfahrensparameter mit dem Prozess zu kennen.
18. Beim Wendelabtrag führen die besonderen Strömungsverhältnisse aufgrund des gebildeten Schnittpalts nicht nur zu einem Schmelzeaustritt durch den Ablationsdruck in Richtung des einfallenden Laserstrahls wie beim Perkussionsbohren, sondern auch zu einer Schmelzeverdrängung in den Schnittpalt hinein. Dadurch kommt es zur Ausbildung von Schmelzebrücken zwischen den zu trennenden Werkstückbereichen.
19. Die Schmelzebrücken verhindern eine nähere numerische Beschreibung dieser Form des Abtrags, da außer den energetischen Parametern des Lasers sowie den thermo-physikalischen Eigenschaften des festen Werkstoffs zumindest auch die unbekannte Temperatur der überhitzten Schmelze sowie ihre Viskosität als Einflussgrößen hinzutreten.
20. Die Ergebnisse erweiterter Untersuchungen zum flächigen Abtragen, die mittels statistischer Versuchsplanung erarbeitet wurden, zeigen neben den bekannten Einflussgrößen des stationären Abtrags, Pulsleistung und Pulsenergie, auf die Abtragraten auch eine Beeinflussung der Rauheit der bearbeiteten Oberfläche. Maßgeblich für die Abtragraten ist jedoch der Überlapp senkrecht zur Vorschubrichtung, während der Überlapp in Vorschubrichtung überwiegend die Rauheit bestimmt.
21. Allerdings werden zwischen verschiedenen Bearbeitungsparametern wechselseitige Beeinflussungen ermittelt, die auch hier eine numerische Beschreibung erschweren. Als wesentliches Ergebnis

stellt sich eine stets hohe Rauheit bei hoher Abtrage rate dar. Eine geringe Rauheit ist nur bei reduzierter Abtrage rate zu erzielen.

22. Die grundlegenden Mechanismen des stationären Abtrags gelten jedoch auch im dynamischen Fall. Der für einen effizienten Abtrag benötigte Versatz zwischen zwei Laserpulsen sowie die Pulsdauer im ns-Bereich bewirken, dass die Wechselwirkung von zwei aufeinanderfolgenden Pulsen im Werkstoff nicht kumuliert. Jeder Laserpuls stellt also ein Einzelereignis dar. Das flächige Abtragen entspricht damit der aus der Literatur stammenden Annahme eines Abtrags von der freien Oberfläche.
23. Damit folgt für die Pulsfolgefrequenz, dass sie keinen Einfluss auf den Abtragmechanismus haben kann. Sie steuert nur die während des Bearbeitungsprozesses eingesetzte Energiemenge, die die Gesamtmasse des abgetragenen Materials bestimmt. Für den Volumenabtrag je Puls wird eine lineare Abhängigkeit von der Pulsenergie ermittelt.
24. Da die Mechanismen des stationären Abtrags auch auf den dynamischen Fall anzuwenden sind, kann eine Simulation für den flächigen Abtrag durch Pulsüberlagerung erstellt werden, welche die Modellvorstellung der Grenzintensität der Iso-Intensitätslinien berücksichtigt.
25. Die Visualisierung der zu erwartenden Abtragergebnisse erlaubt Vorhersagen zur Geometrie der durch schichtweises Abtragen erzeugten Strukturen auch nach mehreren Bearbeitungsebenen. Es zeigen sich Spitzen am Boden sowie Kerben am Rand, und die freigelegten Flächen werden mit zunehmender Tiefe kleiner. Abtragergebnisse bestätigen die Resultate der Simulation und ermöglichen so die Anpassung der Prozessführung.
26. Daraus entwickelt sich die Aufteilung der Bearbeitung in Schruppen und Schlichten, wobei zunächst mit hoher Pulsenergie bei hohen Abtrage rates und großer Rauheit endkonturnah vorgebearbeitet wird, um in den folgenden Schritten die gewünschte Geometrie mit angepasster Rauheit durch Einsatz jeweils verminderter Pulsenergie herauszuarbeiten.

27. Die Analyse der auf diese Weise optimierten Oberflächen offenbart einen erstarrten Schmelzefilm, der weiteres Potenzial zur Rauheitsminderung aufdeckt. Durch gezielte Erzeugung einer Schmelze kann die Rauheit zusätzlich reduziert werden.
28. Der mehrfache Wechsel zwischen Schichten und Glätten, also dem Abtragen bei geringen Pulsenergien und dem Umschmelzen einer dünnen Oberflächenschicht durch kontinuierliche Laserstrahlung, gestattet schließlich geringste Rauheiten von  $Ra = 0,07 \mu\text{m}$  auf Werkzeugstahl mit einer matt erscheinenden Oberfläche durch einen Schlichtschritt als letztem Bearbeitungsgang. Durch Umschmelzen als finalem Arbeitsschritt können hingegen glänzende Oberflächen auch bei höherer Rauheit geschaffen werden. Hierfür sind Mikrorauhigkeiten nach der Rauheit reduzierenden, abtragenden Bearbeitung bzw. das Fehlen dieser Mikrorauhigkeiten verantwortlich.
29. Mit höherer mittlerer Leistung kann die Prozesszeit beim Umschmelzen deutlich verkürzt werden, wie Berechnungen des Temperaturgradienten zeigen.
30. Die Laserendbearbeitung stellt sich somit als ein kombinierter Prozess aus Schruppen und Schlichten mit Laserpulsen von ns-Dauer und dem Einsatz kontinuierlicher Strahlung zur Einstellung der gewünschten Oberflächenqualität dar.

# Danksagung

Dem Erstberichterstatter dieser Arbeit, Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Schaaf, danke ich herzlichst für die Übernahme dieser Aufgabe. Er hat damit die Fertigstellung dieser Dissertation erst ermöglicht. Sein Engagement und seine Kritik trugen in großem Maße zur Entstehung der Arbeit bei.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edda Rädlein danke ich für die kurzfristige Übernahme der Zweitberichterstattung.

Mein besonderer Dank gilt jedoch Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Emmel. Einerseits für die Übernahme des externen Gutachtens, andererseits für seine Beharrlichkeit, die mir ein stetiger Antrieb war.

Ich danke auch der Fakultät EI der TU Ilmenau für die Gelegenheit zur externen Promotion.

Der Leitung des BIAS danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung zahlreicher experimenteller Untersuchungen, die wesentlichen Anteil am Kern dieser Arbeit gefunden haben. Den ehemaligen Mitarbeitern am BIAS, insbesondere der Abteilung lasergestützte Mikromaterialbearbeitung, danke ich für die gute Zusammenarbeit und die herzliche Aufnahme in nördlichen Gefilden. Ihre Hilfsbereitschaft verkürzte so manchen Arbeitstag. Namentlich hervorzuheben sind Heike Weers und Thorsten Lilienkamp, für den einen oder anderen entspannenden Gedankenaustausch, Dmitry Badyukov, für seine Begeisterung an Gaußscher Strahlung, Andreas Klett und Jens Fojuth für die tatkräftige Unterstützung beim Auf-, Um- und Abbau gesamter Laseranlagen.

Den ehemaligen Kollegen am ATZ, insbesondere Dipl.-Phys. Martin Hartmann, Dipl.-Phys. Tomas Sluneco sowie Dipl.-Phys. (heute: Prof.) Robert Queitsch danke ich für unzählige Ferndiagnosen, zahlreiche Instandsetzungsarbeiten an diversen KupferdampfLasern und sonstiger Ausrüstung sowie für vielfältige Hilfestellung, wenn wieder einmal gar nichts mehr ging.

Nicht zuletzt danke ich den Lasermaterialbearbeitern der Fachhochschule Amberg-Weiden für ihre Unterstützung bei experimentellen Aufgaben, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Kemmel für die Beschleunigung der praktischen Arbeiten durch hervorragende Einweisung der Studierenden sowie für die exzellente Kameraführung am Mikroskop und bei Makroaufnahmen und Herrn Stefan Jelinski für die Wartung und die Instandhaltung der Gerätschaften – nicht nur der Kaffeemaschine.

Ein besonderer Dank ergeht auch an Frau Manuela Wirkner, die ihr persönliches Glück hinter die germanistische Betrachtung dieser Arbeit stellte.

Unvollständig wäre diese Danksagung jedoch, würde ich nicht meine Mädels, Liane, Aurelia, Ailis und Katharina, erwähnen. Ihrer Leidenschaft und Rücksichtnahme über Wochen, Monate, Jahre hinweg habe ich es zu verdanken, dass ich diese Arbeit fertig stellen konnte.