

Mikrobohren mit ultrakurzen Laserpulsen

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Günter Kamlage

geboren am 13.02.1969 in Werlte

2005

- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Hans Kurt Tönshoff
2. Referent: Prof. Boris N. Chichkov
3. Referent: Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Tag der Promotion: 20.10.2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH). Teile dieser Arbeit wurden mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Verbundprojektes „PRABO - Präzises Bohren und Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe“ (FKZ 13 N 7053/0) gefördert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff, Vorstandsmitglied des Laser Zentrum Hannover e.V., gilt mein besonderer Dank für seinen fachlichen Rat, seine wertvollen Anregungen und für seine großzügige Unterstützung und Förderung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Herrn Prof. Boris N. Chichkov danke für die Übernahme des Korreferates und für die vielen anregenden Diskussionen und wertvollen Ratschläge.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, dem Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik möchte ich mich für die engagierte Unterstützung und die Übernahme des Korreferats bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier, dem Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik gilt Dank mein für die freundliche Prüfungsleitung.

Bei meinen Kollegen und Kolleginnen, insbesondere den Mitarbeitern der Gruppe Kurzpulslaser, sowie allen Angestellten des LZH möchte ich mich für deren kooperative und stets freundliche Zusammenarbeit bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Beatrix für ihr Engagement und ihre liebevolle Unterstützung.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die mich immer großzügig unterstützt haben und mir den beruflichen Werdegang mit der gewährten Ausbildung ermöglicht haben.

Hannover, im Dezember 2005

Kurzfassung

Die Nachfrage an reproduzierbaren und industrietauglichen Produktionsprozessen zur Herstellung präziser Mikrobohrungen ist steigend. Laser haben sich in diesem Bereich bereits als potentielle Werkzeuge qualifiziert. Allerdings stoßen die bisher bekannten Laserverfahren zum Erzeugen von Mikrobohrungen im Durchmesserbereich von 0,1 mm bis 0,2 mm bei vielen Anwendungen an ihre Grenzen, da die erreichbare Genauigkeit durch Schmelz- und Gratbildung eingeschränkt ist. Mit Verwendung von Ultrakurzpulslasern eröffnen sich neue Möglichkeiten zur mikrometergenauen Laserbearbeitung, insbesondere bei den als problematisch bekannten metallischen Werkstoffen. Bedingt durch die kurze Wechselwirkungsdauer zwischen der Laserstrahlung und dem festen Material ergibt sich eine bisher unerreichte Präzision.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und Applikation eines neuen Laserbohrverfahrens sowie umfassende Untersuchungen der grundlegenden Wechselwirkungseffekte beim Erzeugen tiefer Bohrungen mit ultrakurzen Laserpulsen in Stahlwerkstoffen. Das Laserbohrverfahren beruht auf einer neuen Bohrtechnik, bei dem der Laserstrahl um seine eigene Achse rotiert. Dadurch kann die Qualität der Bohrungen deutlich erhöht werden.

Im Rahmen der grundlegenden Untersuchungen wird nachgewiesen, dass mit zunehmender Bohrtiefe starke Effizienzverluste des Bohrprozesses auftreten. Diese sind hauptsächlich auf die durch die Fokussierung vorgegebene Strahlkaustik und der daraus resultierenden geometrischen Entwicklung des Bohrkanals zurückzuführen. Dennoch ist die Qualität der Bohrergebnisse bei der Verwendung von Ultrakurzpulslasern deutlich höher als bei allen anderen bekannten Laserbohrverfahren. Die Reproduzierbarkeit zeigt sich durch die erreichten geometrischen Toleranzen von wenigen Mikrometern.

Ein weiteres Merkmal für die Leistungsfähigkeit des neu entwickelten Bohrverfahrens ist die Möglichkeit der Herstellung sehr unterschiedlicher Bohrungsgeometrien. Die Anwendung einer zweistufigen Bohrstrategie erlaubt das Erzeugen von konvergenten, divergenten und zylindrischen Bohrungsprofilen mit hoher Reproduzierbarkeit. Somit ermöglicht das Ultrakurzpuls-Laserbohrverfahren eine erhebliche Steigerung der Qualität und Flexibilität gegenüber den herkömmlichen Bohrtechniken.

Schlagworte: Laserbohren, Mikrobearbeitung, Ultrakurzpuls-Laser

Abstract

There is an increasing demand for stable production processes, suitable for industry, for the production of very small holes with diameters in the micrometer range. Lasers are established tools and have great potential to accomplish these kind of requirements, too. However, all conventional laser processes come to their limit, when micro holes need to be generated, since flux and burr, produced by long interaction processes between the laser radiation and the matter, cause an decrease in precision. The use of ultra short pulse lasers open up new possibilities for high precision material processing, particularly for metallic material, as there is no damage of the material, due to the fact, that the interaction processes between laser radiation and matter are very short.

This thesis describes the development and introduction of a new laser drilling process and documents research activities of basic interaction effects during the production of deep holes in metal using ultra short laser pulses. The new drilling process is based on a drilling technique, where the laser beam is rotating at its own axis. Using this method, the quality of drilling holes in the micrometer range is rising, drastically.

The study will prove, that an increase in drilling depth is causing high efficiency losses of the drilling process. Reason for that is the beam cauterisation, induced by laser beam focussing, which results in a specific geometry of the drilling channel. However, the quality of drilling holes using ultra short pulse lasers is much higher in comparison to the results of drilling holes, produced by conventional lasers.

Another attribute of the new drilling process is the possibility of the production of various hole profiles. A two-step drilling strategy allows the production of convergent, divergent and cylindrical drilling profiles with a high level of reproducibility. Therefore, the ultra short pulse laser process enables a considerable gain in quality and flexibility in comparison to conventional laser drilling processes.

Key words: Laser drilling, laser micromachining, ultrafast laser

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik und des Wissens.....	3
2.1 Mikroböhrverfahren im Überblick.....	3
2.1.1 Abtragende Mikroböhrverfahren	4
2.1.2 Spanende Mikroböhrverfahren.....	6
2.1.3 Zerteilende Mikroböhrverfahren	8
2.2 Laserstrahlböhren.....	8
2.2.1 Mikroböhren mit konventionellen Lasern	10
2.2.2 Laserböhrenverfahren.....	12
2.2.2.1 Einzelpulsböhren	13
2.2.2.2 Perkussionsböhren	13
2.2.2.3 Trepanieren	14
2.3 Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen	15
2.3.1 Erzeugung und Verstärkung ultrakurzer Laserpulse	16
2.3.2 Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen	21
2.3.3 Anwendungsbeispiele	30
3 Aufgabenstellung.....	33
4 Versuchstechnik	34
4.1 Lösungskonzept.....	34
4.2 Versuchsanordnung	36
4.2.1 Laserstrahlquelle.....	36
4.2.2 Strahlführung und Strahlformung	38
4.3 Messtechnik.....	39
4.4 Entwicklung eines Strahlrotors	44
4.4.1 Prinzip der Strahlrotation.....	46
4.4.2 Konstruktion des Strahlrotors.....	49

5	Grundlegende Untersuchungen der Wechselwirkungsprozesse beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen.....	52
5.1	Quantitative Betrachtung des Bohrprozesses	52
5.1.1	Änderungen der effektiven mittleren Energiedichte beim Laserbohren.....	56
5.1.2	Energieverluste während des Bohrprozesses.....	62
5.2	Einflussfaktoren auf die Bohrungsgeometrie.....	65
5.2.1	Einfluss der Strahlkaustik auf die Bohrungsgeometrie	66
5.2.2	Einfluss der laserinduzierten Plasmen auf die Bohrungsgeometrie	69
5.2.3	Morphologische Beurteilung der Innenflächen	79
6	Prozessmodell.....	83
7	Experimentelle Untersuchungen zum Strahlrotationsbohren	87
7.1	Prozesseffizienz im Vergleich zum konventionellen Perkussionsbohren	87
7.2	Qualitative Bewertung der Bohrergebnisse.....	89
8	Entwicklung neuer Bohrstrategien.....	93
9	Anwendung des Ultrakurzpuls laser-Mikrobohrverfahrens in der Praxis... 	100
10	Zusammenfassung	103
11	Literaturverzeichnis	106

Formelzeichen und Abkürzungen

A	cm^2	Fläche
a_P	$\mu\text{m}/\text{Puls}$	mittlere Bohrrate
A_s	-	Absorption
a_Z	mm	Bohrtiefe
c	m/s	Vakuumllichtgeschwindigkeit
C_e	$\text{Jcm}^{-3} \text{K}$	Wärmekapazität der Elektronen
C_p	$\text{Jcm}^{-3} \text{K}$	Wärmekapazität der Phononen
d	μm	Bohrungsdurchmesser
D	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	thermische Diffusivität
d_0	μm	minimaler Fokusdurchmesser
E	J	Energie
E_F	J	Fermi-Energie
f	mm	Brennweite
f_P	Hz	Pulsfolgefrequenz
H	J/cm^2	Energiedichte
H_a	J/cm^2	absorbierte Energiedichte
H_{th}	J/cm^2	Schwellenenergiedichte
I	W/cm^2	Lichtintensität
I_0	W/cm^2	Intensität einer Mode
I_a	W/cm^2	absorbierte Intensität
I_{max}	W/cm^2	Spitzenintensität
K	-	Strahlpropagationsfaktor
k_e	$\text{Wm}^{-1} \text{K}$	Wärmeleitfähigkeit
l	m	Elektronendiffusionslänge
L	nm/Puls	mittlere Ablationstiefe
L_R	m	Resonatorlänge
l_{th}	m	Wärmeeindringtiefe
M^2	-	Qualitätskennzahl
N	-	Modenzahl
n	-	Pulszahl
n_e	cm^{-3}	Elektronendichte
p	bar	Umgebungsdruck

Q	J	Pulsenergie
Q_F	$\text{Wm}^{-2} \text{K}$	Wärmefluss
R	-	Reflektivität
r	mm	Bohrungsradius
s	mm	Materialstärke
S	W/cm^3	Energiefluss
t	s	Bohrzeit
T_e	K	Elektronentemperatur
T_p	K	Gittertemperatur
v_R	1/min	Rotationsgeschwindigkeit des Rotors
v_{RS}	1/min	Rotationsgeschwindigkeit des Strahls
w	μm	Strahlradius
w_0	μm	Strahltaile
w_S	mm	Strahlradius des Rohstrahls
x	mm	Wegstrecke
z	μm	Distanz
z_F	mm	Fokusposition
z_R	μm	Rayleigh-Länge
Δz	mm	Änderung der Fokusposition
ΔZ_z	μm	Rundheitsabweichung MZC nach DIN ISO 4291
Ω	J kg^{-1}	spezifische Verdampfungsenergie
α	cm^{-1}	Absorptionskoeffizient
β	°	Öffnungswinkel
δ	m	optische Eindringtiefe
γ	$\text{Wcm}^{-3} \text{K}$	Kopplungskonstante
λ	nm	Wellenlänge
θ	rad	Divergenzwinkel
ρ	g/cm^3	Dichte
τ_e	s	Elektronen-Aufheizzeit
τ, τ_L	s	Laserpulsdauer
τ_p	s	Phononen-Abkühlzeit

Abkürzungen

CO ₂	Kohlendioxid, laseraktives Medium
CPA	chirped pulse amplification
fs	Femtosekunden (1 fs = 10 ⁻¹⁵ s)
MZC	kleinste Ringzone (Minimum Zone Circle)
Nd:YAG	Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
Nd:YLF	Neodym-dotiertes Yttrium-Lithium-Fluorid
Nd:YVO ₄	Neodym-dotiertes Yttrium-Vanadium
ns	Nanosekunden (1 ns = 10 ⁻⁹ s)
ps	Pikosekunden (1 ps = 10 ⁻¹² s)
REM	Rasterelektronenmikroskop
TEM	transversale elektromagnetische Mode
Ti:Saphir	Titan-dotiertes Saphir
UV	Ultraviolett (λ = 30 bis 380 nm)

1 Einleitung

Mit zunehmender Miniaturisierung vieler in der Industrie eingesetzter Bauteile gewinnen Präzision und Reproduzierbarkeit von Mikrobohrprozessen an Bedeutung. Da bei den konventionellen Bohrverfahren, auch beim Bohren mit Lasern, noch große Defizite zu verzeichnen sind, müssen die bestehenden Techniken kontinuierlich weiterentwickelt bzw. alternative Verfahren erschlossen werden.

Viele industrielle Anwendungen erfordern exakte Mikrobohrungen mit Durchmessern von nur 0,1 mm bis 0,2 mm und kleiner. Dabei liegen die zulässigen Toleranzen der Bohrungsdurchmesser häufig bei nur wenigen Prozent. In diesem Präzisionsbereich zählt insbesondere das Bohren von Metallen zu den problematischen Anwendungsfällen, da metallische Werkstoffe durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und vergleichsweise geringen Schmelztemperaturen leicht zu Schmelz- und Gratbildungen neigen. Folglich sind Präzision und Reproduzierbarkeit der Bohrprozesse in metallischen Werkstoffen nur begrenzt möglich. Häufig sind aufwändige Nachbearbeitungsschritte erforderlich, um die gewünschte Qualität der Mikrobohrungen zu erreichen.

Obwohl das Laserbohren mit konventionellen Laserstrahlquellen schon seit Jahrzehnten intensiv untersucht wird, sind noch immer viele Fragen ungeklärt. Der Grund dafür ist, dass das Bohren fester Materialien mit Laserstrahlung durch zahlreiche physikalische Phänomene bestimmt wird. Diese stehen in einem komplizierten Wechselspiel. Die verschiedenen Wechselwirkungsprozesse überlagern sich während des Bohrvorgangs und beeinflussen sich teilweise gegenseitig. Durch die simultan ablaufenden Prozesse ist die Untersuchung der einzelnen Wechselwirkungen und somit der Zugang zu einem besseren Verständnis der Bohrungsentstehung erschwert.

Jüngste Untersuchungen haben ergeben, dass beim Laserbohren durch den Einsatz neuartiger Laserstrahlquellen, die sehr kurze und intensive Pulse erzeugen, sogenannter Ultrakurzpulslaser, die bisher erreichbare Präzision deutlich verbessert werden kann. Allerdings sind diese leistungsstarken Laserstrahlquellen nicht automatisch Garant für präzisere und effizientere Bohrprozesse. Wie bei den herkömmlichen Lasern sind auch beim Bohren mit Ultrakurzpulslasern die Bearbeitungsparameter je nach Zielgeometrie genau anzupassen. Für die variantenreichen Bohrungsgeometrien mit teilweise hohen Aspektverhältnissen stehen dazu verschiedene Bohrverfahren und Bohrstrategien zur Verfügung. Die bislang beim traditionellen Laserbohren gewonnenen Erkenntnisse lassen sich zudem nur bedingt auf das Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen übertragen, da sich der Bohr- bzw. Abtragsprozess deutlich von anderen Laserprozessen unterscheidet. Durch die extrem kurze Pulsdauer der verwendeten Laserpulse im Sub-

Pikosekundenbereich ($< 10^{-12}$ Sekunden), spielt die Reihenfolge der ablaufenden Prozesse eine größere Rolle als beim Bohren mit länger gepulsten Lasern, bei dem viele der beeinflussenden Prozesse als instantan angesehen werden können. Durch die kurzen Lichtimpulse werden deutlich höhere Pulsleistungen im Gigawattbereich erreicht, wodurch bei der Bearbeitung von festen Materialien völlig neue Phänomene auftreten, die vorteilhaft genutzt werden können.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit darin, einerseits in umfassenden grundlegenden Untersuchungen die neuartigen Phänomene beim Laserbohren mit ultrakurzen Laserpulsen näher zu untersuchen. Andererseits gilt es, ein alternatives Bohrverfahren zu entwickeln, um eine höhere Präzision und Flexibilität der Bohrungsgeometrien zu erreichen.

2 Stand der Technik und des Wissens

Feine Bohrungen unterschiedlichster Größe und Qualität werden für verschiedenste Zwecke in medizinischen Instrumenten und in Bauteilen für die Automobilindustrie, der Drucktechnik oder der Telekommunikation benötigt. Hierzu stehen eine Reihe von zum Teil konkurrierenden Mikrobohrverfahren zur Verfügung. Die wichtigsten dieser Bohrverfahren werden im ersten Abschnitt dieses Kapitels dargestellt. Daran anschließend wird ein detaillierter Überblick über das Mikrobohren mit konventionellen Lasern und die dabei verwendeten Bohrverfahren gegeben.

Im Bereich der Lasermikrobearbeitung eignen sich Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser besonders gut zur Herstellung präziser und reproduzierbarer Strukturen mit Mikrometergenauigkeit. Bei diesen Lasern handelt es sich um eine relativ junge Laserart, die sich bisher nicht in der Industrie etablieren konnte. Grund dafür ist, dass das Generieren von intensiven, extrem kurzen Pulsen eines vergleichsweise komplexen Laseraufbaus bedarf. Im Abschnitt 2.3 werden die Techniken zur Erzeugung und Nachverstärkung ultrakurzer Laserpulse beschrieben. Des Weiteren werden die Besonderheiten des Abtragens mit ultrakurzen Laserpulsen näher dargestellt und einige Anwendungsbeispiele aufgezeigt.

2.1 Mikrobohrverfahren im Überblick

Zur Definition der Bezeichnung „Mikrobohrung“ gibt es keine genauen Angaben. Üblicherweise sind damit alle kleinen Bohrungen gemeint, deren Durchmesser im Bereich weniger Millimeter und darunter liegen. Nach unten ist der Durchmesser einer Mikrobohrung theoretisch bis in den Größenbereich einzelner Atome möglich. Tatsächlich können heute durch verschiedene Verfahren (z.B. Lithographie, Laser) Aussparungen von nur wenigen Nanometern erzeugt werden, die teilweise auch als Mikrobohrung bezeichnet werden.

Mikrobohrungen erfüllen eine Vielzahl von Aufgaben. Es gibt Bohrungen zum Belüften und Entlüften, zum Dosieren und Einspritzen von Flüssigkeiten oder zum Filtern von Partikeln. Manche Mikrobohrungen dienen der Oberflächenvergrößerung (Kühlbohrungen), andere als kleine Flüssigkeitspuffer, um tribologische Eigenschaften von Oberflächen zu verändern. Entsprechend der vielfältigen Aufgabengebiete der Mikrobohrungen gibt es große Unterschiede und Ansprüche an die Form und Präzision der Bohrungen.

Bis heute unbefriedigend gelöst - sowohl bei Anwendung der lasergestützten als auch bei den anderen Mikrobohrverfahren - ist die Herstellung von sehr präzisen

Mikrobohrungen mit Durchmessern kleiner als 0,5 mm in metallischen Werkstoffen. Dies ist auf die hohe Wärmeleitfähigkeit und die vergleichsweise geringe Schmelztemperatur von Metallen zurückzuführen.

Ob Spiralbohrer, Stanzwerkzeug, Erodierdraht, Laser- oder Elektronenstrahl, alle Mikrobohrverfahren bewirken einen relativ hohen Wärmeeintrag in das umgebende Material. Häufig wird beim Abtrennen des Materials zwangsweise die Schmelztemperatur des Werkstoffs erreicht. Die entstehende Schmelzschicht verlagert sich üblicherweise an die Ränder der Struktur und bildet nach Erstarren den sogenannten Grat. Da der Schmelzvorgang ein inhomogener Prozess ist, sich der Grat also jeweils anders ausbildet, sind die erreichbare Präzision und Reproduzierbarkeit deutlich limitiert. Weiterhin gibt es häufig Probleme mit unerwünschten Gefügeveränderungen in tieferen Schichten infolge der thermischen Belastung des Materials. Bei Bauteilen, die sehr hohen Drücken ausgesetzt sind und gleichzeitig relativ dünne Materialstärken aufweisen, kann infolge des Einbringens von Bohrungen eine Gefügeänderung, wie z.B. Materialversprödung, das Versagen des Bauteils herbeiführen. Daher ist es erforderlich, die Mikrobohrverfahren weiterzuentwickeln, um möglichst schädigungsarme und reproduzierbare Bohrprozesse zu erhalten. Gleichzeitig ist ein klarer Trend zu immer kleineren Bohrungsdurchmessern zu erkennen. Je kleiner die Bohrungen werden, desto höher sind auch die Anforderungen an Präzision und Reproduzierbarkeit.

Bei der Erzeugung von Mikrobohrungen konkurrieren gemäß DIN 8580 unterschiedliche „trennende Verfahren“. Nach dieser Norm wird zwischen abtragenden, spanenden und zerteilenden Trennverfahren unterschieden [DIN 8580]. Im Folgenden werden die wichtigsten Mikrobohrverfahren, mit Ausnahme des Laserstrahlbohrens, im Einzelnen näher erläutert, wobei kurz das Prinzip sowie die derzeitigen Grenzen der Anwendbarkeit aufgezeigt werden. Das Mikrobohren mittels Laserstrahlung wird im anschließenden Kap. 2.2 umfassender beschrieben.

2.1.1 Abtragende Mikrobohrverfahren

Zu den abtragenden Mikrobohrverfahren zählen das *Elektronenstrahlbohren*, das *Funkenerosionsbohren*, verschiedene *elektrochemische Bohrverfahren* sowie das *Laserstrahlbohren* [DIN 8590, HEIT98].

Das *Elektronenstrahlbohren* beruht auf dem Prinzip der Energieumwandlung kinetischer Energie beschleunigter Elektronen in Wärmeenergie beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche. Durch eine hohe Leistungsdichte wird der Werkstoff

innerhalb kürzester Zeit erhitzt und verdampft, wodurch die Schädigungszone relativ klein gehalten werden kann [BOBE72, DOBE98, NN90, SCHU92].

In der industriellen Anwendung liegen die Bohrungsdurchmesser typischerweise im Bereich von 0,05 mm bis 1 mm bei Materialstärken von bis zu 5 mm. Das erreichbare maximale Aspektverhältnis liegt bei etwa 15.

Als besondere Vorteile können die berührungslose Bearbeitung sowie die relativ hohen Taktfrequenzen genannt werden. Je nach Anwendung können Bohrfrequenzen von bis zu 3000 Hz erreicht werden. Außerdem können die Bohrungen auch unter einem Winkel eingebracht werden. Gebohrt werden können nahezu alle Materialien. Nachteilig ist, dass der Prozess immer im Vakuum stattfinden muss. Typische Anwendungen sind das Herstellen von feinen Filterelementen, von Kühlbohrungen in Brennkammerelementen (z.B. für Düsentriebwerke) oder von Spinnköpfen für die Faserherstellung [KORD93, WINK02].

Zur Erzeugung von Bohrungen durch *Funkenerosion* wird eine rotierende Hohlelektrode aus Kupfer, Messing, Stahl, Aluminium, Molybdän oder, insbesondere bei großem Schachtverhältnis, Wolframkupfer auf das Werkstück gesenkt, an dessen Spitze Entladungen stattfinden. Prinzipiell erfolgt der Materialabtrag als Folge elektrischer Entladungen in einem Arbeitsmedium zwischen zwei leitenden Werkstoffen. Die Elektrode wird zum Werkstück so positioniert, dass zwischen beiden ein Spalt verbleibt, der mit einer nicht leitenden Flüssigkeit (Dielektrikum) gefüllt ist. Das Dielektrikum wird beim Bohren durch die Hohlelektrode zugeführt und sorgt für den Abtransport des abgetragenen Materials.

Gebräuchlich sind Elektroden mit Durchmessern zwischen 0,2 mm und 3,0 mm, vereinzelt finden auch Elektroden mit Durchmessern kleiner 0,1 mm Verwendung, z.B. bei der Herstellung von Kraftstoffespritzdüsen. Die maximalen Aspektverhältnisse liegen zwischen 200 und 500.

Das Funkenerodieren arbeitet berührungslos und ist daher für das Bohren von empfindlichen und dünnwandigen Werkstücken geeignet. Häufig wird das Erodieren bei besonders harten oder zähen metallischen Werkstoffen eingesetzt, die nicht zerspannt werden können. Die erreichbaren Bohrgeschwindigkeiten sind vergleichsweise klein, der Werkzeugverschleiß sowie die Werkzeugkosten relativ hoch [FEUE88, KÖNI90b, SCHR98, MEIS01].

Beim *elektrochemischen Bohren* wird das Prinzip der anodischen Auflösung ausgenutzt. Ein metallischer Werkstoff wird unter Einwirkung eines elektrischen Stroms und einer Elektrolytlösung aufgelöst. Der elektrische Strom wird dabei entweder durch Anlegen einer äußeren Stromquelle oder durch ein Lokalelement erzeugt. Das Werkzeug wird mit gleichbleibendem Vorschub relativ langsam in das

zu bearbeitende Material gesenkt. Der Spalt zwischen dem Werkstück und der Bohrelektrode wird, ähnlich wie bei der Funkenerosion, mit einer Elektrolytlösung mit z.T. hohem Druck gespült. Durch das Spülen mit dem Elektrolyt werden die abgelösten Teilchen aus dem Spalt entfernt. Als Elektrolyte kommen Salze, Säuren oder Laugen zur Anwendung. Je nach gewünschter Geometrie und Werkstoff kommen unterschiedliche Verfahren mit variierenden Elektrodenformen und -materialien sowie verschiedenen Elektrolyten zum Einsatz. Die verschiedenen Verfahren, die unter dem Begriff „elektrochemisches Bohren“ zusammengefasst sind, sollen hier nicht im Einzelnen erläutert werden [DEGN90, ADAM98, BAUM02].

Durch elektrochemisches Bohren können minimale Durchmesser von circa 150 µm mit einem Aspektverhältnis von etwa 200 erzielt werden. Der wesentliche Nachteil dieses Verfahrens ist die aus den kleinen Vorschüben abzuleitende lange Bearbeitungszeit. Gebohrt werden können alle leitenden Metalle bzw. Metalllegierungen.

2.1.2 Spanende Mikrobohrverfahren

Als spanenden Verfahren zur Herstellung von feinen Bohrungen sind im Wesentlichen das *Spiralbohren* und das *Ultraschallbohren* zu nennen [DIN 8589].

Für das Bohren mit *Spiralbohrern* stehen für den industriellen Einsatz heute Kleinstbohrer aus sog. Schnellarbeitsstählen mit minimalen Durchmessern von 0,1 mm zur Verfügung. In den Forschungslabors werden sogar Spiralbohrer mit Durchmessern kleiner als 50 µm getestet (siehe Bild 2-1). Mit solchen Bohrern lassen sich Bohrtiefen von 3 bis 5 mal dem Bohrungsdurchmesser erreichen, in Einzelfällen sogar bis zum fünfzigfachen des Bohrungsdurchmessers [DIN 1899, KÖNI90, HÖSC98, WILL01].

Die Qualität der Bohrungswandung hängt im besonderen Maße von der Qualität bzw. vom Verschleiß des verwendeten Werkzeugs ab. Um die Verschleißfestigkeit von Kleinstbohrern zu erhöhen, werden die Oberflächen behandelt (Nitrieren oder Anlassen). Die Reproduzierbarkeit des Spiralbohrprozesses ist begrenzt, da die relativ schnelle Abnutzung der Schneidflächen eine ständige Verschlechterung der Bohrungsqualität bedingt. Je kleiner die Bohrungen sind, desto schneller macht sich der Werkzeugverschleiß in der Präzision und Reproduzierbarkeit bemerkbar.

Das Bohren mit feinen Spiralbohrern stellt höchste Ansprüche an die Werkzeugmaschinen. Die Werkzeugspindel rotiert mit sehr hoher Geschwindigkeit und muss dabei eine gute Rundlaufgenauigkeit haben. Weiterhin dürfen nur sehr kleine Vorschubkräfte auftreten, da die spröden Bohrer sonst leicht brechen.

Bei sehr feinen Bohrungen kommen meist zusätzliche Arbeitsschritte wie Oberflächenreinigung, Polieren, Zentrieren und Vorbohren hinzu. Zudem sind Kühl- bzw. Schmiermittel erforderlich.

Gebohrt werden können verschiedenste Materialien, wobei der Schwerpunkt bei den Metallen liegt. Für sehr harte Metalle ist das Spiralbohren allerdings nur begrenzt einsetzbar, da die Härte des Werkzeugs stets höher sein muss als die des zu bearbeitenden Werkstoffs.

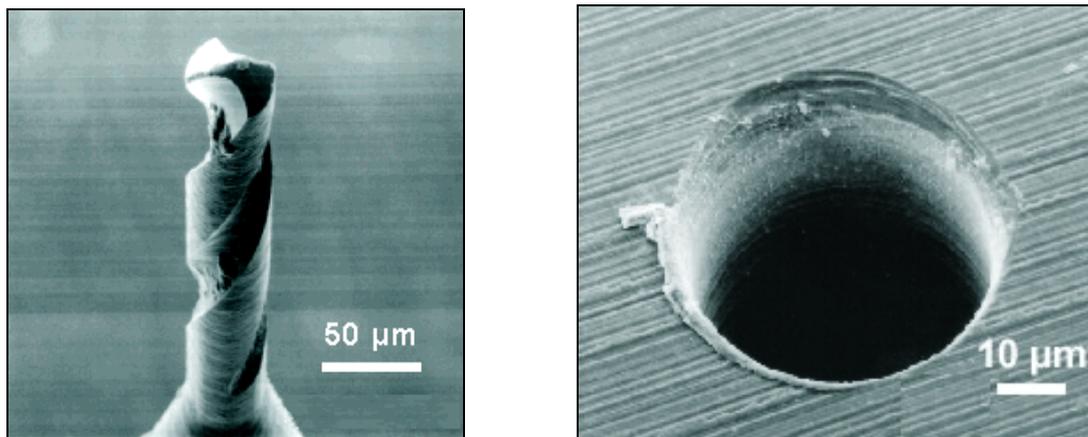


Bild 2-1: Mikro-Spiralbohrer mit 50 μm Durchmesser (links) und Mikrobohrung in Stahl (rechts), Quelle: IFW Hannover

Beim *Ultraschallbohren* wird das Werkzeug unter Verwendung eines Abrasivs negativ abgebildet. Dabei schwingt das Werkzeug mit hoher Frequenz. Die von einem Hochfrequenzgenerator erzeugte Wechselspannung wird in einem piezokeramischen Schallwandler in mechanische Längsschwingung umgewandelt. Da die Amplitude des Schallwandlers für Bearbeitungszwecke zu gering ist, wird die Schwingung durch mechanische Amplitudenverstärker (Sonotorden) weiter verstärkt. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für die Bearbeitung von Gläsern oder anderen spröden Werkstoffen angewendet. Nur in seltenen Fällen werden Bohrungen in metallischen Werkstoffen durch das Ultraschall-Abtragen hergestellt.

Die Strukturdicke pro Werkstück wird durch die Fertigung des Werkzeugs begrenzt. Die Herstellung der Werkzeuge ist in der Regel relativ aufwändig. Aus den hohen Werkzeugkosten resultiert daher der Einsatz vor allem für große Stückzahlen. Vorteilhaft an diesem Verfahren ist die schonende Behandlung des Werkstücks. Die thermische Belastung beim Abtragen ist vernachlässigbar gering, die Strukturen sind daher nahezu grat- und spannungsfrei.

Beim Ultraschallbohren liegen die kleinsten möglichen Bohrungsdurchmesser im Bereich von 0,2 bis 0,3 mm. Große Aspektverhältnisse können nicht erreicht werden [CRON61, SADE97, FROM99].

2.1.3 Zerteilende Mikrobohrverfahren

Das einzige zerteilende Trennverfahren, das zum Mikrobohren eingesetzt wird, ist das Stanzen (oder Stechen) [DIN 8588]. Beim Stanzen wird ein Loch mit nahezu beliebigem Querschnitt in das Werkstück eingedrängt, wobei beim Durchstechen des Lochs am Austritt ein Wulst oder ein Grat aufgeworfen wird, der z.T. in einem weiteren Arbeitsschritt entfernt werden muss. Die Anwendung dieses Verfahrens ist fast ausschließlich auf duktile Werkstoffe beschränkt (vorwiegend Metalle und Kunststoffe).

Durch Stanzwerkzeuge können relativ kleine Bohrungen mit Durchmessern von 100 µm hergestellt werden. Allerdings ist auch hier, ähnlich wie beim Spiralbohren und Ultraschallbohren, die Herstellung des Werkzeugs aufwändig. Feine Stanzwerkzeuge werden z.B. in der Druckindustrie eingesetzt oder zur Erzeugung von Bohrungen in Leiterplatten. Beim Stanzen sind nur kleine Aspektverhältnisse von ca. 4 erreichbar. Weiterhin nachteilig ist der hohe Verschleiß an den scharfkantigen Stanzwerkzeugen [BUSC89, FART01].

Da die genannten Verfahren bezüglich der erreichbaren Bohrungsdimensionen, der Lochqualität sowie der Reproduzierbarkeit und Geschwindigkeit des Prozesses recht unterschiedlich sind, muss je nach Bohranwendung ein geeignetes Verfahren gewählt werden. Die Prozessentwickler sind kontinuierlich bestrebt, die Leistungsfähigkeit der Mikrobohrprozesse zu erhöhen. Neben der steigenden Nachfrage an immer kleiner werdenden Bohrungsdurchmessern mit geringen Toleranzen und hohem Aspektverhältnis spielt zunehmend die Wirtschaftlichkeit des Bohrverfahrens eine wichtige Rolle.

2.2 Laserstrahlbohren

Bereits seit Anfang der Sechziger Jahre werden auch Laser zum Bohren eingesetzt. Seitdem wurden die Laserstrahlquellen sowie die Bohrprozesse immer weiter entwickelt und haben sich in vielen Bereichen etabliert.

Beim Laserstrahlbohren kommen unterschiedliche technologische Verfahren und Lasersysteme zum Einsatz. Mit Laserstrahlung werden heute serienmäßig Bohrungen im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu einigen Millimetern für

verschiedenste Bereiche der Technik hergestellt. Als Beispiele seien das Laserbohren von Uhrenlagersteinen, chirurgischen Nadeln, Zieh-Diamanten zur Faser- und Drahtherstellung, Bauteile der Mikrotechnologie (z.B. Leiterbahnplatten), Düsen für pneumatische und hydraulische Bauteile oder zur Kraftstoffeinspritzung in Verbrennungsmotoren, Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln sowie Mikrofiltern oder Mikroperforationen auf Gleitflächen erwähnt [ALLM78, ALVE91, ALVE94, BELF91, BOLI84, BREI84, CING82, CORF83, KNOW01, BECK99, GIER99].

Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften weist das Laserstrahlbohren eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Bohrverfahren auf. Die Vorzüge des Laserbohrens liegen u.a. in der berührungsfreien und daher verschleißfreien Bearbeitung, der kurzen Bearbeitungszeit und der guten Automatisierbarkeit des Verfahrens. Teilweise ist der Laser das einzige Werkzeug, mit dem bestimmte Bohranwendungen durchgeführt werden können. Es gibt Werkstoffe, die nur mit dem Laser mit vertretbarem Aufwand zu bearbeiten sind. So ist beispielsweise zum Bohren von sehr harten und spröden Werkstoffen, wie Hartmetalle oder Diamant, der Laser konkurrenzlos. Zudem kann der Laser an schwer zugänglichen Stellen, etwa auf schrägen oder gekrümmten Flächen, arbeiten. Sogar Teile, die in Glas oder in einer Flüssigkeit eingeschlossen sind, können mit dem Laserstrahl erreicht werden.

Bei einigen Anwendungen werden sehr hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten im Millisekundentakt erreicht. Der Laser bietet weiterhin den Vorteil, dass nahezu alle Materialien gebohrt werden können, allerdings nicht alle Materialien mit demselben Laser. Entsprechend dem unterschiedlichen Absorptionsverhalten der verschiedenen Materialien sowie der gewünschten Strukturgröße und Präzision muss ein geeigneter Lasertyp ausgewählt werden. Je nach Lasertyp können dann Metalle, Gläser, Kunststoffe oder auch organische Materialien bearbeitet werden [DICK94, DAUS01, YILB97, BATT99, BLUM99].

So zahlreich die Anwendungsmöglichkeiten des Lasers zum Bohren sind, so komplex ist auch die Einstellung der geeigneten bzw. notwendigen Prozessparameter für die jeweilige Bohranwendung. Der Laserbediener hat die schwierige Aufgabe aus einer Vielzahl von Laser-, Material- und Bearbeitungsparametern eine günstige Kombination festzulegen. In Bild 2-2 sind alle Einflussgrößen des Laserbohrprozesses zusammengestellt.

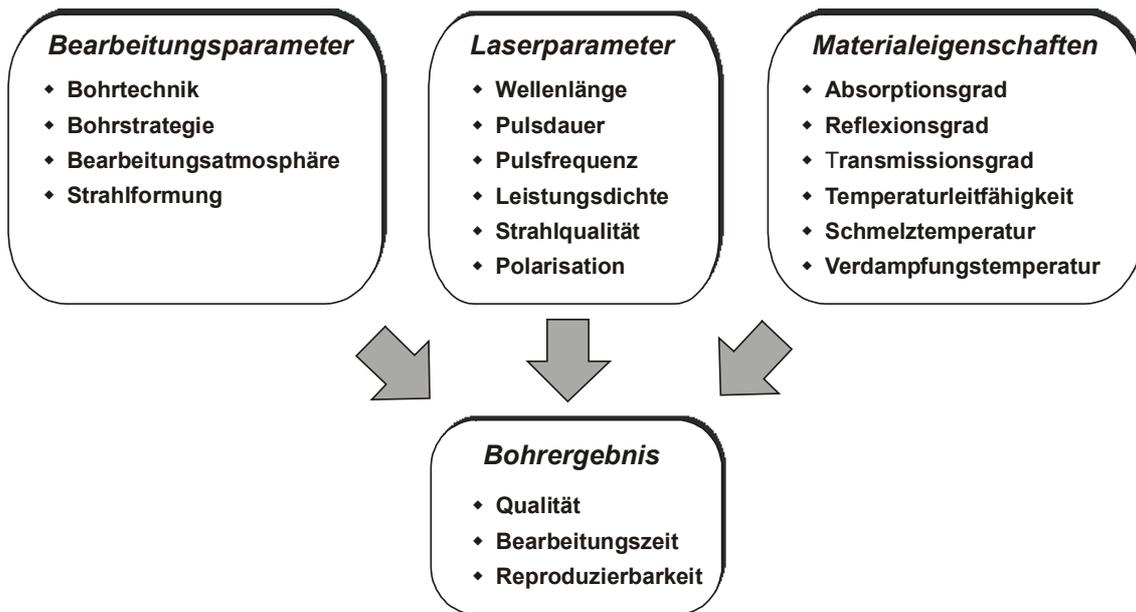


Bild 2-2: Einflussgrößen auf das Bohrergebnis

Die Beurteilung der erzielten Laserbohrungen erfolgt je nach Schwerpunkt anhand quantitativer und qualitativer Kriterien. Zu den quantitativen Kriterien zählen im Wesentlichen die Bohrgeschwindigkeit sowie die maximale erreichbare Bohrtiefe. Zu den qualitativen Kriterien zählen die Bohrungsgeometrie, Form und Kantenschärfe der Ein- und Austrittsrundungen, Morphologie und Schädigungen der Innenflächen sowie die Reproduzierbarkeit der Bohrungsgeometrie.

2.2.1 Mikrobohren mit konventionellen Lasern

Generell unterteilt man die in der Materialbearbeitung verwendeten Laser in drei Gruppen: Die CO₂-Laser, die Excimer-Laser und die Festkörperlaser. Alle drei Lasertypen finden Anwendung beim Laserstrahlbohren. Allerdings werden sie für sehr unterschiedliche Zwecke eingesetzt.

Der CO₂-Laser eignet sich zwar grundsätzlich zum Bohren, jedoch nur bedingt zum Erzeugen von Mikrobohrungen. Der minimal erreichbare Fokusbereich ist, verglichen mit dem anderer Laser, auf Grund der größeren Wellenlänge um den Faktor 10 größer, wenn sonst gleiche Bedingungen vorliegen. In erster Linie wird der CO₂-Laser zum Bohren transparenter Materialien wie Gläser oder Kunststoffe eingesetzt.

Excimer-Laser werden zum Bohren nur bei speziellen Anwendungen eingesetzt, wo die spezifischen Eigenschaften wie die scharfe Fokussierbarkeit und der photolytische Abtrag gefordert sind, z.B. zur Herstellung von Mikrobohrungen in einigen Nichtmetallen. Im Hinblick auf die Wellenlänge ist der Excimer-Laser mit seiner kurzwelligen UV-Strahlung für sehr feine Bohrungen im Mikrometerbereich ideal geeignet. Jedoch widersprechen einem wirtschaftlichen Einsatz in der Regel die aufwändige Technik des Lasertyps sowie die hohen Anschaffungskosten. Durch die im Allgemeinen kleinen Taktfrequenzen der Excimer-Laser sind die Prozesszeiten relativ hoch.

Für den Großteil der Bohranwendungen sind Festkörperlaser im Einsatz. Grund dafür ist, dass die meisten industriellen Laserbohranwendungen an Metallen stattfinden. Aufgrund ihrer Wellenlänge, Pulsspitzenleistung und ihrer Strahlqualität sind sie auf diesem Gebiet den CO₂- und Excimer-Lasern überlegen.

Gute Ergebnisse können z.B. mit Q-switch-Nd:YAG-Lasern mit Pulsdauern im Mikro- bis Millisekundenbereich und Pulsspitzenleistungen bis zu mehreren 10 kW erzielt werden. Solche leistungsstarken Laser finden ihren Einsatz allerdings eher bei Anwendungen mit etwas größeren Bohrungsdurchmessern von einigen 100 µm.

Für die kleineren, qualitativ hochwertigeren Bohrungen setzt man verstärkt frequenzverdoppelte oder frequenzverdreifachte Festkörperlaser ein. Neben Nd:YAG sind hier auch Nd:YLF, Nd:YVO₄ oder Vanadat als laseraktives Medium im Einsatz. Bei diesen vergleichsweise kompakten Strahlquellen kann durch Verwendung von Kristallen mit nichtlinearen Eigenschaften die Wellenlänge der Strahlung vom infraroten bis in den ultravioletten Bereich konvertiert werden. Darüber hinaus sind kürzere Pulsdauern im Nanosekunden-Bereich möglich, so dass sich auch mit diesen Lasern bei vergleichsweise geringen Pulsenergien relativ hohe Pulsspitzenleistungen erreichen lassen.

Zunehmend sind diese Festkörperlaser auch als diodengepumpte Versionen erhältlich (sog. DPSSL- diodepumped solid state laser), wodurch im Vergleich zu den lampengepumpten Systemen die Wartungsintervalle sowie der Energieverbrauch erheblich reduziert sind [NN00].

Üblicherweise wird bei der Mikrobearbeitung mit Lasern die Strahlung durch eine kurzbrennweitige Linse auf das Werkstück fokussiert, welches mit Hilfe einer computergesteuerten Handhabung positioniert wird. Durch die Variation der Laser- und Bearbeitungsparameter ist das Herstellen von feinen Bohrungen mit einem weiten Anforderungsprofil möglich. Allerdings können mit Festkörperlasern oder anderen kommerziellen Industrielasern nur bedingt qualitativ hochwertige Mikrobohrungen hergestellt werden. Grund dafür ist, dass der Bohrprozess stets von

Schmelz- und Gratbildung begleitet ist. Die Tiefe der Schädigungszone beim Abtragen mit Laserstrahlung hängt primär von der Einwirkdauer der Strahlung ab. Daher kann die Präzision der Bearbeitung nur durch Verwendung von gepulsten Lasern mit extrem kurzen Pulsdauern signifikant verbessert werden.

Die Entwicklung der letzten Jahre hat dazu geführt, dass heute relativ kompakte Lasersysteme zur Verfügung stehen, die Pulse im Bereich von Piko- und Femtosekunden erzeugen können. Pulsdauern von minimal 100 fs und Repetitionsraten von einigen kHz bei Ultrakurzpuls-Titan:Saphir-Lasern führen bei vergleichsweise kleiner mittlerer Ausgangsleistung zu extrem hohen Pulsspitzenleistungen im Gigawattbereich und können daher zum nahezu schmelzfreien Abtrag von Metallen eingesetzt werden [ALTM00, OSTE00b, TÖNS99a]. In Kap. 2.3 wird der Einsatz dieser Laser in der Mikromaterialbearbeitung ausführlicher beschrieben.

Ultrakurzpulslaser werden seit einigen Jahren von verschiedenen Herstellern angeboten, allerdings sind alle bisher erhältlichen Ultrakurzpulslaser nicht für den industriellen Einsatz geeignet. Neben den vergleichsweise hohen Anschaffungskosten zeigen diese Systeme immer noch Stabilitätsprobleme. Allerdings konzentrieren sich derzeit viele Laser- und Prozessentwickler auf die Weiterentwicklung und Integration dieser Laser in vorhandene konventionelle Bearbeitungsanlagen, denn die materialunabhängige und somit sehr flexible Einsatzmöglichkeit dieser Laserart birgt ein enormes Anwendungspotential.

2.2.2 Laserbohrverfahren

Die Prozesstechnik für Laserbohranwendungen setzt sich im Wesentlichen aus der Strahlquelle, der Strahlführung und der Bearbeitungsoptik zusammen. Durch die Strahlquelle werden die Laserparameter eingestellt. Dabei sind die meisten Parameter allein durch die Wahl eines bestimmten Lasers bereits festgelegt. Dies sind in der Regel die Wellenlänge und Polarisation der Strahlung, die Pulsdauer sowie die Strahlqualität. Für den jeweiligen Prozess müssen dann noch die übrigen Laserparameter, also die Pulsenergie und die Pulsfolgefrequenz, gewählt werden. Das Bohrergebnis wird ebenfalls durch verschiedene Bearbeitungsparameter beeinflusst (vgl. Bild 2-2). Neben der Strahlformung, die durch die Bearbeitungsoptik bewirkt wird, und den atmosphärischen Bedingungen am Ort der Laserablation spielen die Bearbeitungsstrategie (z.B. Pulsanzahl, Fokusposition etc.) und das Bohrverfahren eine entscheidende Rolle.

Generell unterscheidet man beim Laserstrahlbohren drei Verfahren:

- Einzelpulsbohren
- Perkussionsbohren
- Trepanieren

Im Folgenden sollen diese drei Bohrverfahren näher erläutert werden [HÜGE92, DAUS00].

2.2.2.1 Einzelpulsbohren

Beim *Einzelpulsbohren* genügt ein einzelner Laserpuls, um die gewünschte Bohrungsform zu erzeugen. Da dieses Verfahren mit nur einem Puls pro Bohrung auskommt, werden hierbei die kürzesten Prozesszeiten erreicht. Die Form der Bohrung wird über die Pulsenergie und die Fokussierung eingestellt.

Für die Herstellung präziser Bohrungen ist dieses Verfahren jedoch ungeeignet. Ein einzelner intensiver Laserpuls führt normalerweise nicht zu qualitativ hochwertigen Bohrungsgeometrien. Dieses Verfahren wird daher lediglich für Anwendungen eingesetzt, bei denen eine hohe Prozessgeschwindigkeit notwendig ist, die Qualität der Bohrung aber eine untergeordnete Rolle spielt.

Das Einzelpulsbohren ist im Zusammenhang mit konventionellen Hochleistungslasern (Nd:YAG-Laser, CO₂-Laser) bekannt, die eine genügend hohe Pulsenergie bieten, um die gewünschte Materialstärke zu durchstoßen. Dabei können Bohrtiefen von mehreren Millimetern erreicht werden. Für Excimer- und Ultrakurzpulslaser ist dieses Bohrverfahren kaum interessant, da pro Puls nicht mehr als einige 100 nm abgetragen werden können.

2.2.2.2 Perkussionsbohren

Reicht die Energie eines einzelnen Pulses nicht zum Fertigstellen der Bohrung aus, so muss mit einer Pulsfolge gebohrt werden. Dieses Verfahren nennt man *Perkussionsbohren*. Für Bohrungen höherer Präzision ist im Allgemeinen eine Vielzahl von Laserpulsen mit eher geringerer Energie günstiger. Der Bohrkanal entsteht durch hintereinander folgende Pulse, wobei im Vergleich zum Einzelpulsbohren das Loch relativ langsam ausgeformt wird. Durch die größere Pulszahl wird die Kontur geglättet und die Präzision sowie die Reproduzierbarkeit

des Prozesses steigen. Je nach Präzision und Geometrie der Bohrungen kommen verschiedene Lasertypen zum Einsatz. Den Hauptteil der Bohranwendungen decken jedoch die Festkörperlaser ab. Durch das Perkussionsbohren mit Nd:YAG- Lasern werden dabei teilweise Bohrtiefen von 10 mm und mehr erreicht.

2.2.2.3 Trepanieren

Wird dem Perkussionsbohren eine zusätzliche kreisförmige Relativbewegung zwischen der Laserstrahlachse und der Bohrungsachse überlagert, so spricht man vom *Trepanieren*. Um die kreisförmige Bewegung zwischen dem Werkstück und dem fokussierten Strahl zu erhalten, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Üblicherweise wird der Strahlversatz durch eine oder mehrere rotierende Optiken, z.B. durch eine exzentrisch rotierende Fokussieroptik oder durch rotierende Keilplatten erzeugt. Eine andere Möglichkeit ist die Strahlablenkung durch einen Laserscanner (vergl. Bild 2-3). Durch die kreisförmige Bewegung entstehen im Vergleich zum starren Perkussionsbohren deutlich rundere Bohrungen, allerdings mit größerem Durchmesser.

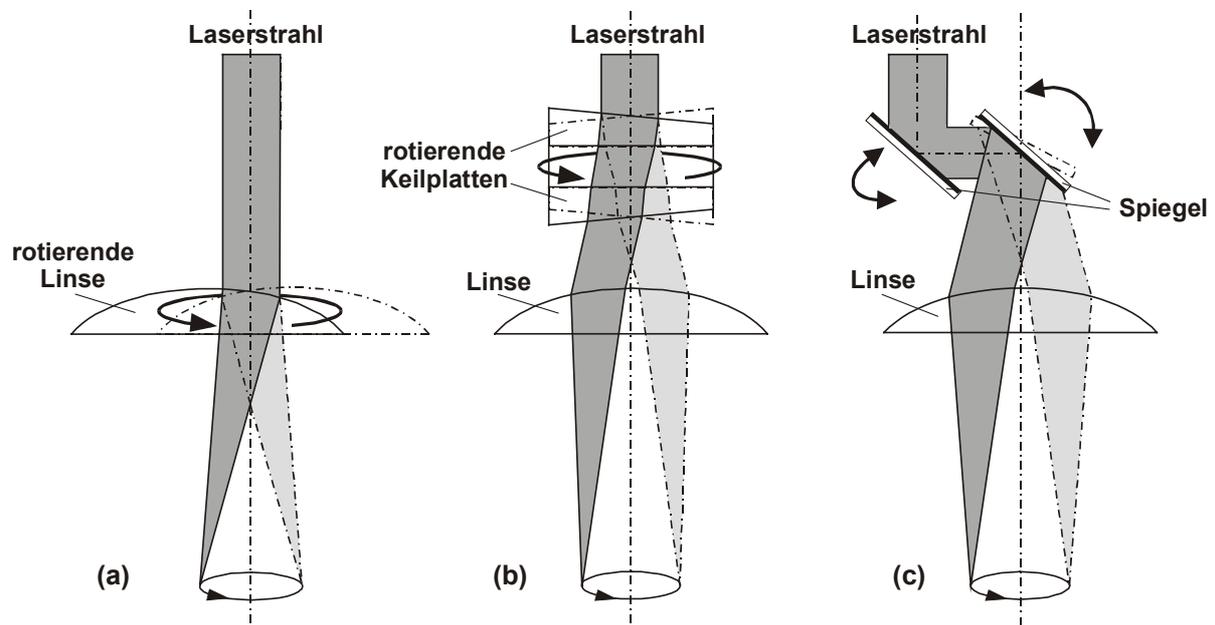


Bild 2-3: Laser-Trepanieren durch (a) eine exzentrisch rotierende Fokussieroptik, (b) durch rotierende Keilplatten oder (c) mittels Laserscanner

Ist der Durchmesser der Rotationsbewegung größer als der Fokusdurchmesser, so liegt kein eigentlicher Perkussions-Bohrprozess mehr vor, sondern es handelt sich eher um ein Ausschneiden des Bohrlochs. Der Bohrungsdurchmesser kann dann beliebig groß eingestellt werden.

Die Kreisbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück kann auch durch Bewegungen des Werkstücks erzielt werden. Dabei sind die dynamischen Anforderungen an das Handhabungssystem allerdings relativ hoch.

Beim Trepanieren gibt es verschiedene Strategien, um eine bestimmte Lochform zu erreichen. Zum Beispiel kann die Bohrung zuerst ohne Strahlbewegung vorgebohrt werden und anschließend durch den bewegten Fokus nachbearbeitet (aufgeweitet) werden. Oder das Loch wird mit kontinuierlicher Strahlbewegung auf einer wendelförmigen Bahn ausgehöhlt. Auch eine spiralförmige Bewegung des Strahls (von innen nach außen oder umgekehrt) kann günstig sein, wenn etwa eine konische Lochform erreicht werden soll.

Mit einem geeigneten Trepaniersystem ist es auch möglich gezielt ovale Lochformen herzustellen. Allerdings sind solche Lochformen eher die Ausnahme. In der Regel werden möglichst runde Bohrungen angestrebt.

2.3 Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen

Die Präzision des Laserabtrags kann durch Verkürzen der Pulsdauer erheblich verbessert werden. Der Ablationsprozess mit ultrakurzen Laserpulsen unterscheidet sich dabei wesentlich von dem mit längeren Pulsen. Aufgrund der kurzen Wechselwirkungszeit zwischen Laserpuls und dem Festkörper sind Absorption und Ablation zeitlich voneinander getrennt.

In diesem Kapitel werden die bei der Ablation mit ultrakurzen Laserpulsen ablaufenden Prozesse sowie deren Auswirkung auf die Abtragsqualität näher erläutert.

Zuvor soll auf die Erzeugung und die Nachverstärkung ultrakurzer Laserpulse eingegangen werden. Die Erzeugung von kurzen und zugleich energiereichen Laserpulsen ist im Vergleich zu den traditionellen Laserkonzepten relativ komplex. Erst seit wenigen Jahren sind vergleichsweise einfach zu bedienende Lasersysteme auf dem Markt erhältlich.

Im letzten Abschnitt des Kapitels werden schließlich einige Beispiele zur Materialbearbeitung mittels Ultrakurzpulslaser dargestellt.

2.3.1 Erzeugung und Verstärkung ultrakurzer Laserpulse

Zur Erzeugung bzw. Nachverstärkung ultrakurzer Laserpulse werden bislang überwiegend Festkörperlaser auf der Basis von Titan-dotiertem Saphir eingesetzt. Die Methoden zur Erzeugung und Verstärkung der ultrakurzen Laserpulse sind bei allen bekannten Systemen grundsätzlich ähnlich. In sog. Femtosekunden-Oszillatoren werden nach dem Prinzip der Modenkopplung kurze Pulse ($\tau < 100$ fs) mit hoher Repetitionsrate und kleinen Pulsenergien (wenige Nanojoule) erzeugt. Da die erreichte Pulsenergie für den Großteil der Anwendungen, insbesondere für die Materialbearbeitung, nicht ausreichend ist, müssen die Pulse nachverstärkt werden. Hierzu bedient man sich der sog. CPA-Technik (Chirped-Pulse-Amplification), bei der die Pulse vor der Verstärkung zunächst zeitlich gestreckt und nach der Verstärkung wieder auf die ursprüngliche Dauer komprimiert werden [MOUR97, NOLT99a]. Im folgenden Abschnitt werden die Methoden der Kurzpulserzeugung und -verstärkung näher beschrieben.

Erzeugung ultrakurzer Laserpulse

Bereits Mitte der 60er Jahre wurden die ersten Laser zur Erzeugung extrem kurzer Pulse im Subpikosekundenbereich ($\tau < 10^{-12}$ Sekunden) entwickelt. Die Erzeugung solcher Pulse wird durch die Modenkopplung ermöglicht. Dieses Prinzip ist unabhängig vom laseraktiven Medium und basiert auf einem schnellen Verschluss, der jedesmal, wenn der im Resonator umlaufende Puls auf den Verschluss trifft, geöffnet und anschließend wieder geschlossen wird. Die Modenkopplung ist auch heute noch die Basis aller Ultrakurzpulslaser, wobei im Laufe der Zeit verschiedene Methoden zur Erzeugung der Modenkopplung entwickelt wurden.

Zur Modenkopplung werden im Laserresonator durch den Verschluss eine Amplitudenmodulation und folglich Seitenbänder erzeugt. Wenn die Modulationsfrequenz gleich dem Modenabstand im Resonator ist, können auch die Seitenbänder an der Laseroszillation teilnehmen. Diese Seitenbänder werden ebenfalls moduliert, so dass alle im Verstärkungsprofil des Lasermediums möglichen Moden anschwingen.

Durch die Modulation schwingen die Lasermoden nicht unabhängig, da ihre Phasen durch den Modulator gekoppelt sind. Wenn alle Moden phasenstarr gekoppelt sind, kommt es immer nur kurz zu einer konstruktiven Interferenz aller Moden, während der Zwischenzeit interferieren die Moden destruktiv (Bild 2-4).

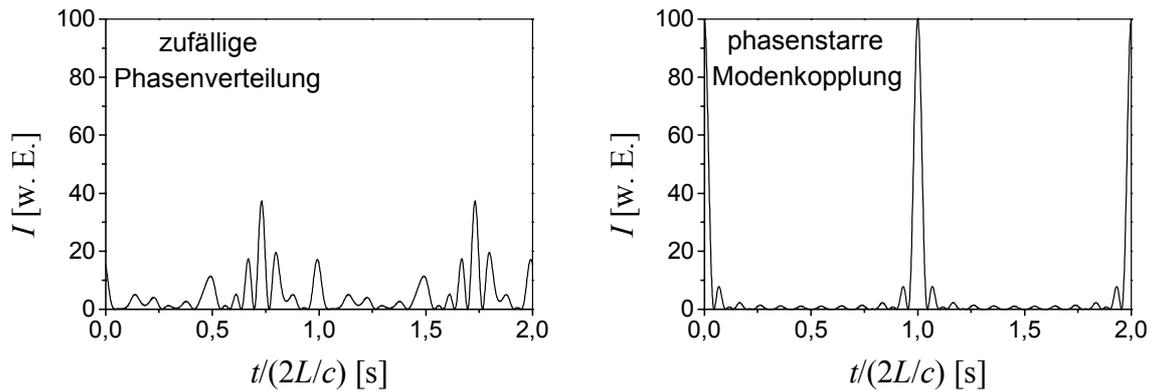


Bild 2-4 Intensitätsvariation im Resonator bei 10 Moden mit zufälliger Phasenverteilung und phasenstarrer Kopplung

In einem Laserresonator der Länge L_R können verschiedene longitudinale Moden (Eigenfrequenzen) schwingen. Bei einer Anzahl N von phasenstarr schwingenden Moden gelten für die erreichbare maximale Spitzenintensität I_{\max} und die Pulsdauer τ_L nach [BERG93] folgende Zusammenhänge:

$$I_{\max} = N^2 \cdot I_0 \quad (2.1)$$

wobei I_0 die Intensität einer einzelnen Mode ist, und

$$\tau_L = \frac{2L_R}{Nc} \quad (2.2)$$

Mit steigender Anzahl an phasengleichen Moden steigt somit die Intensität des Pulses quadratisch an, die Pulsdauer nimmt linear ab. Daher hängt die erreichbare minimale Pulsdauer in erster Linie von der Anzahl der erzeugten Moden und damit von der Breite des Verstärkungsprofils des Lasermediums ab.

Aufgrund des notwendigen breiten Verstärkungsprofils wird im Bereich der Kurzpulsoszillatoren auf Festkörperbasis häufig Titan-dotiertes Saphir (Ti:Saphir-Laser) als aktives Medium verwendet. Aber auch andere Festkörpermaterialien, wie z.B. Chrom-dotierte Medien, gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie direkt mit Diodenlasern gepumpt werden können [ISEM02].

Des Weiteren bieten bestimmte Fasern (z.B. Erbium-dotierte Fasern) ein breitbandiges Verstärkungsprofil und sind für die Modenkopplung einsetzbar.

Das Herstellen einer konstanten Phasenbeziehung zwischen den Moden kann sowohl aktiv, durch Modulatoren, als auch passiv, durch sättigbare Absorber, geschehen. Entsprechend unterscheidet man daher aktive und passive Modenkopplung. Akusto-optische Modulatoren realisieren einen schnellen Verschluss, indem in einem Kristall durch eine Schallwelle schnelle Brechungsindexänderungen hervorgerufen werden. Sättigbare Absorber (z.B. Farbstoffe oder Kerr-Medien) müssen nicht von außen gesteuert werden, sondern der Verschluss wird durch den Puls direkt aktiviert. Mit der aktiven Modenkopplung werden Pulse mit Pulsdauern bis in den Pikosekundenbereich erreicht, wohingegen mit einer passiven Modenkopplung Pulse im Femtosekundenbereich erzeugt werden können.

Mit den Kurzpulsoszillatoren auf Festkörperbasis konkurrieren verstärkt die diodengepumpte Faseroszillatoren. Faserlaser sind eine spezielle Art von Festkörperlasern und zeichnen sich insbesondere durch einen kompakten Aufbau und durch eine hohe Effizienz aus. Im Vergleich zu Freistrahlaufbauten mit Festkörperkristallen sinkt bei Faserlasern die Pumpschwelle durch die über große Wechselwirkungslängen geführten hohen Intensitäten. Zusätzlich ermöglichen Faserlaser eine breitbandige Absorption des Pumplichts sowie einen breitbandigen Laserübergang. Der Vorteil eines breitbandigen Laserübergangs liegt zum einen in einer hohen Durchstimbarkeit der Wellenlänge des Lasersystems und zum anderen, bedingt durch die große Bandbreite, in der Möglichkeit zur Erzeugung kurzer Pulse mittels Modenkopplung.

In einer dotierten, doppelt brechenden Glasfaser kann eine passive Modenkopplung realisiert werden, da es aufgrund der Doppelbrechung bei der Propagation des Laserlichts zur intensitätsabhängigen Polarisationsdrehung kommt. Dieses Prinzip wird NLPR (NonLinear Polarization Rotation) genannt. Durch Selektion einer bestimmten Polarisationsrichtung mit einem Analysator wird die dazu orthogonale Polarisation unterdrückt. Bei der Modenkopplung in der Faser besitzen die Pulsflanken wegen der intensitätsabhängigen Polarisationsdrehung eine andere Polarisation als das Pulsmaximum. Durch Unterdrückung der Pulsflanken mit dem Analysator kommt es zur Pulsverkürzung. Es findet eine periodisch wiederkehrende Pulsverkürzung des im Resonator umlaufenden Pulses statt, wodurch es zu einer Verlustmodulation kommt, bei der neue Resonatormoden phasenstarr zu den bereits bestehenden Lasermode anschwingen [HUND00].

Die Funktionsweise bei den oben genannten sättigbaren Absorbern basiert auf einer intensitätsabhängigen Absorption, wobei jeweils die Pulsflanken stärker absorbiert werden als das Pulsmaximum. Ein vergleichbares Verhalten tritt auch bei der Modenkopplung in der Faser in Kombination mit einem Polarisationsstrahlteiler auf. Transmissions- und Reflexionsrichtung sind dabei als Äquivalente zur der

Transmission und Absorption eines sättigbaren Absorbers zu sehen [ZIRN91, LOH93, HOF91].

Faseroszillatoren werden in Zukunft viele andere Kurzpulsoszillatoren-Konzepte verdrängen, da sie im Vergleich wesentlich robuster und kompakter im Aufbau sind. Als Pumpquelle für Faseroszillatoren verwendet man konventionelle Telekommunikations-Laserdioden, die sich durch eine sehr hohe Lebensdauer auszeichnen.

Verstärkung ultrakurzer Laserpulse

Um die vergleichsweise geringe Energie der kurzen Pulse eines Femtosekunden-Oszillators zu erhöhen, können diese in einem Verstärkersystem nachverstärkt werden.

Das Problem bei der Nachverstärkung sehr kurzer Laserpulse ist, dass diese nicht direkt verstärkt werden können. Die Verstärkung ist durch die Zerstörschwelle der optischen Komponenten limitiert. Die entstehenden hohen Spitzenintensitäten im Verstärkungsmedium führen zu starken Phasenverzögerungen, die wiederum zur Zerstörung der Wellenfront und zur Selbstfokussierung führen können (nichtlineare Effekte). Dadurch erfährt der Puls sowohl eine ungünstige zeitliche als auch räumliche Veränderung. Bei den zu erreichenden Pulsenergien würde die hohe Energiedichte die Zerstörung der Verstärkerkomponenten zur Folge haben.

Um diese Gefahr zu umgehen, nutzt man in Festkörperverstärkern die CPA-Technik. Bei dieser Technik werden die kurzen, breitbandigen Pulse zeitlich gestreckt, wodurch sich die Intensität soweit verringert, dass die nichtlinearen Effekte vernachlässigbar werden. Anschließend durchlaufen die gestreckten Pulse mehrfach ein Verstärkungsmedium. Nach der Verstärkung werden diese dann wieder auf die ursprüngliche Länge komprimiert.

Zum Strecken und Komprimieren nutzt man die dispersiven Eigenschaften von Gittern und Prismen. Begünstigt durch die große Bandbreite werden die Pulse spektral zerlegt, so dass die verschiedenen Spektralanteile unterschiedlich lange Wege durchlaufen. Bei der Pulsstreckung werden die Pulse so zunächst räumlich und zeitlich gedehnt, wobei die spektralen Anteile räumlich und zeitlich hintereinander liegen. Der Puls erhält einen sog. „chirp“. Um den räumlichen „chirp“ wieder aufzuheben, durchläuft der Puls den gleichen Weg über die Prismen oder Gitter zurück, während sich die Pulsdauer erneut verdoppelt.

Nach der Verstärkung des verlängerten Pulses in einem regenerativen Verstärker oder einem Multipass-Verstärker kann dieser anschließend in umgekehrter Weise

wieder komprimiert werden. Funktionsweise und Aufbau bei der Pulsstreckung und Pulskomprimierung sind also prinzipiell identisch.

Der Verstärkerresonator besteht im Wesentlichen aus hochreflektierenden Endspiegeln, dem Verstärkerkristall und einer Pockelszelle. Durch die Pockelszelle kann die Polarisationsrichtung der im Resonator umlaufenden Pulse schnell verändert (gedreht) werden. Über die Brewster-Endfläche des Verstärkerkristalls oder über einen sich im Resonator befindlichen Polarisationsstrahlteiler können so die Laserpulse ein- und ausgekoppelt werden. Die zur Verstärkung der Pulse erforderliche Energie wird von einem Pumplaser geliefert. Die Schaltfrequenz sowie die Schaltzeitpunkte der Pockelszelle sind dabei der Repetitionsrate des Pumplasers angepasst.

In Bild 2-5 ist das Prinzip der Erzeugung kurzer, intensiver Pulse dargestellt. Die vom Femtosekunden-Oszillator erzeugten Pulse haben typischerweise eine Pulsdauer von $\tau = 30$ bis 150 fs, bei einer Pulsenergie von nur wenigen 10 Nanojoule. Durch die zeitliche Streckung im „Stretcher“ verlängert sich die Pulsdauer auf etwa $\tau = 200$ bis 400 ps. Nach etwa 10 bis 20 Umläufen im Verstärkerresonator kann die Pulsenergie auf mehrere Millijoule erhöht werden. Bei der anschließenden Komprimierung im „Kompressor“ treten zwar relativ hohe Energieverluste von bis zu 50% auf, dennoch gelingt es durch diese Technik kurze Pulse von 30 bis 150 fs mit Pulsenergien von 1 bis 2 mJ zu erzeugen.

Eine detaillierte Beschreibung der CPA-Technik geben u.a. [STR185, NOLT99a].

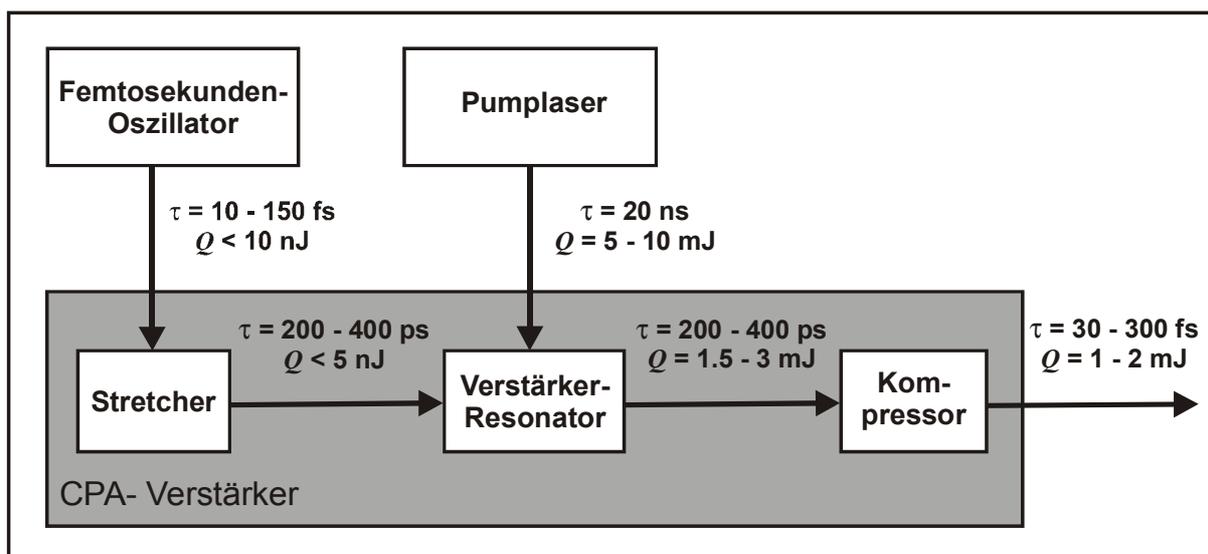


Bild 2-5 Schematische Darstellung der Chirped-Pulse-Verstärkungstechnik

2.3.2 Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen

Zur theoretischen Beschreibung der Ablation fester Materialien durch intensive Laserpulse finden sich eine Vielzahl von Abhandlungen in der Literatur. Auch zur Materialbearbeitung mit kurzen bzw. ultrakurzen Laserpulsen wurden bereits verschiedene theoretische Modelle erarbeitet und durch experimentelle Untersuchungen bestätigt [CARU69, KAUT96, CHIC96, KONO97, LIND97, HERT01]. Allerdings sind immer noch eine ganze Reihe von Fragen ungeklärt, so dass im Hinblick auf eine geschlossene theoretische Beschreibung der ablaufenden Prozesse noch großer Forschungsbedarf besteht.

Nach bisherigem Wissensstand kann die durch einen Laserpuls hervorgerufene Ablation an einem metallischen Festkörper in Kurzform wie folgt beschrieben werden: Trifft ein Laserpuls auf eine Metalloberfläche, so nehmen die freien Elektronen die Strahlungsenergie durch inverse Bremsstrahlung auf. Die absorbierte Energie wird durch Wärmeleitung in das Materialinnere transportiert und auf das Festkörpergitter übertragen. Bei hinreichend hohen Intensitäten kann dies dazu führen, dass das Material von der Oberfläche verdampft oder in schmelzflüssiger Form abgelöst wird.

Herkömmliche gepulste Laser mit relativ langen Pulsdauern im Nano-, Mikro- oder Millisekundenbereich und entsprechend langer Wechselwirkungsdauer zwischen dem Laserpuls und dem Festkörper stoßen bei der Ablation bezüglich der erreichbaren Genauigkeit, Strukturgrößen und Reproduzierbarkeit an ihre Grenzen. Die wesentlichen Gründe dafür sind die vergleichsweise langsame Aufheizung des Materials sowie die Tatsache, dass Absorption und Ablation mehr oder weniger gleichzeitig stattfinden.

Bei diesen längeren Pulsdauerregimen wird zunächst die Festkörperoberfläche bis zur Schmelztemperatur und dann bis zur Verdampfungstemperatur aufgeheizt. Während des Wechselwirkungsprozesses erfolgt ein signifikanter Energieverlust durch Wärmeleitung in den Festkörper, so dass es unvermeidlich zu einer großen thermisch beeinflussten Zone kommt.

Da die Größe der thermisch beeinflussten Zone in erster Linie von der Dauer des Wechselwirkungsprozesses abhängt, ergibt sich daraus, dass mit sinkender Pulsdauer die Präzision des Materialabtrags steigt. Je kürzer die Wechselwirkungsdauer zwischen Puls und Material ist, desto weniger Wärme bleibt im Festkörper zurück, um dort unerwünschte Nebeneffekte hervorzurufen. Solche unerwünschten Nebeneffekte sind z.B. Schmelzschichten, Gratbildung am Rand der Struktur, anhaftende Ablagerungen auf der Materialoberfläche, Veränderungen der Gefügestruktur in größeren Tiefen sowie Rissbildungen infolge von wärmeinduzierten Spannungen im Festkörpergefüge oder von Schockwellen.

Betrachtet man den gesamten für die Materialbearbeitung verfügbaren Pulsdauerbereich, beginnend im Millisekundenbereich bis hin zu wenigen zehn Femtosekunden, so kann festgestellt werden, dass beim Übergang vom unteren Pikosekundenbereich zum Femtosekundenbereich der gravierendste Sprung in der erreichbaren Qualität der Strukturen zu verzeichnen ist. Der Grund dafür ist, dass sich in diesem (ultrakurzen) Zeitregime die Wechselwirkungen zwischen Laserpuls und Festkörper grundsätzlich von denen in längeren Zeitregimen unterscheiden.

Wird ein Festkörper mit einem ultrakurzen Laserpuls von einer Dauer im Subpikosekundenbereich bestrahlt, so gewinnt die Reihenfolge der ablaufenden Prozesse an Bedeutung. Die Absorption der Energie durch die freien Elektronen im Leitungsband führt zu einer kurzfristig stark erhöhten Elektronentemperatur. Während die Elektronentemperatur aufgrund der geringen spezifischen Wärme des Elektronengases fast instantan der Anregung folgt, ist die Aufheizung des Gitters (Phononen) durch Elektronen-Phononen-Stöße wegen des großen Masseunterschieds ein vergleichsweise langsamer Prozess, der sich auf der Zeitskala einiger Pikosekunden abspielt. Es kommt also zunächst zu einem extremen Ungleichgewichtszustand. Die Ablation der Materials findet erst nach vollständiger Absorption der Laserenergie statt. Somit sind Absorption und Ablation zwei zeitlich getrennte Prozesse. Eine Wechselwirkung zwischen Ablationsplasma und einfallender Strahlung findet nicht statt.

Die theoretische Beschreibung der Energieübergabe des angeregten Elektronensystems an das Phononensystem erfolgt üblicherweise durch zwei gekoppelte Wärmegleichungen, das sogenannte „Zwei-Temperatur-Modell“. Dieses Modell bietet die Möglichkeit der theoretischen Darstellung der im Metall ablaufenden Prozesse von der Absorption bis hin zum Verdampfungsprozess auf Zeitskalen einiger hundert Femtosekunden bis zu mehreren Pikosekunden [ANIS74, ANIS92, CHIC96]. Die gesamte, zeit- und ortsabhängige Energiebilanz des Prozesses schließt die Aufheizung der Elektronen als Quellterm mit ein, sowie den Gradienten des Wärmestroms, der nach dem Fourier'schen Gesetz berechnet werden kann.

Im eindimensionalen Fall lauten die Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} &= -\frac{\partial Q_F(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_p) + S, \\
 C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} &= \gamma(T_e - T_p), \\
 Q_F(z) &= -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z}.
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Hierbei bezeichnen C_e und C_p die Wärmekapazitäten (pro Volumeneinheit) der Elektronen bzw. der Phononen, T_e und T_p die Elektronen- bzw. Gittertemperatur und z die Richtung senkrecht zur Festkörperoberfläche. $S = I(t)A_s\alpha \exp(-\alpha z)$ ist die durch den Laserpuls ins Elektronengas eingebrachte Energie pro Zeit und Volumen, wobei α der Absorptionskoeffizient ist und $I(t)A_s = I(t)(1-R)$ die im Material vorliegende Intensität der Strahlung bezeichnet, welche sich aus der auftreffenden Intensität $I(t)$ und der Reflektivität R des Metalls ergibt. $Q_F(z)$ ist der Wärmefluss und k_e die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen. Der Parameter γ bezeichnet die Elektronen-Phononen-Kopplungskonstante.

Aus den Gleichungen (2.3) ergeben sich zwei charakteristische Zeiten, $\tau_e = C_e/\gamma$ die Abkühlzeit der Elektronen, und $\tau_p = C_p/\gamma$, die Aufheizzeit der Phononen. Diese liegen für Metalle typischerweise in der Größenordnung von $\tau_e \approx 100$ fs - 1 ps und $\tau_p \approx 0,1$ - 1 ns [NOLT99a]. Da die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen sehr viel größer ist als die der Phononen, kann in der Regel für Laserpulsdauern im Femtosekundenbereich ($\tau_L \ll \tau_p$) der Wärmeleitungsterm der Phononengleichung im Gleichungssystem (2.3) vernachlässigt werden.

Solange die Wärmeeindringtiefe l_{th} deutlich kleiner als die optische Eindringtiefe δ ist (optische Eindringtiefe = Kehrwert des Absorptionskoeffizienten), d.h. wenn

$$l_{th} = (D\tau_e)^{1/2} \ll \delta = \alpha^{-1} \quad (2.4)$$

gilt (D ist die thermische Diffusivität des Metalls), dann kann die Wärmeleitung durch die Elektronen ebenfalls vernachlässigt werden.

Dadurch reduziert sich die Differentialgleichung (2.3) zu

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = I(t)A_s\alpha \exp(-\alpha z) . \quad (2.5)$$

Bei konstanter Intensität $I(t) = I_0$ ergibt die Gleichung (2.5) nach [CHIC96] folgende Lösung:

$$T_e(t) = \sqrt{\frac{2I_0\alpha}{C_e'}} t \cdot \exp(-\alpha z) \quad (2.6)$$

mit

$$C_e' = \frac{\pi^2}{2} \frac{n_e k_B^2}{E_F} . \quad (2.7)$$

Dabei bezeichnen I_a die absorbierte Intensität, n_e die Elektronendichte, k_B die Boltzmannkonstante und E_F die Fermi-Energie.

Da die Elektronen nach Ende des Laserpulses relativ schnell nahezu ihre gesamte Energie auf das Festkörpergitter übertragen, ergibt sich die maximal erreichbare Gittertemperatur nach [MOMM97a] zu

$$T_p \approx \frac{H_a \alpha}{C_p} \exp(-\alpha z) , \quad (2.8)$$

Dabei ist H_a die absorbierte Energiedichte.

Ein Materialabtrag findet statt, wenn die deponierte Energiemenge größer ist als die Verdampfungsenergie, also wenn $C_p T_p \geq \rho \Omega$ (ρ bezeichnet die Dichte und Ω die spezifische Verdampfungsenergie pro Einheitsmasse). Mit (2.8) lässt sich diese Bedingung umschreiben zu

$$H_a \geq H_{th} \exp(\alpha z) , \quad (2.9)$$

wobei $H_{th} = \rho \Omega / \alpha$ die Schwellenenergiedichte für das Verdampfen mit Femtosekundenpulsen bezeichnet. Im Gegensatz zur Ablation mit längeren Laserpulsen im Nanosekundenbereich und darüber hinaus, bei der die Schwellenenergiedichte von der Wurzel der Pulsdauer abhängt ($H_{th} \sim (D \tau_L)^{1/2}$), ist diese für Femtosekundenpulse pulsdauerunabhängig [STUA96].

Das Auflösen der Gleichung (2.9) nach z ergibt folgenden logarithmischen Zusammenhang zwischen der Ablationstiefe L und der Laserenergiedichte H_a :

$$L \approx \alpha^{-1} \ln \left(\frac{H_a}{H_{th}} \right) . \quad (2.10)$$

Durch Vernachlässigung der Wärmeleitung erhält man somit eine einfache mathematische Beschreibung für die Abtragstiefe bei der Bestrahlung mit ultrakurzen Laserpulsen. Diese Beschreibung ist jedoch nur für vergleichsweise niedrige Laserenergiedichten zulässig. Bei höheren Energiedichten muss die Wärmeleitung berücksichtigt werden, da die Thermalisierung des Elektronensystems dann schneller abläuft. Dieser Fall wird später noch ausführlicher diskutiert.

Bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen wirkt sich die zeitliche Trennung der Teilprozesse sehr günstig auf die Präzision der entstehenden Struktur aus. Der einfallende Laserpuls tritt nicht in Wechselwirkung mit dem ablatierten Material (Ablationsplasma), die Energie kann daher viel effektiver in das zu bearbeitende Material eingebracht werden. Außerdem entsteht kein nennenswerter Energieverlust durch Diffusion ins umliegende Material. Dadurch wird die Ablationsschwelle reduziert, der Abtrag ist sehr präzise und vor allem extrem reproduzierbar.

Dieser entscheidende Vorteil der ultrakurzen Laserpulse kann nicht nur bei metallischen Werkstoffen festgestellt werden. Auch bei transparenten Materialien ist mit extrem kurzen Laserpulsen eine exakte Bearbeitung möglich. Die Einkopplung der Energie in eigentlich nicht absorbierende Stoffe wie Dielektrika mit großer Bandlücke wird durch die hohe Intensität der Pulse ermöglicht. Bei dielektrischen Materialien werden nichtlineare optische Prozesse wie Multiphotonenabsorption initiiert, wodurch freie Elektronen im Leitungsband erzeugt werden, die den Isolator in einen metallischen Zustand versetzen. Wenn ausreichend freie Elektronen zur Verfügung stehen, kann die weitere Absorption der Laserstrahlung analog der Absorption in Metallen beschrieben werden.

In verschiedenen Untersuchungen zur Materialbearbeitung konnte bereits der enorme Qualitätsgewinn beim Abtragen mit ultrakurzen Pulsen bestätigt werden [AMEE98, IHLE95, KAUT94, KÖRB02, KRÜG99, KRÜG96, LENZ98, MOMM97a, MOMM98, OSTE00a, NOLT99b, PERR99, SHIR98, SIMO97, TÖNS99b, WAGN02]. Dabei konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung von Femtosekunden-Laserstrahlung eine praktisch schädigungsfreie Materialbearbeitung aller Materialien möglich ist. Im Vergleich zu der konventionellen Lasermaterialbearbeitung ist eine deutliche Präzisionssteigerung zu verzeichnen, wie am Beispiel der in Bild 2-6 dargestellten Strukturen zu erkennen ist.

Die Strukturen, die durch ultrakurze Pulse erzeugt wurden (Bild links), zeichnen sich durch relativ scharfe Kanten aus. Es gibt keinerlei Hinweis auf eine geschmolzene Schicht. Bei der Verwendung längerer Pulse (Bild rechts) verhindert die entstehende Schmelzphase die Scharfkantigkeit der Struktur. Das anhaftende, geschmolzene und wiedererstartete Material reduziert die Reproduzierbarkeit solcher feinen Strukturen.

Die in diesem Kapitel dargestellten Mikroschnitte und Mikrobohrungen in Edelstahl (Bild 2-6 bis Bild 2-8) wurden im Rahmen dieser Arbeit hergestellt.

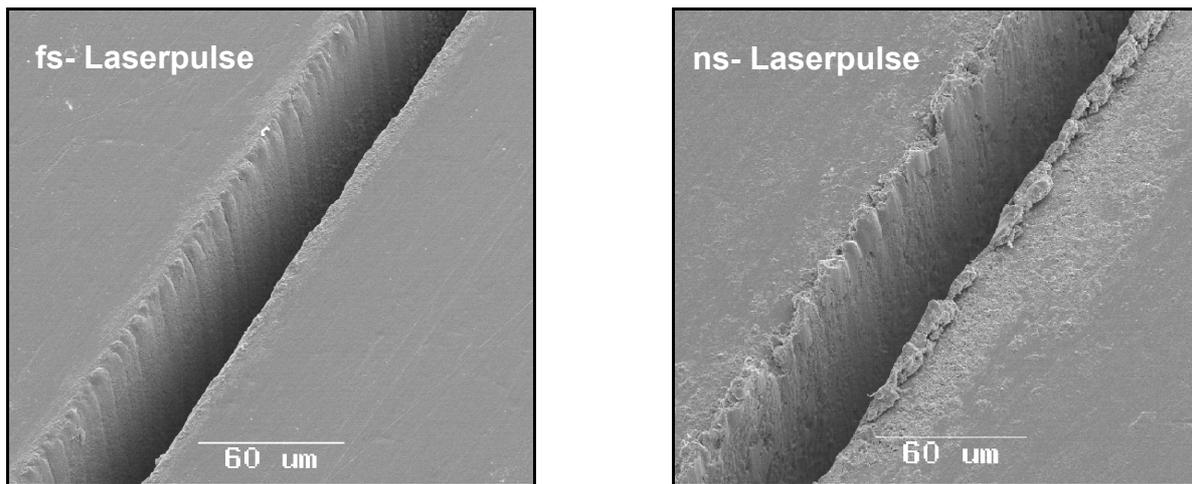


Bild 2-6 Mikroschnitte in Edelstahl erzeugt durch fs-Laserpulse (links) und ns-Laserpulse (rechts). Laser: Ti:Saphir, $\lambda = 775 \text{ nm}$

Es gibt allerdings auch bei der Ultrakurzpulsbearbeitung günstige und weniger günstige Bedingungen, so dass z.B. nicht jede Energiedichte der Laserstrahlung bei jedem Material die gleiche Bearbeitungsqualität bewirkt. Insbesondere bei metallischen Werkstoffen hat sich gezeigt, dass es je nach Material einen bestimmten Energiedichtebereich gibt, in dem die Ablation am schädigungsärmsten abläuft. Erreicht die Energiedichte zu hohe Werte, kann es trotz der kurzen Pulsdauer zu unerwünschten Auswirkungen kommen.

Nach [MOMM97b] können bei der Ablation mit ultrakurzen Pulsen an metallischen Festkörpern zwei Energiedichteregime unterschieden werden. Ist die Energiedichte vergleichsweise gering (bei Metallen typischerweise $H < 0,5 \text{ J/cm}^2$), so findet die Ablation in einer relativ dünnen (einige 10 nm), der optischen Eindringtiefe entsprechenden Schicht, statt. Thermische Diffusionseffekte über die Eindringtiefe hinaus sind vernachlässigbar. Bei geringen Energiedichten ist die Ablationsrate, also die Ablationstiefe pro Laserpuls, entsprechend klein.

Bei sehr hohen Energiedichten (mehrere 10 J/cm^2) werden die Elektronen innerhalb der optischen Eindringtiefe des Laserpulses zunächst auf extrem hohe Temperaturen aufgeheizt. Zusätzlich werden überthermische Elektronen mit Energien bis in den MeV-Bereich erzeugt. Dies hat zur Folge, dass durch anschließende Diffusion dieser heißen Elektronen eine sehr tief reichende Energiedeposition in den Festkörper möglich ist und somit sehr hohe Abtragsraten pro Puls realisierbar sind. Die Ablationstiefe ist also in diesem Fall größer als die optische Eindringtiefe. Bei sehr

hohen Energiedichten können Ablationsraten a_p von bis zu 30 μm pro Puls erreicht werden [MOMM96].

Die Diffusion über die optische Eindringtiefe hinaus kann auch als Wärmefront bezeichnet werden, die vor der Ablationsfront in das Material eindringt. Ist der Abstand zwischen den Fronten groß genug, dann befindet sich das Material in diesem Bereich im geschmolzenen Zustand. Die Plasmaausbreitung und die einsetzende Verdampfung des Materials erzeugen einen so großen Ablationsdruck, dass die Schmelze aus der Kontur gedrückt wird. In diesem Energiedichteregime kann es also durchaus auch zur Erzeugung einer Schmelzschicht kommen, wodurch sich das Bearbeitungsergebnis dann nur noch wenig von dem bei längeren Pulsen unterscheidet.

Bild 2-7 zeigt die elektronenmikroskopischen Aufnahmen von zwei verschiedenen Mikrobohrungen in Stahl. Beide Bohrungen wurden mit einem Ti:Saphir-Laser im Nanosekundenbetrieb (Pulsdauer $\tau \approx 20$ ns) erzeugt. Das Bild links zeigt eine Bohrung, die mit vergleichsweise hoher Energiedichte ($H = 100$ J/cm²) erzeugt wurde. Deutlich ist die Schmelzbildung zu erkennen, die am Lochrand als Grat erstarrt.

Das rechte Bild zeigt eine Bohrung, die ebenfalls mit Nanosekundenpulsen erzeugt wurde, allerdings bei kleiner Energiedichte ($H = 0,5$ J/cm²). Auch hier ist ein Schmelzrand zu erkennen, jedoch bildet sich dieser wesentlich geringer aus als bei hohen Energiedichten.

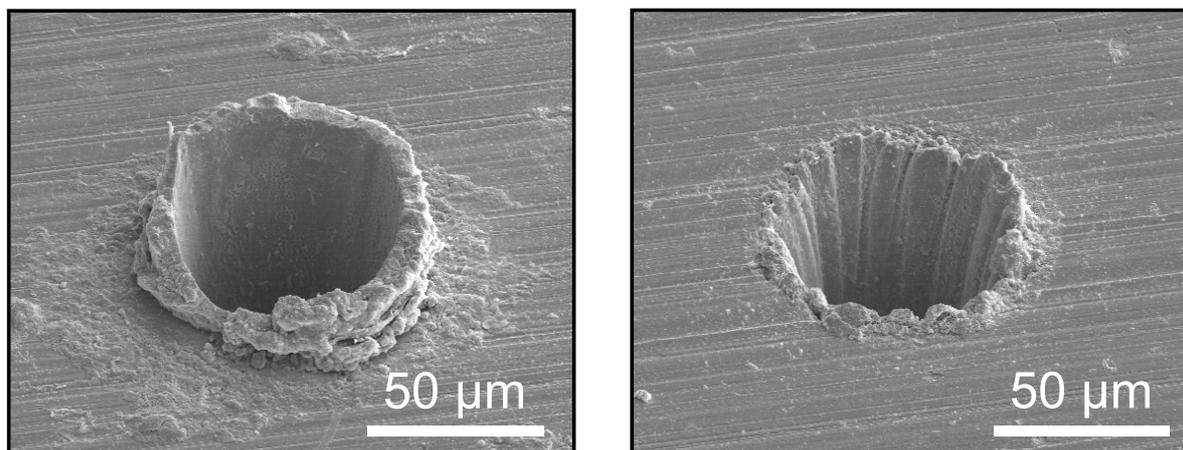


Bild 2-7 Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Mikrobohrungen in Stahl, Lochdurchmesser ca. 80 μm , Laser Ti:Saphir, $\tau = 775$ nm
Bild links: $\tau = 20$ ns, $H = 100$ J/cm², $n = 1000$ Pulse
Bild rechts: $\tau = 20$ ns, $H = 0,5$ J/cm², $n = 1000$ Pulse

In Bild 2-8 sind zwei Bohrungen dargestellt, die mit Femtosekundenpulsen ($\tau = 150$ fs) erzeugt wurden. Auch hier wurden die Bohrungen bei unterschiedlichen Energiedichten gebohrt. Für die Bohrung im Bild links wurde eine deutlich höhere Energiedichte verwendet als für die Bohrung im rechten Bild.

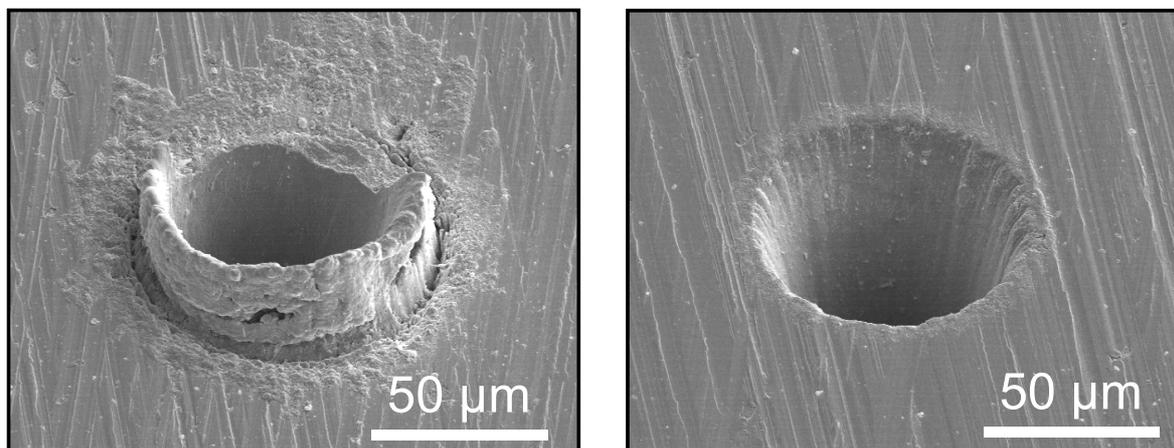


Bild 2-8 Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Mikrobohrungen in Stahl, Durchmesser ca. $80 \mu\text{m}$, Laser Ti:Saphir, Wellenlänge 775 nm
Bild links: $\tau = 150 \text{ fs}$, $H = 100 \text{ J/cm}^2$, $n = 1000$ Pulse
Bild rechts: $\tau = 150 \text{ fs}$, $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$, $n = 1000$ Pulse

Zum besseren Vergleich wurden die gleichen Energiedichten wie bei den Experimenten mit Nanosekundenpulsen verwendet. Es ist zu erkennen, dass bei hoher Energiedichte eine starke Gratbildung hervorgerufen wird, ähnlich wie bei den Bohrungen, die mit Nanosekundenpulsen erzeugt wurden. Nur wenn die Energiedichte niedrigere Werte annimmt ($H = 0,5 \text{ J/cm}^2$), entstehen durch ultrakurze Pulse die gewünschten schädigungsarmen Strukturen, wie in Bild 2-8 rechts dargestellt.

Die Tatsache, dass sich bei der Ablation mit ultrakurzen Pulsen im Sub-Pikosekundenbereich zwei Energiedichtebereiche unterscheiden lassen, wurde sowohl theoretisch als auch durch umfangreiche Experimente mit verschiedenen Materialien bewiesen [NOLT99a].

Ausgehend vom eindimensionalen Zwei-Temperatur-Modell (siehe Gleichung 2.3) für metallische Werkstoffe können für die Ablationstiefe zwei Fälle unterschieden werden. Ist die absorbierte Energiedichte gering, so kann die

Elektronendiffusionslänge l gegenüber der optischen Eindringtiefe δ vernachlässigt werden. Für diesen Fall zeigt die Ablationstiefe pro Puls L als Funktion der absorbierten Energiedichte H_a eine logarithmische Abhängigkeit mit der optischen Eindringtiefe δ als charakteristische Länge (vergl. Gleichung 2.10):

$$L \approx \delta \ln \left(\frac{H_a}{H_{th}^\delta} \right) \quad (l \ll \delta) \quad . \quad (2.11)$$

Ist die absorbierte Energiedichte sehr hoch, so ist die Diffusionslänge der aufgeheizten Elektronen deutlich größer als die optische Eindringtiefe. In diesem Fall gibt es einen anderen logarithmischen Zusammenhang, wobei die charakteristische Diffusionslänge l in den Vordergrund tritt:

$$L \approx l \ln \left(\frac{H_a}{H_{th}^l} \right) \quad (l \gg \delta) \quad . \quad (2.12)$$

Bild 2-9 zeigt experimentell ermittelte Ablationstiefen für verschiedene Energiedichten.

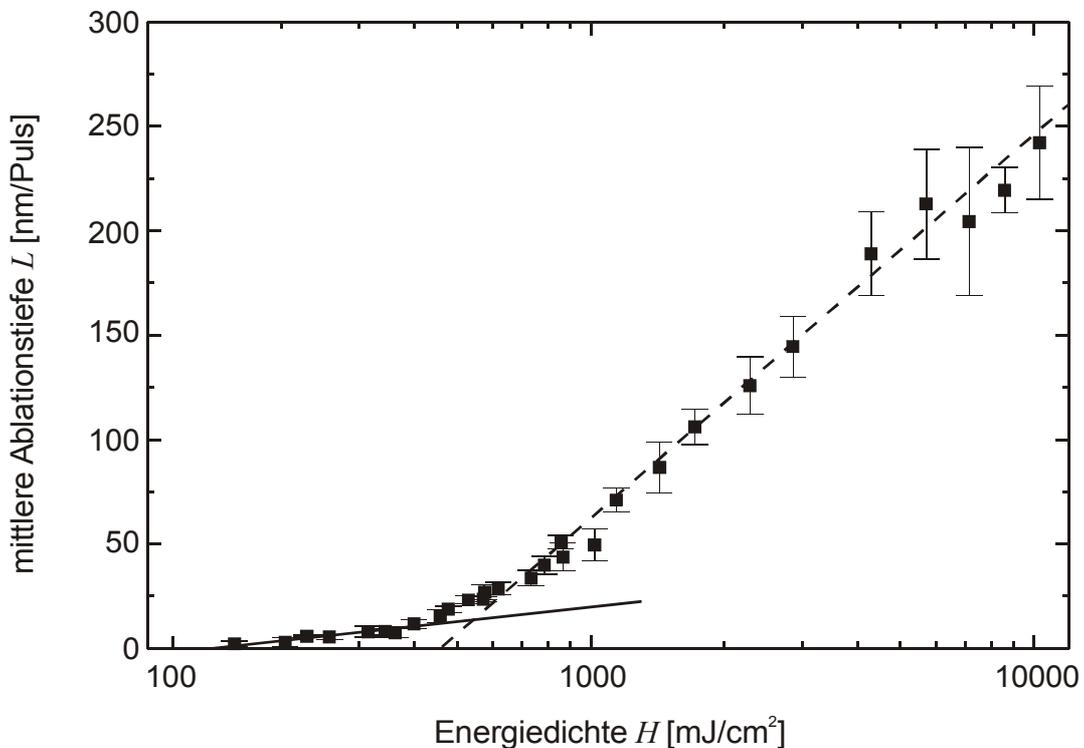


Bild 2-9 Ablationstiefe L in Abhängigkeit von der Energiedichte H für ultrakurze Laserpulse bei $\lambda = 780$ nm und $\tau = 150$ fs [NOLT99a]

Die dargestellten Ablationsversuche wurden an Kupfer durchgeführt. Kupfer gehört aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit und seiner geringen Schmelztemperatur zu den problematischen Werkstoffen für die Laser-Mikrobearbeitung.

In der Graphik sind die verschiedenen Ablationstiefen für Pulse mit einer Dauer von $\tau = 150$ fs bei einer Wellenlänge von $\lambda = 780$ nm dargestellt. Deutlich sind die beiden theoretisch ermittelten logarithmischen Zusammenhänge zu erkennen. Folglich können zwei Ablationsregime definiert werden. Beide Ablationsregime finden in der Materialbearbeitung ihre Anwendung. Höhere Energiedichten werden verwendet, wenn ein effizienter Abtrag erreicht werden soll während niedrigere Energiedichten dann verwendet werden, wenn der Abtrag präzise sein soll.

2.3.3 Anwendungsbeispiele

Die Materialbearbeitung mit ultrakurzen Pulsen kann bei allen Materialien Anwendung finden, wodurch sie sich als universelle Mikrobearbeitungsmethode qualifiziert. In der Literatur finden sich eine große Zahl an Beispielen für die Bearbeitung von metallischen, dielektrischen oder auch organischen Werkstoffen. So wurden beispielsweise verschiedene Hart- und Leichtmetalle, Gläser und Keramiken, menschliches Gewebe, wie z.B. Haut oder Zahnmaterial, Diamant, Silizium und auch plastischer Sprengstoff bearbeitet [PERR99, NOLT99d, HAFE99, VARE98, ASHK98, BANK00, PROP01, KÖRB02, KAUT94]. Kein anderes Mikroverfahren kann für ein vergleichbar weites Materialspektrum eingesetzt werden. Dadurch eröffnet sich ein sehr großes Anwendungsfeld für konkrete industrielle Applikationen. Für den Femtosekundenlaser wird es in Zukunft neue Aufgaben überall dort geben, wo sehr feine und reproduzierbare Strukturen benötigt werden, insbesondere in thermisch sensiblen Werkstoffen.

Weltweit laufen bereits zahlreiche Forschungsarbeiten im Hinblick auf industrielle Einsatzmöglichkeiten der Ultrakurzpuls-Laser. Zum Beispiel gibt es sehr vielversprechende Untersuchungsergebnisse bei der Herstellung von feinen medizinischen Implantaten (Gefäßwandstützen). Hierbei werden verschiedene Materialien verwendet und deren Verträglichkeit im lebenden Organismus getestet. Da in Zukunft sehr temperaturempfindliche, bioresorbierbare Polymere eingesetzt werden sollen, ist der Femtosekundenlaser das einzige Werkzeug, mit dem die fein strukturierten Bauteile schadigungsarm hergestellt werden können. Nachbearbeitungsschritte sind dabei nicht notwendig [NOLT99a, MOMM99].

Auch im Bereich der Mikroelektronik zeigt der Femtosekundenlaser sein Potential. Bei der Herstellung von Mikrochips aus Silizium werden die Chips in größerer

Stückzahl auf sog. Wafern produziert, so dass diese später aus dem Wafer herausgetrennt werden müssen. Bisher erfolgt das Vereinzeln der Mikrochips durch mechanische Trennscheiben. Allerdings gibt es einen starken Trend zu immer dünnerem Wafermaterial, das nicht mehr ohne Bruchgefahr mechanisch getrennt werden kann. Neueste Untersuchungen zeigen, dass hier der Femtosekundenlaser in Zukunft als Trennwerkzeug eine Alternative sein kann [TÖNS03, WAGN02].

Eine spezielle Form der Materialbearbeitung ist die Veränderung von Materialeigenschaften in transparenten Werkstoffen. Mittels extrem kurzer Laserpulse können im Inneren eines transparenten Festkörpermateriale Eigenschaften, wie z.B. die Änderung des Brechungsindex, vorgenommen werden. Dadurch lassen sich Wellenleiter in Gläsern oder Kristallen erzeugen, in denen Laserstrahlen gezielt gelenkt oder überlagert werden können (integrierte Optiken) [WILL02].

Der gleiche Effekt wird bei der 2-Photonen-Stereolithographie genutzt. Durch Aushärten von einzelnen, sehr kleinen Volumenelementen durch den fokussierten, ultrakurzen Laserpuls, lassen sich aus einem flüssigen, transparenten Polymer dreidimensionale Mikrostrukturen erzeugen. Mit Hilfe eines 3D-Laserscanners können so relativ einfach Prototypen mit Mikrometeregenauigkeit, beispielsweise Bauteile für die Mikroelektronik, hergestellt werden [SERB03].

Weiterhin gibt es Aktivitäten bei der direkten medizinischen Anwendung von Ultrakurzpulslasern, wie z.B. in der Augenheilkunde. Die minimal invasive Behandlung durch die extrem kurzen Lichtimpulse bieten u.a. Vorteile bei der Glaukom-Behandlung (Grüner Star) oder Katarakt-Operation (Grauer Star). Ebenso lassen sich Fehlsichtigkeiten korrigieren, indem Teile der Kornea nach der LASIK-Methode herausgetrennt werden, wobei das umliegende Gewebe thermisch und mechanisch unversehrt bleibt [LUBA03, HEIS02].

In der Zahnheilkunde könnte der Femtosekundenlaser bald den mechanischen Bohrer, zumindest zum Entfernen kleiner Volumen, ersetzen, denn eine mechanische „Dental-Turbine“ verursacht häufig unerwünschte Abplatzungen und Mikrorisse im gesunden Zahnmaterial. Mit dem Laser können kariöse Stellen wesentlich schädigungsärmer entfernt werden [NOLT99a].

Auch für die Erzeugung von Strukturgrößen im Sub-Mikrometerbereich wird der Femtosekundenlaser erprobt. Durch die scharf definierte Ablationsschwelle beim Abtragen mit extrem kurzen Laserpulsen ist es möglich, Strukturgrößen unterhalb des Beugungslimits der Laserstrahlung zu erzielen. Feinste Abträge im Sub-

Mikrometerbereich werden beispielsweise bei der Reparatur von Lithographie-Masken benötigt [KORT99].

In Bild 2-10 ist eine Auswahl von Mikrobearbeitungsergebnissen dargestellt, die mittels Femtosekundenlaser in unterschiedlichen Materialien hergestellt wurden. Man erkennt, dass die Qualität der Bearbeitung für alle Materialien vergleichbar ist. Für die dargestellten Anwendungen wurde jeweils ein fs-Ti:Saphir-Laser eingesetzt. Die Wellenlänge und die Pulsdauer des Laserlichts sind in allen Fällen gleich. Lediglich in der Intensität und der Bearbeitungstechnik unterscheiden sich die einzelnen Anwendungen. Eine Nachbearbeitung der Strukturen wurde nicht durchgeführt.

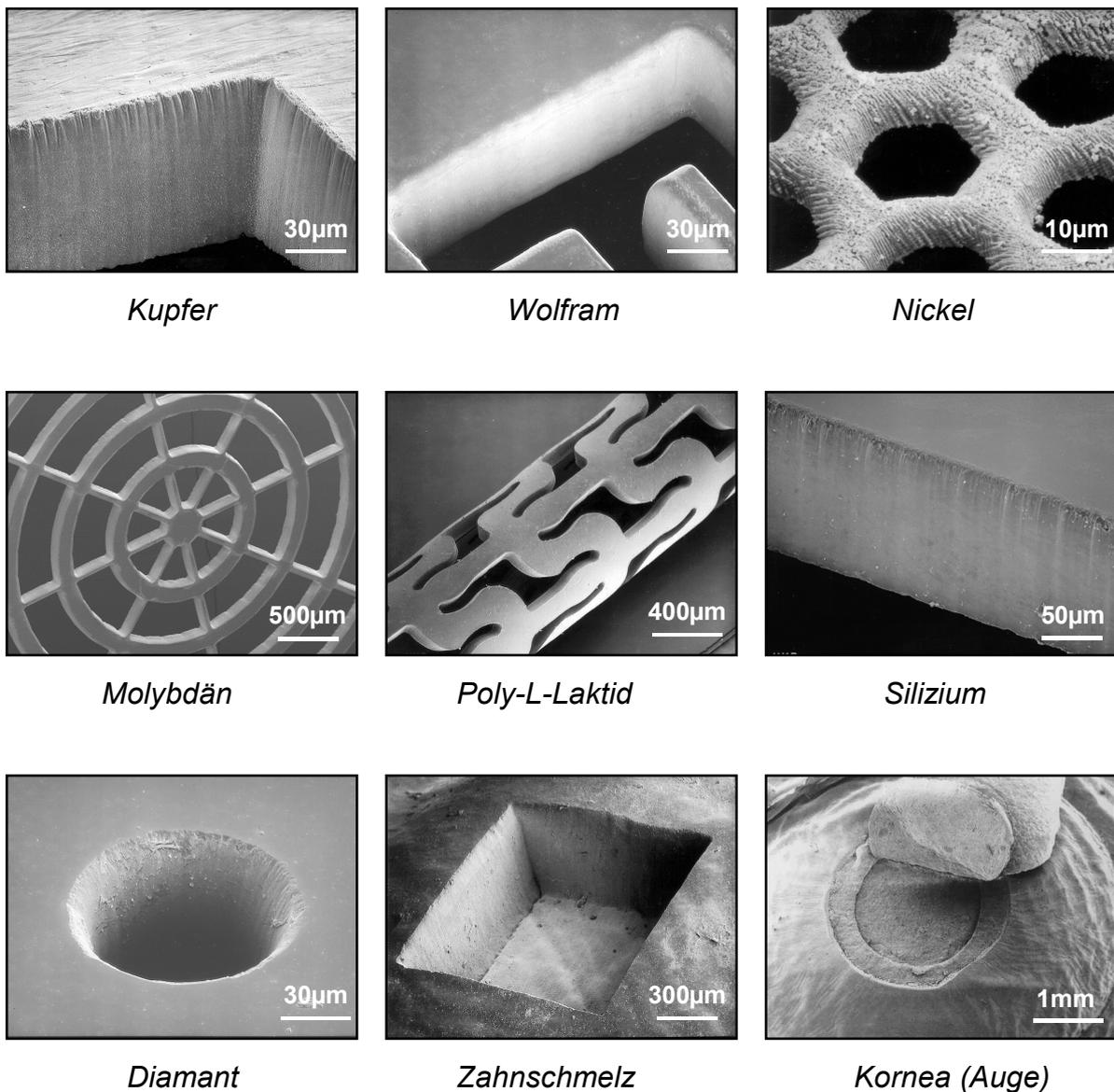


Bild 2-10 Bearbeitungsbeispiele an verschiedenen Materialien

3 Aufgabenstellung

Das enorme Potenzial der Ultrakurzpuls-Lasertechnik für die abtragende Materialbearbeitung konnte bereits eindrucksvoll aufgezeigt werden. Auch für das präzise Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen gibt es erste Ergebnisse, die darauf hinweisen, dass der Übergang in ein extrem kurzes Pulsdauerregime erhebliche Vorteile bietet. Die bislang zum Laserbohren eingesetzten Bohrverfahren führen, auch bei der Verwendung von Ultrakurzpuls-Lasern, jedoch nicht zur notwendigen Präzision und Reproduzierbarkeit der Bohrergebnisse. Es fehlen ein geeignetes Bohrverfahren sowie umfassende Untersuchungen zum tieferen Verständnis der Wechselwirkungsprozesse, die während des Bohrvorgangs stattfinden. Insbesondere beim Erzeugen von vergleichsweise tiefen Mikrobohrungen (Aspektverhältnis >10) im Durchmesserbereich von $d = 0,1 \text{ mm} - 0,2 \text{ mm}$ in metallischen Werkstoffen, wie sie für eine Vielzahl von Anwendungen benötigt werden, gibt es noch ein großes Forschungsdefizit. Es ist bekannt, dass sich die physikalischen Zusammenhänge bei unterschiedlicher Bohrtiefe erheblich ändern. Das Abtragen in tiefen, schmalen Kapillaren unterscheidet sich sehr stark vom oberflächlichen Abtragen. Die Wechselwirkungsprozesse werden mit zunehmender Tiefe komplexer und sind schwieriger zu untersuchen.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch grundlegende, experimentelle Untersuchungen des Bohrprozesses und durch die Entwicklung eines neuartigen Bohrverfahrens eine deutliche Steigerung der Qualität von Mikrobohrungen mit großem Aspektverhältnis zu erreichen. Die neue Bohrtechnik, deren Besonderheit darin besteht, dass eine axiale Rotation des Laserstrahl gegenüber dem Werkstück realisiert wird, soll primär dazu dienen, die Rundheit der Mikrobohrungen sowie die Oberflächengüte der Bohrungswand zu verbessern. Die Erkenntnisse der grundlegenden Untersuchungen sollen in einem Prozessmodell zusammengefasst werden. Auf der Basis der experimentellen Ergebnisse und durch den Einsatz des neuen Bohrverfahrens sind innovative Bearbeitungsstrategien zu erarbeiten, die durch gezielte Variation der entscheidenden Laser- und Bearbeitungsparameter ein breites Spektrum von Bohrungsgeometrien hoher Reproduzierbarkeit ermöglichen.

4 Versuchstechnik

4.1 Lösungskonzept

Zur Lösung der in Kap. 3 beschriebenen Aufgabenstellung erfolgen grundlegende, experimentelle Untersuchungen des Bohrprozesses sowie konstruktive Arbeiten zur Entwicklung eines neuartigen Strahlrotationsmoduls. Die Ergebnisse der Bohruntersuchungen sollen für ein umfassendes Verständnis der Entstehung der Laserbohrungen quantitativ, qualitativ sowie phänomenologisch analysiert werden. Aus den grundlegenden Ergebnissen lässt sich ein Prozessmodell ableiten, welches den gesamten Bohrprozess anhand der Energiebilanz entlang der Bohrtiefe beschreibt. Auf den experimentellen und theoretischen Ergebnissen aufbauend lassen sich neue Bearbeitungsstrategien entwickeln, mit dessen Hilfe flexible Bohrungsgeometrien mit hoher Qualität hergestellt werden können. Die Vorgehensweise zur Lösung der Aufgabenstellung ist in Bild 4-1 zusammenfassend dargestellt.

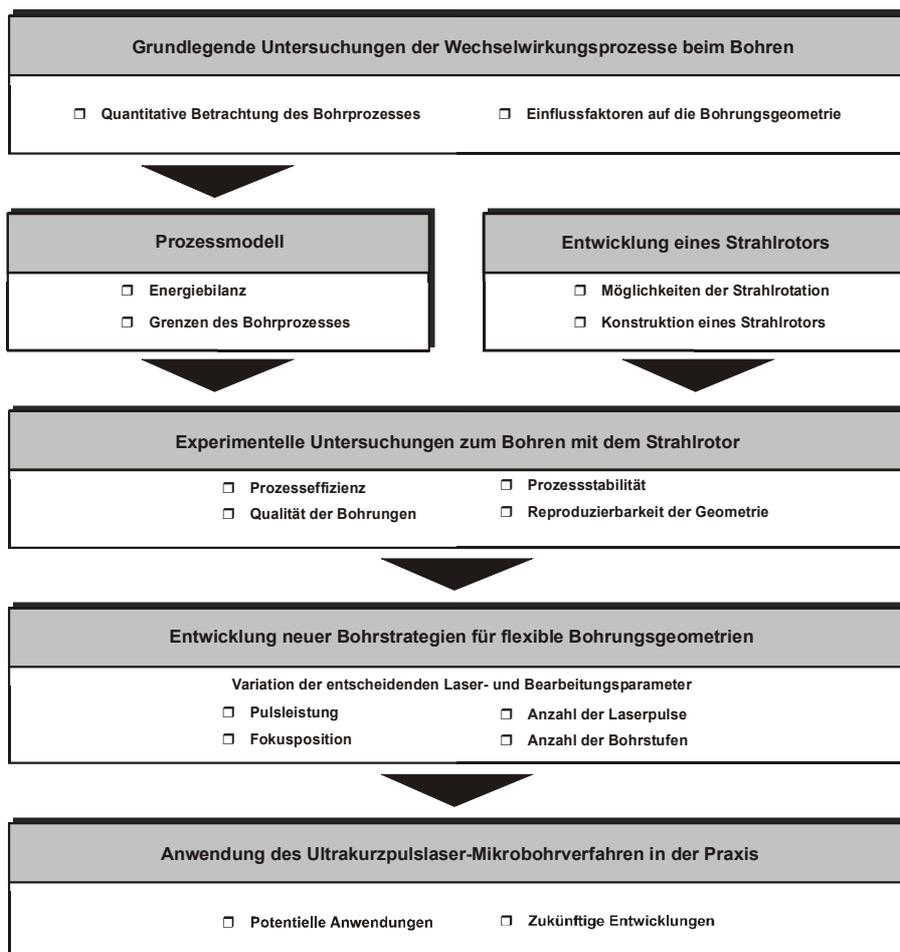


Bild 4-1 Vorgehensweise zur Qualitätssteigerung des Mikrobohrprozesses

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit bilden die Grundlagenuntersuchungen für die Herstellung kleiner Bohrungen mit ultrakurzen Laserpulsen in Stahlwerkstoff. Die Wechselwirkungsprozesse während des Laserbohrvorganges beeinflussen einerseits die Effizienz des Materialabtrags, andererseits wirken sie sich auf die Geometrie der Bohrung sowie auf deren Qualität aus. Eine quantitative Betrachtung der Bohreffizienz sowie Beobachtungen zur Bohrungsentstehung und deren geometrische Einflussfaktoren werden Aufschluss über die entscheidenden Wechselwirkungsprozesse geben.

Aus den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen soll ein Prozessmodell erstellt werden. Durch die zusammenfassende Darstellung der verschiedenen Energieanteile und deren Veränderungen während des Bohrprozesses können die Grenzen des Bohrens mit ultrakurzen Laserpulsen diskutiert werden.

Ein weiteres Arbeitspaket stellt die Entwicklung einer neuen Laserbohrtechnik dar. Dies geschieht mithilfe eines zu konstruierenden Strahlrotationssystems, durch welches der Laserstrahl um seine eigene Achse rotiert werden kann. Es ist zu erwarten, dass sich die Qualität von Mikrobohrungen durch diese neue Bohrtechnik deutlich erhöhen lässt. Im Verlauf der Entwicklung des Rotationssystems ist darauf zu achten, dass das Gerät für den Dauereinsatz in der industriellen Fertigung ausgelegt ist.

Auf der Basis der grundlegenden Untersuchungen des Bohrprozesses ist die Leistungsfähigkeit des neu entwickelten Rotations-Bohrverfahrens im Detail zu überprüfen. Hierbei stehen die Prozesseffizienz im Vergleich zum konventionellen (starrten) Perkussionsbohren sowie die Qualität der Bohrungen im Vordergrund. Weitere Kriterien sind die technische Zuverlässigkeit der neuen Bohrtechnik und die damit zusammenhängende Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit der Bohrungsgeometrien.

Mit der Kenntnis der Möglichkeiten des Rotations-Bohrverfahrens lassen sich spezifische Bearbeitungsstrategien erstellen, deren Ziel die Herstellung variabler Bohrungsgeometrien durch einfache Anpassung der Laser- und Bearbeitungsparameter ist.

Abschließend werden mögliche praktische Anwendungen des neu entwickelten Laser-Mikrobohrverfahrens aufgezeigt und zusätzliche, für die industrielle Umsetzung der Ultrakurzpulslaser-Technologie erforderliche Weiterentwicklungen diskutiert.

4.2 Versuchsanordnung

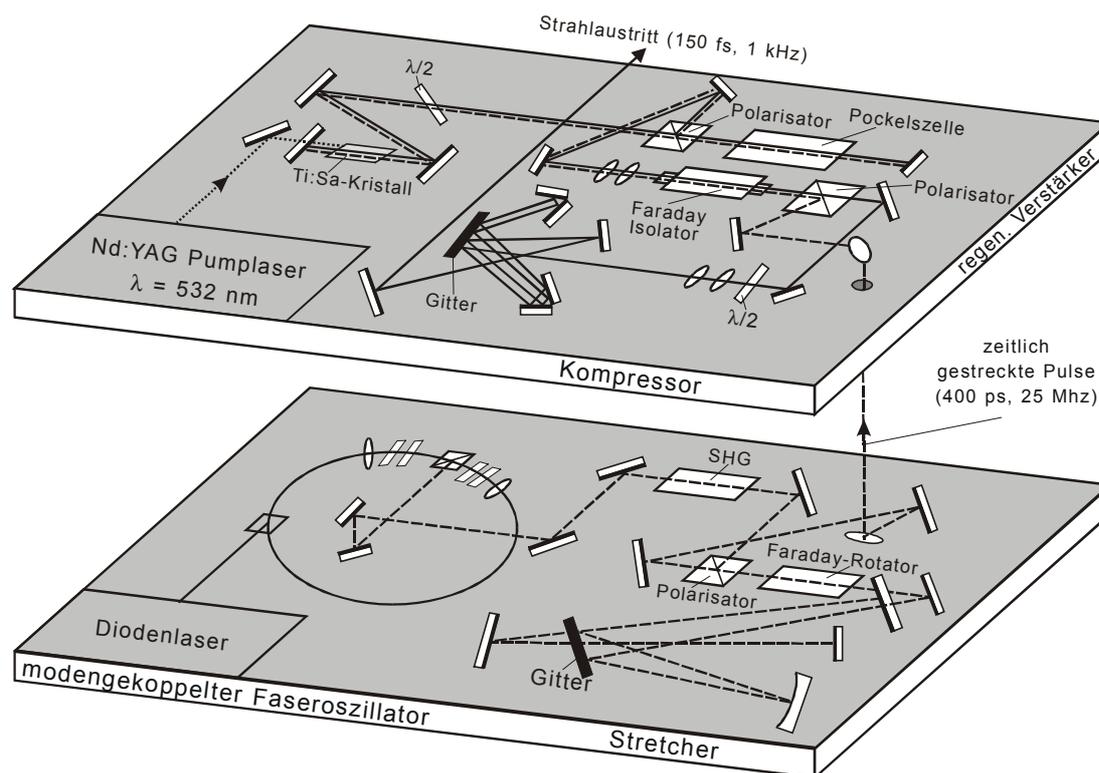
Die Versuchsanordnung setzt sich im Wesentlichen aus der Strahlquelle sowie aus den Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung zusammen. Durch die Laserstrahlquelle werden die Laserparameter definiert bzw. variiert. Über verschiedenen Optiken wird die Strahlung an die Bearbeitungsstelle geführt. Zum Erzeugen möglichst runder Bohrungen wird ein spezielles Strahlrotationssystem (siehe Kap. 4.4) entwickelt, das im Unterschied zu den herkömmlichen Trepaniersystemen den Strahl um seine eigenen Achse rotieren lässt. Des Weiteren stehen zur Charakterisierung der eingestellten Laserparameter sowie zur Bewertung der experimentellen Ergebnisse verschiedene messtechnische Geräte bzw. Verfahren zur Verfügung. Im folgenden sollen die für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Komponenten, Geräte, und Messmethoden näher erläutert werden.

4.2.1 Laserstrahlquelle

Für die in dieser Arbeit dargestellten experimentellen Untersuchungen wird ein Ti:Saphir-Lasersystem der Firma Clark MXR Inc. (Modell „CPA-2001“) verwendet. Bei diesem Lasersystem handelt es sich um ein kompaktes und bedienerfreundliches System. Alle zur Erzeugung und Nachverstärkung der kurzen Pulse notwendigen Komponenten befinden sich in einem vergleichsweise kleinen Gehäuse (1.2 m x 0.5 m x 0.35 m).

Das Lasersystem erzeugt Femtosekundenpulse mit einer Pulsdauer τ von minimal 150 fs bei Pulsenergien $Q > 0.8$ mJ. Die maximale Pulsfrequenz beträgt $f_P = 1$ kHz. Die Pulse werden bei einer mittleren Wellenlänge von ca. $\lambda = 775$ nm emittiert. Dabei haben sie eine Bandbreite (FWHM) von etwa 10 nm. Die emittierte Strahlung ist linear polarisiert.

In Bild 4-2 ist das in zwei Ebenen aufgebaute Lasersystem dargestellt. Im unteren Teil werden durch einen diodengepumten Faseroszillator (siehe Kap. 2.3.1) die kurzen Pulse bei hoher Repetition und kleiner Pulsenergie erzeugt, deren mittlere Wellenlänge bei $\lambda = 1550$ nm liegt.



Technische Daten:

Bezeichnung:	CPA 2001
Wellenlänge:	$\lambda = 775 \text{ nm}$
Pulsdauer:	$\tau = 150 \text{ fs} - 10 \text{ ps}, 20 \text{ ns}$
Pulsfrequenz:	$f_P = 1 \text{ kHz}$
Max. Pulsenergie:	$Q > 0.8 \text{ mJ}$
Strahlqualität:	$M^2 = 1.3$
Energiestabilität:	$< 3\%$

Bild 4-2 Prinzipieller Aufbau und technische Daten des Ti:Saphir-Lasersystems ("CPA 2001", Clark MXR Inc.)

Nach anschließender Frequenzverdopplung (SHG) werden die Pulse über einen Polarisator in den Pulsstretcher (Stretcher) eingekoppelt, wo sie zeitlich auf einige hundert Pikosekunden gestreckt werden (siehe „CPA-Technik“, Kap. 2.3.1).

In der oberen Ebene werden die Pulse dann zunächst über einen weiteren Polarisator und eine Pockelszelle in den regenerativen Verstärker gelenkt. Die Verstärkung erfolgt durch mehrfaches Durchlaufen des Ti:Saphir-Kristalls, der von einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser optisch gepumpt wird.

Nach der Verstärkung werden die Pulse wieder auf nahezu ihre ursprüngliche Länge komprimiert (Kompressor).

4.2.2 Strahlführung und Strahlformung

Die vom Laser bereitgestellten Pulse werden über verschiedene Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung an die Bearbeitungsstelle geführt. In Bild 4-3 ist der prinzipielle Aufbau der verwendeten Versuchsanordnung dargestellt. Die Pulse passieren zunächst eine Halbwellenplatte ($\lambda/2$), durch die die lineare Polarisationsrichtung gezielt eingestellt bzw. schnell rotiert werden kann. Die Rotation der Polarisation ist beim starren Perkussionsbohren insbesondere bei tiefen Bohrungen unbedingt notwendig [NOLT99c].

Im Strahlrotor wird der Laserstrahl über drei rotierende Spiegel geführt, deren Drehbewegung den Laserstrahl derart ablenken, dass dieser um seine eigene Achse rotiert (siehe Kap. 4.4). Über drei weitere starre Spiegel wird der Strahl zur Fokussieroptik (Achromat) geführt und auf die Werkstückoberfläche fokussiert.

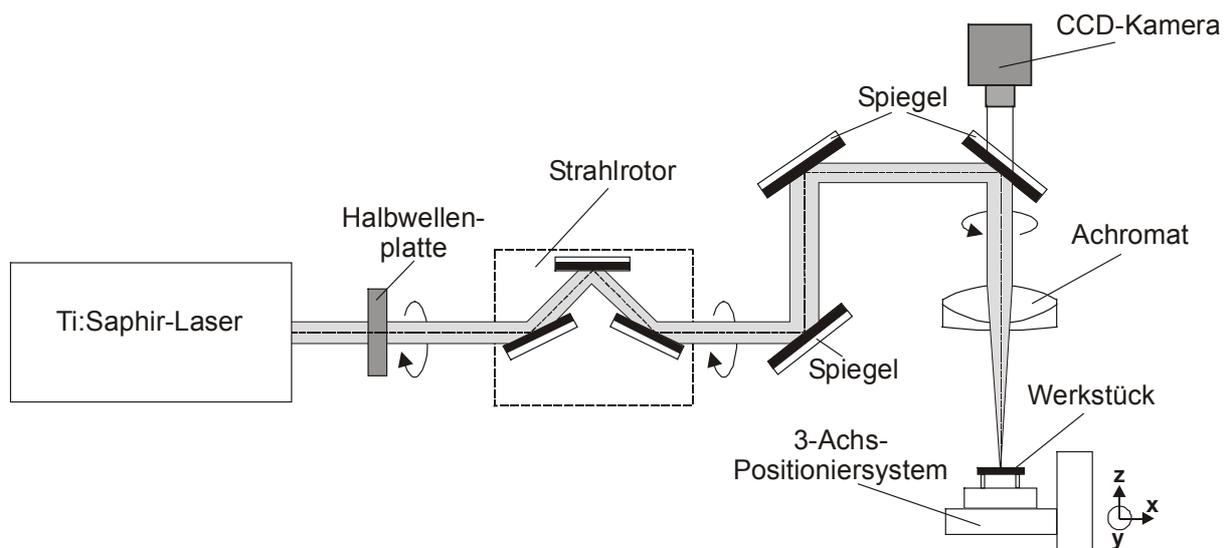


Bild 4-3 Versuchsanordnung

Das Werkstück kann mit einem mikrometergenauen Positioniersystem sowohl vertikal als auch horizontal zum fokussierten Laserstrahl positioniert werden. Eine CCD-Kamera dient einerseits zur Kontrolle der Werkstückposition. Andererseits ermöglicht die mit einem Teleskop versehene Kamera eine genügend hohe Auflösung, so dass die Bewegung des rotierenden Strahls im Fokus mittels Monitor beobachtet werden kann. Dadurch wird eine einfache Justage der Rotationsbewegung am Strahlrotor ermöglicht.

4.3 Messtechnik

Zur Charakterisierung der eingestellten Laserparameter sowie der experimentell ermittelten Bohrerergebnisse werden verschiedene Messmethoden bzw. messtechnische Apparaturen verwendet, die in diesem Abschnitt näher erläutert werden sollen. Zwar werden bei den Bohrversuchen einige Laserparameter stets konstant gehalten, dennoch ist es notwendig, diese zu Beginn der Versuchsreihen zu überprüfen. Der einzige am Laser nicht zu verändernde Parameter ist die Wellenlänge der Strahlung. Diese ist durch den Laser vorgegeben und wird für alle Experimente konstant gehalten. Eine Kontrolle der Wellenlänge ist daher nicht notwendig. Unbedingt erforderlich sind jedoch die Vermessung der Pulsdauer, des Strahlprofils sowie der Strahlqualität. Im weiteren Verlauf der Experimente werden auch diese Größen konstant gehalten, allerdings sind die gemessenen Werte für die Berechnungen der Leistungsdichte bzw. der Fokussierbarkeit des Laserpulses notwendig. Im Experiment werden später lediglich die Pulsenergie sowie die Pulsfolgefrequenz variiert.

Zur Analyse der Bohrerergebnisse kommen verschiedene Techniken zum Einsatz. Eine besondere Herausforderung besteht darin, Informationen über das Innere eines Bohrkanals zu erhalten. Die Ein- und Austrittsbereiche der Bohrungen können sehr gut mittels Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop betrachtet und vermessen werden. Für die Analyse der Innenkonturen reichen diese Methoden nicht aus. Hierfür stehen zwei alternative Techniken zur Verfügung: Die Innenkontur kann einerseits durch vorsichtiges Aufschleifen eingesehen werden. Dazu sind die Proben vorher in Kunststoff einzubetten. Diese Methode ist allerdings relativ aufwendig. Zudem wird dadurch die Kontur zerstört und es können nur Teile der Bohrung betrachtet werden. Einen vollständigen Überblick bekommt man, wenn der Bohrkanal mit einem aushärtbaren Polymer (REPLIKA-Technik) abgeformt wird. Dabei bleibt die eigentliche Bohrung erhalten und kann für weitere Versuche verwendet werden.

Die Messmethoden im Detail:

Pulsdauermessung

Die Pulsdauer im Sub-Pikosekundenbereich kann nicht direkt mit den üblichen Photodetektoren wie Photodioden oder Photomultipliern gemessen werden. Deren Anstiegs- und Abfallzeiten sind für eine ausreichende Auflösung zu lang. Die schnellsten Photodioden ermöglichen eine Auflösung von ca. 100 ps. Streakkameras haben eine zeitliche Auflösung von etwa 0,5 ps. Pulsdauern im 100 fs- Bereich lassen sich derzeit nur mit Hilfe der Autokorrelationstechnik bestimmen [SALI87].

Dabei wird die Pulsdauer nicht direkt gemessen, sondern die Breite der Autokorrelationsfunktion bestimmt. Aus ihr kann dann die Pulsdauer unter Annahme einer Pulsform abgeschätzt werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Pulsdauermessungen wurde ein untergrundfreier Autokorrelator 2. Ordnung verwendet. Bei diesem Autokorrelator wird der zu messende Puls an einem Strahlteiler geteilt und interferometrisch überlagert. Die Pulse werden anschließend mit einer variablen zeitlichen Verzögerung zueinander in einem nichtlinearen Kristall überlagert (vgl. Bild 4-4). Die anisotropen Materialeigenschaften des Kristalls ermöglichen eine phasenangepasste Frequenzkonversion. Beide Pulse erzeugen je ein frequenzverdoppeltes Signal und unter der Winkelhalbierenden ein Summensignal, das als Funktion der Laufzeitdifferenz des Lichtes betrachtet werden kann (Autokorrelationssignal). Aufgrund eines kleinen Winkels zwischen den Armen des interferometrischen Aufbaus ist das Autokorrelationssignal untergrundfrei. Dieses kann mit einer CCD- Zeile aufgenommen werden. Die Kalibrierung des Autokorrelators wird durch definiertes Verzögern eines Armes des interferometrischen Aufbaus gegenüber dem anderen Arm ermöglicht. Auch unter Verwendung von pulsförmigen Korrekturfaktoren erhält man bei dieser Messmethode einen Fehler von ca. 10 fs. Bei dem verwendeten Autokorrelator handelt es sich um einen Eigenbau, allerdings sind vergleichbare Geräte auch kommerziell erhältlich.

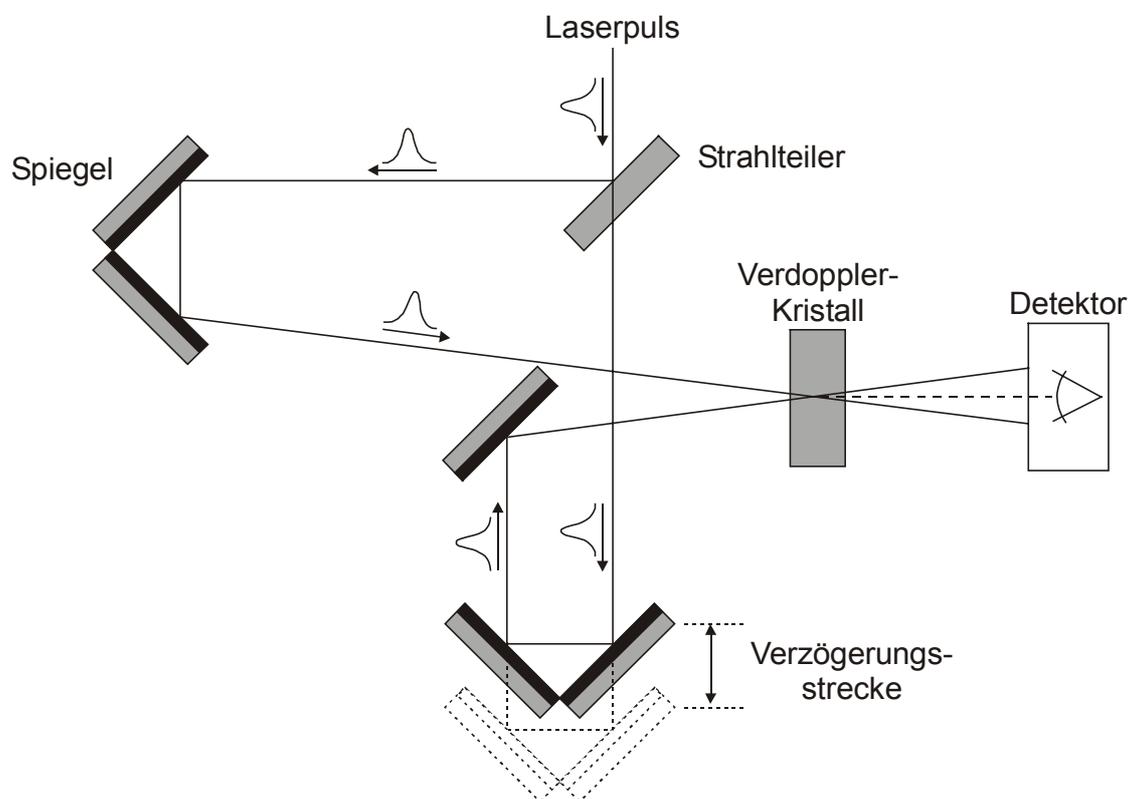


Bild 4-4 Pulsdauermessung mit untergrundfreiem Autokorrelator

Messung des Strahlprofils und der Strahlqualität

Die räumliche Energieverteilung des Laserstrahls kann mit Hilfe eines Strahlanalyse-Systems (Spriricon LBA-100A) dargestellt werden. Dieses System basiert auf einer schnellen, hochauflösenden CCD-Kamera deren Signale über eine Wandler-Karte mit entsprechender Software ausgewertet werden können. Die Strahlprofil Darstellung erfolgt entweder als Farbflächen (2D) oder als dreidimensionale Darstellung. Die zweidimensionale Ansicht ermöglicht die Beurteilung der äußeren Kontur sowie der Intensitätsverteilung des Strahlquerschnitts. Zudem kann die Laserposition bezüglich der Schwerpunktslage bestimmt werden. Wird das Strahlanalyse-System mit einem geeichten Leistungsmessgerät kalibriert, so können die echten Leistungs- bzw. Energiewerte dargestellt werden. Die Datenspeicherung in verschiedenen Formaten ermöglicht die Weiterverarbeitung durch andere Datenverarbeitungsprogramme.

Die Strahlqualität eines radialsymmetrischen Laserstrahls kann durch den Strahlpropagationsfaktor K bzw. durch die Beugungsmaßzahl (oder auch Qualitätskennzahl) M^2 beschrieben werden. Zur Bestimmung dieser Parameter ist der Taillendurchmesser $2w(z)$ in Abhängigkeit der Position der Strahltaille z , und der Divergenzwinkel des Fernfeldes θ zu ermitteln (siehe auch Kap. 5.1.1). Zur Vermessung der Strahlkaustik ist es also notwendig, den Strahldurchmesser entlang der Ausbreitungsrichtung in Fokusnähe zu vermessen. Hierzu eignet sich die sogenannte „Klingenmessmethode“, bei der ein Teil der Strahlung durch eine Klinge an der zu untersuchenden Stelle in der Kaustik ausgeblendet, und der hindurch tretende Anteil der Strahlung mit einem Leistungsmessgerät detektiert wird. Die Messungen werden an verschiedenen z -Positionen in der Kaustik durchgeführt. Anschließend wird für jede z -Position die Ableitung der transmittierten Leistung über den Differenzquotienten je zweier benachbarter Messpunkte gebildet. An diese Ableitungskurve wird eine Gaußsche Glockenkurve angepasst und aus deren Breite der Strahldurchmesser bestimmt. Aus den erhaltenen Strahldurchmessern für sämtliche z -Positionen kann dann die Kaustik zusammengesetzt werden. Mit Hilfe dieses Verfahrens können Strahlvermessungen auch im Mikrometerbereich durchgeführt werden [REBE94, ARNA71].

Bestimmung von Pulsenergie und Pulsfolgefrequenz

Die Messung der Pulsenergie erfolgt mit einem Leistungsmessgerät (Typ Spectra-Physics 407A), bei dem in einer Absorberschicht die Laserstrahlung mit einer Thermosäule in thermische Energie umgewandelt und anschließend in ein elektrisches Signal konvertiert wird. Die Auflösung des Detektors beträgt 1 mW. Das Leistungsmessgerät misst dabei die mittlere Leistung der Strahlung. Die Energie des einzelnen Pulses ergibt sich aus der Pulsfolgefrequenz des Lasers. Um die

Pulsfolgefrequenz zu bestimmen, kann eine einfache Photodiode dienen, deren Signal mit einem Oszilloskop ausgewertet wird.

Lichtmikroskopie

Zur Vermessung bzw. Dokumentation der Bohrerergebnisse sowie deren Abformungen (siehe Replika-Technik) sind Lichtmikroskope grundsätzlich gut geeignet und können insbesondere ohne große Vorbereitung der Bohrproben zum Einsatz kommen. Das im Rahmen der Untersuchungen verwendete Lichtmikroskop (Fa. Zeiss) ermöglicht stufenweise Vergrößerungen von 10:1 bis 500:1. Zudem verfügt das Mikroskop in allen drei Raumrichtungen über digitale Wegaufnehmer, deren Messgenauigkeit bei ca. 1 Mikrometer liegt. In lateraler Richtung können damit Bohrungsdurchmesser mit hinreichender Genauigkeit vermessen werden. Die Vermessung der Tiefe von Mikrobohrungen ist nur begrenzt mit einem Lichtmikroskop möglich. Zwar kann eine Wegdifferenz durch Scharfstellen zweier Oberflächen ermittelt werden, allerdings ist dies nur bis zu einer bestimmten Tiefe möglich. Eine höhere Sicherheit der Messergebnisse ergibt sich, wenn die Abformungen der Bohrungen unter dem Lichtmikroskop oder im Rasterelektronenmikroskop vermessen werden.

Am Mikroskop ist zusätzlich eine Kamera adaptiert, mit deren Hilfe die Ergebnisse als digitales Bild dokumentiert werden können, um die Qualität der Bohrungskontur oder geometrische Abweichungen zu bewerten.

Rasterelektronenmikroskopie

Eine im Vergleich zum Lichtmikroskop genauere Betrachtung der erzielten Bohrerergebnisse ermöglicht das Rasterelektronenmikroskop (kurz REM, Typ CamScan SII, Fa. Cambridge Scanning). Durch eine höhere Auflösung im Nanometerbereich ist einerseits eine noch genauere Messung der Strukturen durchführbar, andererseits ist durch die dreidimensionale Betrachtung eine einfachere qualitative Bewertung insbesondere der Oberflächenmorphologie möglich. Da für die Messungen der Bohrungsgeometrien das Lichtmikroskop ausreichend ist, wird das REM ausschließlich für die qualitative Beurteilung eingesetzt.

Abformungs-Technik (Replika)

Bei der Replika-Technik handelt es sich um ein präzises Abformverfahren, dessen Ursprünge sich in der Dentalmedizin finden. Das Verfahren basiert auf einem Zwei-Komponenten-Polymer, das nach dem Vermischen unter leichtem Druck in die abzuformende Struktur gepresst wird. Nach einer Aushärtezeit von etwa 2 bis 3

Stunden kann die elastische Abformung vom Original separiert werden. Für die weiteren Untersuchungen kann die Abformung im Lichtmikroskop oder im REM betrachtet werden. Das Verfahren ermöglicht eine hohe Abformgenauigkeit mit Strukturauflösungen von weniger als 1 Mikrometer. Durch die guten elastischen Eigenschaften des Polymers bei gleichzeitig hoher Festigkeit können auch sehr schlanke Strukturen, wie z.B. feine Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis, abgeformt werden. Teilweise sind auch Hinterschneidungen abformbar. Durch dieses Verfahren erhält man ein genaues, dreidimensionales Negativ der zu untersuchenden Struktur. Die ursprüngliche Struktur bleibt dabei unversehrt [DICK98].

4.4 Entwicklung eines Strahlrotors

Die Rundheit von Laserbohrungen ist besonders beim Einzelpuls- und beim Perkussionsbohren stark vom Strahlprofil des Lasers abhängig. Nur bei guter Strahlqualität, genauer gesagt bei einem kreisförmigem Querschnitt und annähernd gaußförmiger Energieverteilung des Laserstrahls, kann dieser durch eine geeignete Optik zu einem runden Fokus gebündelt werden. Erst dann entsteht beim Abtragen des Materials eine runde Bohrung.

Durch Trepanieren, also durch das Bewegen des fokussierten Strahls auf einer Kreisbahn, können zwar leichte Inhomogenitäten des Strahlprofils ausgeglichen werden, jedoch führt auch die herkömmliche Trepaniertechnik nicht immer automatisch zu kreisförmigen Bohrungen. Grund dafür ist der typischerweise unrunde Laserstrahlquerschnitt der verwendeten Bohrlaser [OSTE00b]. Dieses Problem ist auch bei Ultrakurzpuls-Ti:Saphir-Verstärkersystemen festzustellen. Im Bild 4-5 ist eine typische Energiedichteverteilung eines verstärkten, ultrakurzen Laserpulses dargestellt. Anhand dieser Graphik wird das Problem des Erzeugens kreisförmiger Laserbohrungen deutlich. Zu erkennen ist die inhomogene räumliche Verteilung der Energiedichte mit einigen Intensitätsspitzen. Zudem ist das insgesamt elliptische Profil des Rohstrahls erkennbar. Wird ein solcher Strahl fokussiert, so bildet sich der Fokus und somit die Laserbohrung ebenfalls elliptisch aus.

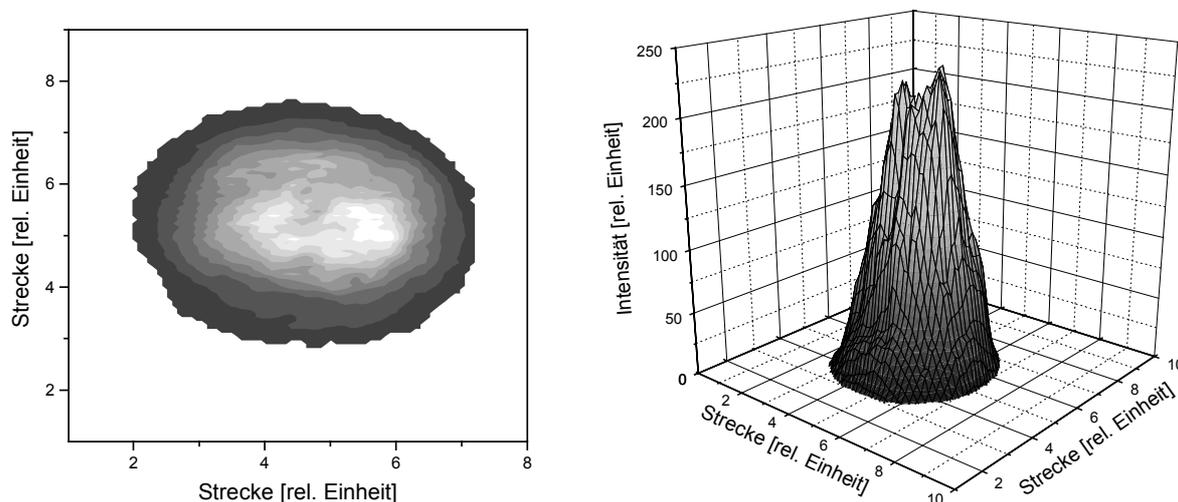


Bild 4-5 Räumliche Energieverteilung der verwendeten ultrakurzen Laserpulse (Ti:Saphir-Laser)

Auch das Bewegen eines solchen Strahls auf einer Kreisbahn (Trepanieren) führt nur zu einem elliptischen Bohrungsquerschnitt (vergl. Bild 4-6, rechts). Da normalerweise ein kreisförmiger Bohrungsquerschnitt angestrebt wird, ist bei allen drei genannten Bohrverfahren daher jeweils eine gute Strahlqualität des Lasers erforderlich.

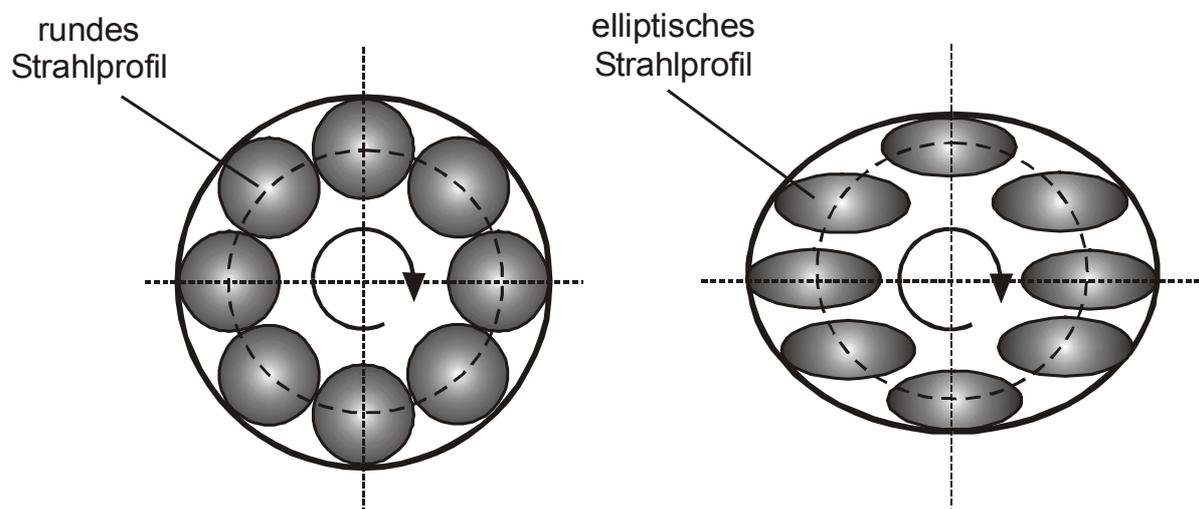


Bild 4-6: Trepanieren mit rundem und mit elliptischem Strahlprofil

Die besten Bohrerergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Rundheit und die Oberflächenqualität der Innenwand lassen sich erzielen, wenn der Strahl gegenüber dem Werkstück nicht durch laterale Auslenkung kreisförmig bewegt wird, sondern die Relativbewegung axial stattfindet, der Strahl also gegenüber dem Werkstück um die Strahlachse rotiert, vergleichbar einem Spiralbohrer oder einer rotierenden Erodier Elektrode. In diesem Fall ist der Einfluss des Strahlprofils auf die Bohrungsqualität vernachlässigbar gering. Selbst bei einer inhomogenen und unrunder Energieverteilung entsteht durch die Rotation trotzdem immer ein runder Bohrungsquerschnitt. Durch die Rotation kann der Laserstrahl hinsichtlich seiner Querschnittsintensität gegenüber dem Werkstück homogenisiert werden, ohne dass dadurch der Auftreffpunkt oder die Auftreffneigung des Laserstrahls auf dem Werkstück beeinflusst wird, wie beim konventionellen Trepanieren.

In der Literatur gibt es einige Ideen zur Umsetzung der Strahlrotation, jedoch ist bislang kein zum Laserstrahlbohren geeignetes System auf dem Markt erhältlich [DE197, DE331, DE199, US473]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die technische Umsetzung des Rotationsprinzips sehr schwierig ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird erstmals ein hochpräzises Strahlrotationssystem konzipiert und im dauerhaften Einsatz erprobt. In den folgenden zwei Abschnitten wird das Strahlrotationsprinzip sowie die daraus resultierende Konstruktion eines Strahlrotorsystems beschrieben.

4.4.1 Prinzip der Strahlrotation

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Drehbewegung zwischen dem Werkstück und dem Laserstrahl zu realisieren. Zum einen kann das zu bearbeitende Werkstück unter dem starren Laserstrahl rotiert werden. Hierbei müssen Strahlachse und Rotationsachse des Werkstücks sehr genau zueinander ausgerichtet sein. Diese Methode ist zumindest für grundlegende Laboruntersuchungen an kleinen Teilen leicht umsetzbar. Für die industrielle Fertigung ist das Rotieren des Werkstücks aufgrund des hohen Aufwands, insbesondere bei großen Teilen jedoch kaum akzeptabel.

Theoretisch kann die Drehbewegung auch durch das Drehen der Laserstrahlquelle erreicht werden. Eine praktische Umsetzung dieser Methode wäre allerdings äußerst schwierig und sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Die eleganteste Möglichkeit, eine Drehbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl zu bewirken, ist die Rotation des Laserstrahls durch eine sog. Bilddrehvorrichtung. Hierfür sind Vorrichtungen denkbar, die durch Drehung ein oder mehrerer Prismen, welche die optische Strahlachse erhalten, eine Bilddrehung bewirken (Bild 4-7). Derartige Prismen sind als Dove-, Abbè- oder König-Prismen bekannt.

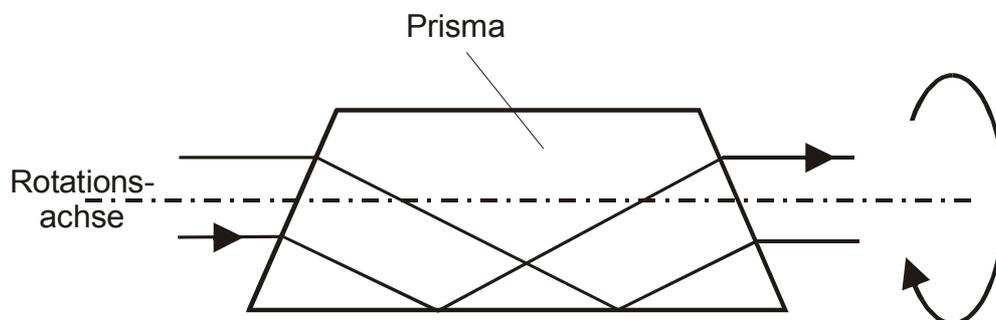


Bild 4-7: Bildrotation durch ein Prisma

Eine Bilddrehung kann ebenso durch ein entsprechendes System aus reflektierenden Spiegeln erzeugt werden. Nach dem gleichen Prinzip wie bei den Prismen, kann der Laserstrahl durch eine ungerade Anzahl von Spiegelungen räumlich gedreht werden (Bild 4-8).

Bei der Verwendung der oben genannten Prismen oder eines Spiegelsystems findet zwischen dem Eintritt und dem Austritt der Laserstrahlung eine Verschiebung der Teilstrahlen derart statt, dass die Strahlrichtung beim Austritt gegenüber dem Strahleintritt spiegelbildlich ist. Der Strahl wird also an der Ebene gespiegelt, die senkrecht zur Zeichenebene (siehe Bild 4-7 und Bild 4-8) verläuft und in der die

Drehachse liegt. Wenn sich ein solches System um die Achse des eintreffenden Strahls dreht, so rotiert das „Bild“ aufgrund der zweifachen Spiegelung relativ zur Bewegung des Spiegelsystems mit der doppelten Geschwindigkeit.

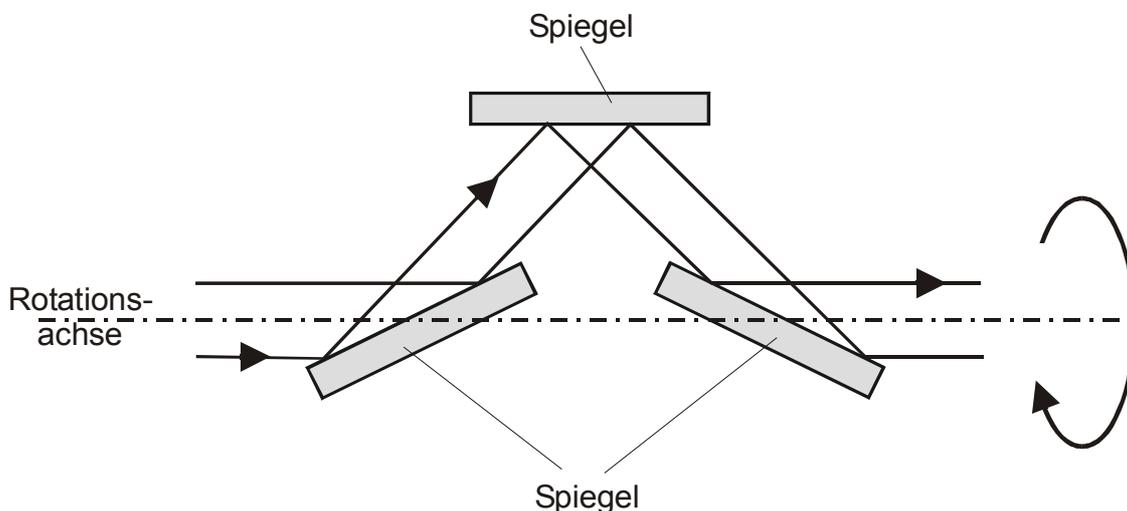


Bild 4-8: Bildrotation durch ein Spiegelsystem

Die technische Umsetzung einer schnell rotierenden, optischen Bilddrehung ist sehr schwierig, da die Drehung um die Strahlachse extrem genau sein muss. Bereits sehr kleine Ablenkungen können unkontrollierte Bewegungen des Strahls hervorrufen, die sich dann in der Materialbearbeitung negativ bemerkbar machen würden.

Der Vorteil eines Spiegelsystems gegenüber Prismen ist, dass die Achse, auf der der gespiegelte Laserstrahl austritt, durch Verändern der Position bzw. des Winkels eines oder mehrerer Spiegel gezielt verändert werden kann. Dadurch kann der eintreffende Strahl genau auf die Rotationsachse des Spiegelsystems abgestimmt werden. Justagemöglichkeiten sind unbedingt erforderlich, da bei der Fertigung der Optiken, deren Halterungen bzw. bei der Lagerung kleine Abweichungen nicht zu vermeiden sind.

Durch das gezielte Verstellen der Spiegel kann das System auch so eingestellt werden, dass der Laserstrahl sich auf einer coaxialen Bahn bewegt. Diese Art des Trepanierens unterscheidet sich vom traditionellen Trepanieren dadurch, dass der Laserstrahl sich azimuthal auf der Kreisbahn bewegt (siehe Bild 4-9, rechts). Beim Laserbohren mit einem solchen Rotationssystem werden daher stets kreisförmige Geometrien erreicht, da die runde Bohrungsform in diesem Fall unabhängig vom Strahlprofil ist. Wenn der Laserstrahl genau um seine eigenen Achse rotiert (Bild 4-9, links), so sind im Vergleich zum konventionellen Trepanieren (vergl. Bild 4-6) nicht

nur rundere Konturen möglich, auch können die Durchmesser kleiner gehalten werden.

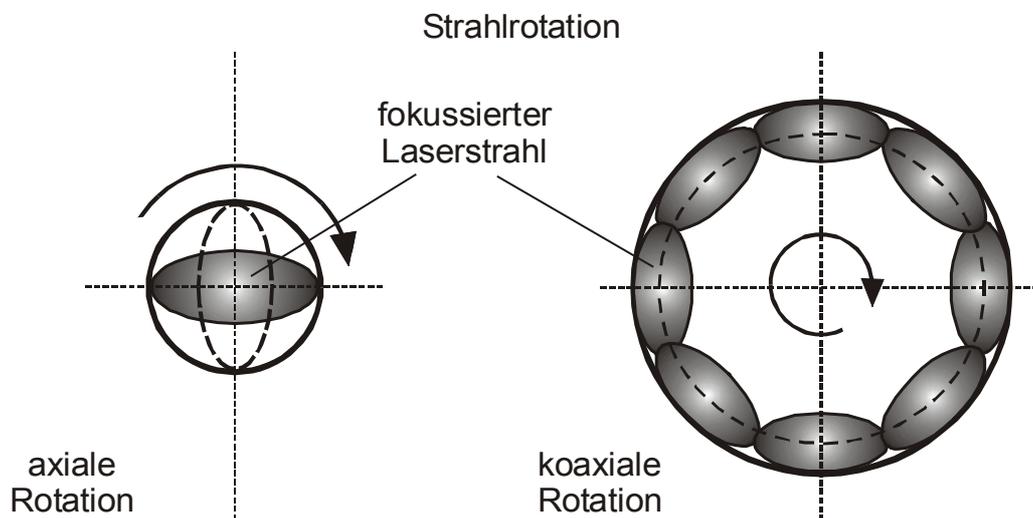


Bild 4-9: Axiale und koaxiale Strahlrotation

4.4.2 Konstruktion des Strahlrotors

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird eine motorisierte Strahlrotationsvorrichtung entwickelt, die auf einem rotierenden 3-Spiegelsystem, ähnlich dem in Bild 4-8 dargestellten System, basiert. Für die Gewährleistung einer hohen Genauigkeit der Drehbewegung bzw. um die notwendigen Korrekturmöglichkeiten bereitzustellen, sind bei der Konstruktion folgende Anforderungen zu beachten:

- Der zweite (äußere) Spiegel im System muss verstellbar sein, so dass sowohl der Auftreffwinkel des Strahls als auch der Abstand zwischen Spiegel und Rotationsachse eingestellt werden können (siehe Bild 4-10).
- Es muss ein extrem guter Rundlauf der Lagerung gewährleistet sein. Schon sehr kleine Rundlauffehler der Lagerung verhindern das genaue Ausrichten des Strahls auf die Rotationsachse.
- Die Lagerung muss sehr steif sein, da die Masse des am Lager montierten Spiegelsystems eine Auslenkung der Rotationsachse bewirken kann.

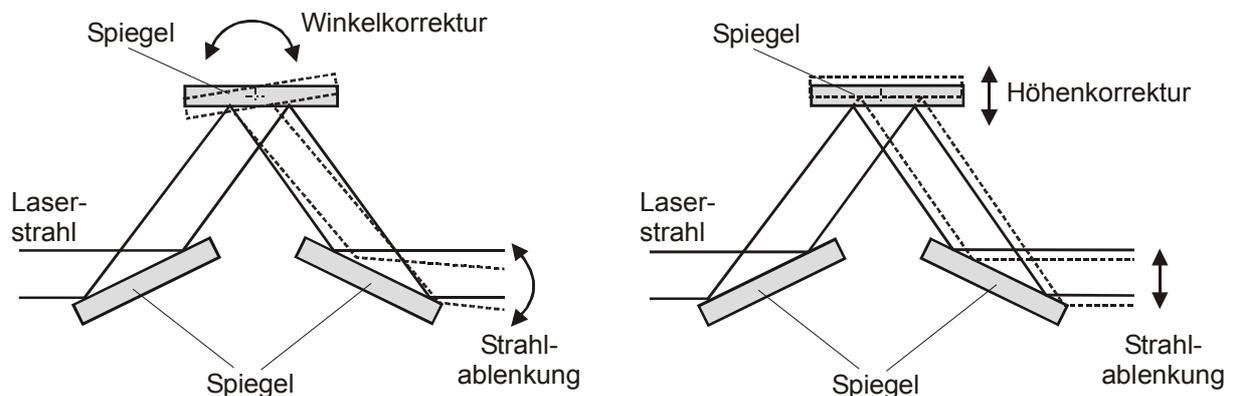


Bild 4-10: Notwendige Korrekturmöglichkeiten des Spiegelsystems

In Bild 4-11 ist die Konstruktionszeichnung des Strahlrotors dargestellt. Um den oben genannten Anforderungen zu genügen, wurden folgende konstruktive Lösungen umgesetzt: Zur Lagerung des rotierenden Spiegelsystems dient ein sehr steifes Luftlager mit extrem guten Rund- und Planlaufgenauigkeiten ($< 0.05 \mu\text{m}$). Dieses

wird außen über einen Riemen mit einem Motor angetrieben. Die Luftlagerung läuft nahezu reibungsfrei, wodurch das System mit einem relativ kleinen Antriebsmotor ausgestattet werden kann. Durch die Luftlagerung wird zudem die Entwicklung von Reibungswärme unterbunden. Die Erwärmung des Systems würde zum Verzug der Spiegel und deren Halterung und somit zur unerwünschten Änderung des Strahlengangs führen.

Am Luftlager sind das Spiegelsystem sowie ein Auswuchtelement befestigt. Zur Justage des äußeren der drei Spiegel befindet sich am Spiegelsystem eine motorische Verstelleinheit, deren Motoren im Betrieb über Schleifkontakte angesteuert werden können. Nur so kann mit vertretbarem Aufwand das Spiegelsystem zur Rotationsachse ausgerichtet werden. Das rotierende Spiegelsystem befindet sich in einem Granitgehäuse, wodurch das gesamte System sehr steif und zudem gegenüber Temperaturschwankungen unempfindlich ist. Das Strahlrotationssystem ist durch den robusten Aufbau und den geringen Verschleiß für den Dauereinsatz sehr gut geeignet.

In Tab. 4-1 sind die technischen Daten des Strahlrotors zusammengefasst.

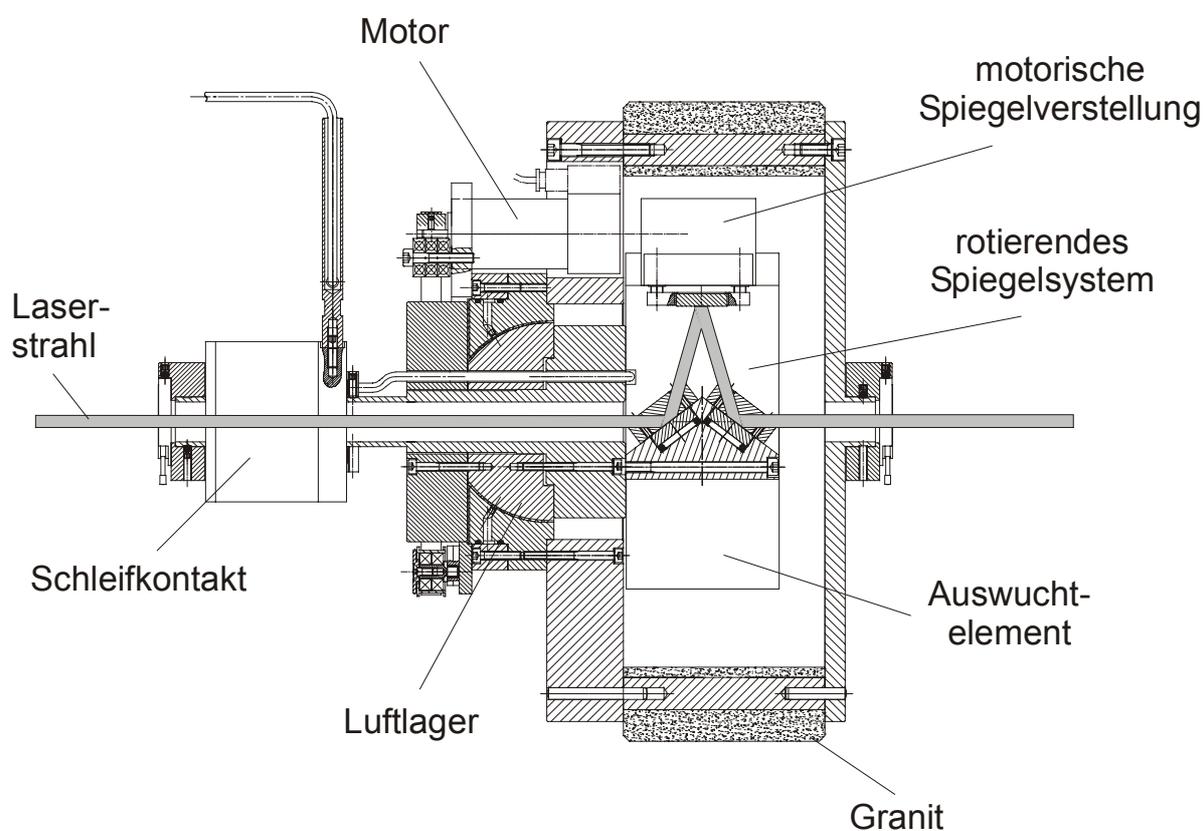
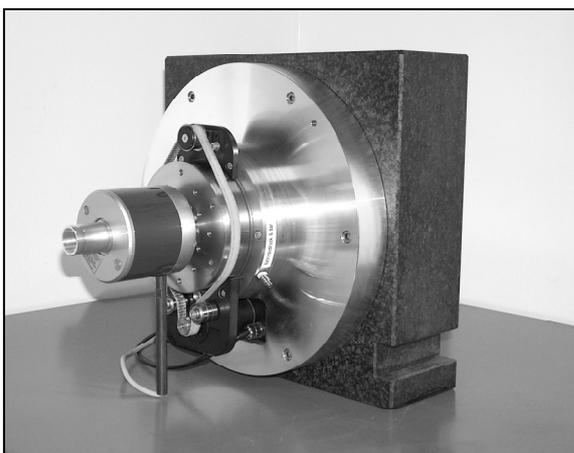


Bild 4-11: Konstruktionszeichnung des Strahlrotors

Tabelle 4-1: Technische Daten der Strahlrotors

Rotationsgeschwindigkeit (Rotor)	0 - 600 /min
numerische Apertur	max. 15 mm
Motorleistung (Antrieb)	70 W
Motorsteuerung (Antrieb)	PC-Steuerung (RS-232)
Spiegelverstellung	2-fach mot. Spiegelhalter (Piezomotoren)
Luftverbrauch* (Luftlager)	10 NI/min
Rundlauf	< 0.05 μm
Planlauf	< 0.05 μm
Axiale Belastbarkeit	450 N
mittlere Steifigkeit	160 N/ μm
Gehäuse	Granit
Gewicht	36 kg
Größe	320 mm x 320 mm x 380 mm

*) Normatmosphäre nach DIN ISO 2533

**Bild 4-12:** Fotografie des Strahlrotors

5 Grundlegende Untersuchungen der Wechselwirkungsprozesse beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen

In diesem Kapitel werden die maßgeblichen Prozesse, die während eines Bohrvorgangs ablaufen sowie deren Auswirkung auf die Bohrungsgeometrie diskutiert. Hierbei sollen die Teileffekte einzeln betrachtet werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde das neu entwickelte Rotations-Bohrverfahren, wie in Kap. 4.4 beschrieben, angewendet. Das Bohrverfahren spielt jedoch bei den folgenden Untersuchungen eine untergeordnete Rolle, da der grundsätzliche Prozessablauf bei allen perkussierenden Bohrverfahren (starres Perkussionsbohren, Trepanieren und Strahlrotation) vergleichbar ist.

Generell kann ein Bohrprozess in verschiedene Bohrphasen unterteilt werden. Da die Bohreffizienz in direktem Zusammenhang mit der Energiedichte bzw. Intensität am Ort der Ablation steht, soll zunächst geklärt werden, inwieweit sich die Energieverteilung während der verschiedenen Phasen des Bohrprozesses verändert und wodurch die Veränderungen hervorgerufen werden. Der Bohrprozess wird also zunächst quantitativ betrachtet. Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels steht die Geometrie der Laserbohrungen im Vordergrund. Durch ein besseres Verständnis der Wechselwirkungsprozesse während des Bohrprozesses lassen sich die Einflussfaktoren auf die Bohrungsgeometrie detailliert untersuchen.

5.1 Quantitative Betrachtung des Bohrprozesses

Bei der technischen Anwendung von Laserbohrungen werden zwei Arten von Bohrungen unterschieden: Durchgangsbohrungen und Sacklochbohrungen. Als Durchgangsbohrungen werden solche Bohrungen bezeichnet, bei denen der Laserstrahl das Material ganz durchbohrt, der Laserstrahl auf der Rückseite des Materials also wieder austritt. Bis zum Durchbrechen des Materials wird die Bohrung als Sacklochbohrung bezeichnet. Nach dem Durchbohren ändert sich der Bohrprozess drastisch, da sich durch die zusätzliche Öffnung erhebliche Änderungen der geometrischen und atmosphärischen Bedingungen ergeben. Im Folgenden wird zunächst nur die Bohrungsentwicklung im geschlossenen Bohrkanal betrachtet. Die Wechselwirkungsprozesse beim Erzeugen von Durchgangsbohrungen sollen später genauer diskutiert werden (Abschnitt 5.2).

Generell kann festgestellt werden, dass bei der Erzeugung von Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis (>5) die Bohrrate a_p mit zunehmender Bohrtiefe a_z abnimmt. In Bild 5-1 ist der beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen ermittelte

Zusammenhang zwischen der Bohrtiefe und der jeweils erreichten mittleren Bohrrate dargestellt. Die mittlere Bohrrate ergibt sich aus der Bohrtiefe dividiert durch die benötigte Pulsanzahl. Die Experimente wurden an Stahl unter normalen atmosphärischen Bedingungen durchgeführt, wobei sich die Fokusebene bei allen Bohrungen jeweils auf der Probenoberfläche befand. Bei den untersuchten Bohrungen handelt es sich jeweils um Sacklochbohrungen. In der Graphik sind Bohrraten für verschiedene Energiedichten dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass zu Beginn des Bohrprozesses jeweils die höchsten Bohrraten erreicht werden. Die Bohrrate nimmt mit zunehmender Tiefe schnell ab, bis sie schließlich über einen relativ großen Tiefenbereich nur noch sehr langsam abfällt. Ab einer bestimmten Bohrtiefe ist kein Abtrag mehr möglich und der Bohrprozess kommt zum Erliegen. Die Energieverluste bzw. -änderungen sind dann so groß, dass am Grund des Bohrkanals keine zur Fortführung der Ablation genügend hohe Energiedichte erreicht wird.

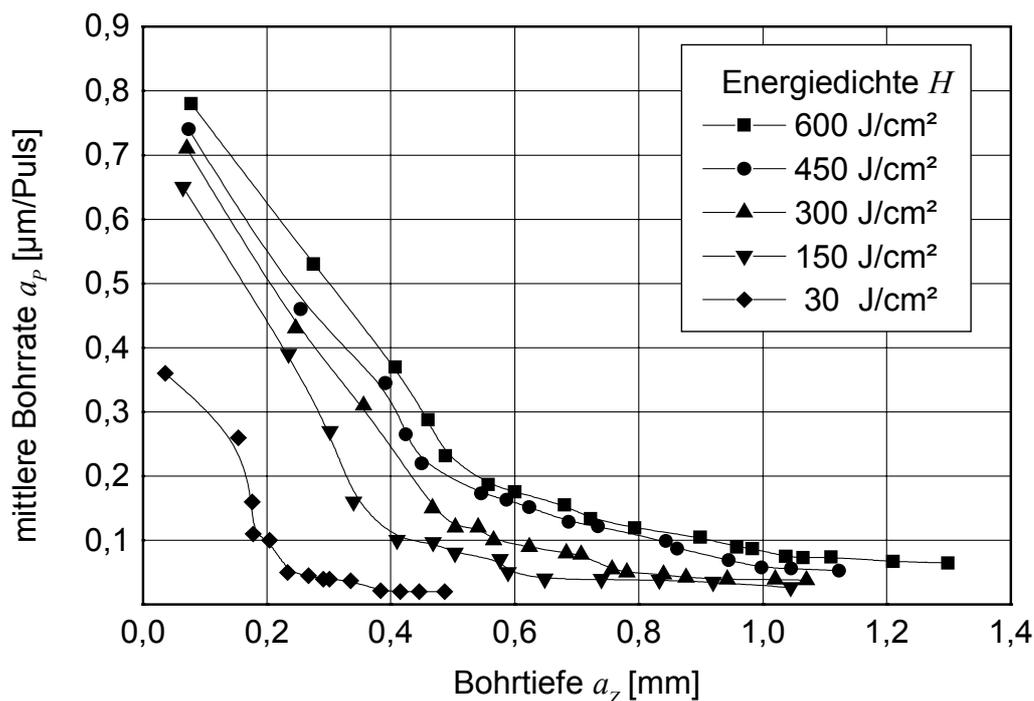


Bild 5-1: Zusammenhang zwischen Bohrtiefe a_z und mittlerer Bohrrate a_p beim Perkussionsbohren mit ultrakurzen Laserpulsen bei verschiedenen Energiedichten ($\lambda = 775 \text{ nm}$, $\tau = 150 \text{ fs}$)

Die hier dargestellten Bohrtiefen wurden durch Abformen der einzelnen Bohrungen ermittelt (Replika-Technik). Durch das Abformen mit dem flüssigem Polymer ergibt

sich ein nicht genau zu definierender Fehler, da insbesondere bei tieferen Sacklochbohrungen teilweise die Abformmasse nicht bis zum Bohrungsgrund gelangt, und somit nicht die gesamte Tiefe der Bohrung erfasst wird. Daher sind die dargestellten Werte nicht absolut. Unter der Annahme, dass sich der Fehler beim Abformen gleichmäßig verteilt, zeigt die Graphik jedoch mit ausreichender Sicherheit die Entwicklung der Bohreffizienz bei veränderter Bohrtiefe.

Beim Erzeugen tiefer Laserbohrungen lassen sich im Wesentlichen zwei Phasen des Prozesses unterscheiden. Die erste Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass mit besonders hoher Effizienz abgetragen wird. Mit wenigen Pulsen wird bereits eine große Bohrtiefe erreicht. In der zweiten Phase kann nur noch mit vergleichsweise geringer Bohrrate abgetragen werden. Bei Sacklochbohrungen kommt der Prozess dann zum Erliegen, wenn eine bestimmte, werkstoffspezifische Ablationsschwelle (Energiedichte) unterschritten ist. Es gibt also einen abrupten Stillstand des Bohrfortschritts, obwohl weiterhin Laserpulse durch die Bohrkapillare propagieren und den Bohrungsgrund erreichen. Reicht die Energie der Laserpulse aus, um den Bohrkanal bis zum Durchbruch fortzuführen (Durchgangsbohrung), so beginnt eine neue, dritte Phase des Bohrprozesses. In dieser Phase können keine Bohrraten ermittelt werden, da nach dem Durchbohren nur noch Abträge an der Seitenwand des Bohrkanals möglich sind.

Bei der Betrachtung der Kurvenverläufe in Bild 5-1 ist auffällig, dass die erzielten Bohrraten im höheren Energiedichtebereich relativ eng beieinander liegen. Beispielsweise ergibt sich zu Beginn des Prozesses, bei einer Bohrtiefe von $a_z = 100 \mu\text{m}$, für eine Energiedichte von $H = 600 \text{ J/cm}^2$ eine Ablationsrate mit $a_p = 0.78 \mu\text{m/Puls}$. Ist die Energiedichte um etwa den Faktor 4 kleiner ($H = 150 \text{ J/cm}^2$), so kann immerhin, bei gleicher Tiefe, noch mit einer Bohrrate von $a_p = 0.65 \mu\text{m/Puls}$ gebohrt werden, die Bohrrate verringert sich also nur um ungefähr 17 %. Erst bei viel kleineren Energiedichten ist ein deutlicher Abfall der Bohrrate zu erkennen.

Das gleiche Phänomen ist zu späteren Phasen des Bohrvorgangs zu beobachten. So wurde für eine Bohrtiefe von $a_z = 1 \text{ mm}$ bei einer Energiedichte von $H = 600 \text{ J/cm}^2$ eine Bohrrate von $a_p = 0.073 \mu\text{m/Puls}$ ermittelt. Wird mit einer Energiedichte von $H = 150 \text{ J/cm}^2$ abgetragen, so ergibt sich im 1 mm tiefen Kanal immerhin noch eine Bohrrate von $a_p = 0.035 \mu\text{m/Puls}$ (52 % Verringerung). Bei einer Pulsfrequenz von $f_p = 1 \text{ kHz}$ kann somit mit der höchsten Energiedichte eine 1 mm tiefe Bohrung in ca. 14 Sekunden erzeugt werden. Verringert man die Energiedichte auf ein Viertel, so benötigt man etwa 29 Sekunden für die gleiche Tiefe.

Daraus kann gefolgert werden, dass die Bohreffizienz, das heißt die Abtragstiefe je Puls, nicht in einem proportionalen Zusammenhang mit der Energiedichte des Laserpulses steht. Vielmehr scheint es mit zunehmender Energiedichte eine Sättigung zu geben, die Bohrgeschwindigkeit kann also nicht durch Erhöhen der

Energiedichte beliebig gesteigert werden. In Bild 5-2 sind die mittleren Bohrraten über die Energiedichte für drei verschiedene Bohrtiefen aufgetragen. Die Kurvenverläufe unterstützen die Vermutung, dass es für die maximale Bohrgeschwindigkeit in normaler Atmosphäre eine physikalische Grenze gibt. Die Gründe für diese Tatsache sollen später in Abschnitt 5.2 diskutiert werden.

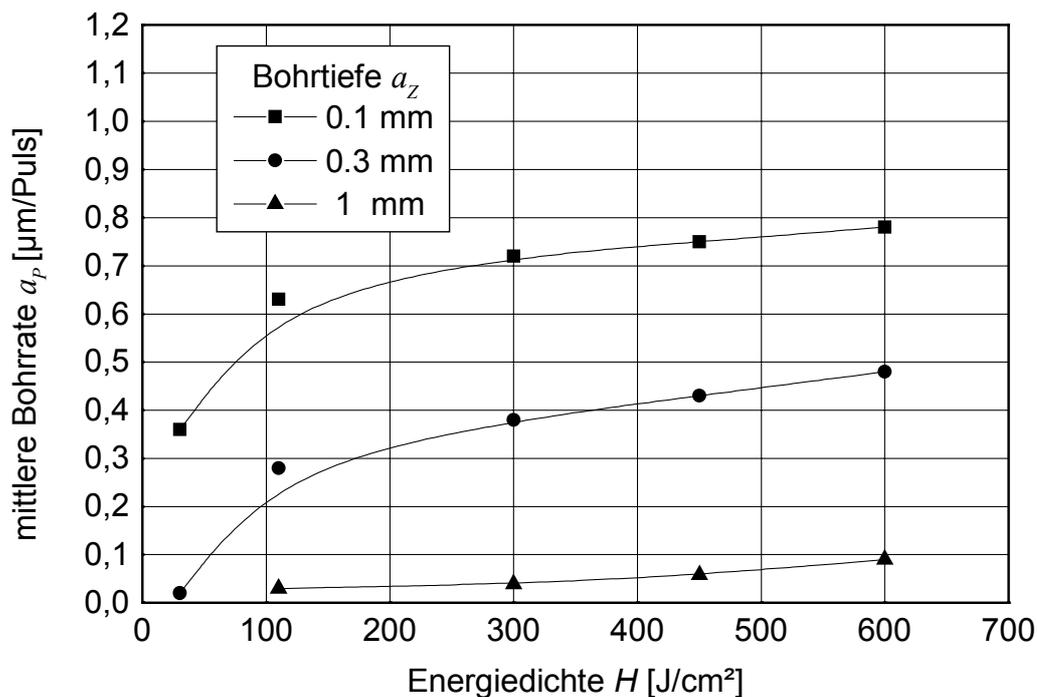


Bild 5-2: Zusammenhang zwischen der Energiedichte H und der mittleren Bohrrate a_p für drei verschiedene Bohrtiefen a_z ($\lambda = 775$ nm, $\tau = 150$ fs)

Die Erhöhung der Energiedichte bewirkt nicht nur eine größere Bohrgeschwindigkeit. Zudem kann festgestellt werden, dass sich mit zunehmender Energiedichte auch die Bohrungsdurchmesser vergrößern. Dieser Effekt ist auf stärkere Ablations- und Luftionisationsplasmen zurückzuführen. Durch das Erhöhen der Energiedichte wird ein größeres Volumen abgetragen, jedoch nicht nur in Tiefenrichtung. Die Auswirkungen der Ablations- und Luftionisationsplasmen werden ebenfalls detailliert in Abschnitt 5.2 erläutert.

Die Ablationseffizienz steht also eindeutig in Zusammenhang mit der Tiefe des Bohrkanals. Je tiefer die Bohrung ist, desto weniger Material kann pro Puls abgetragen bzw. aus dem Bohrkanal entfernt werden. Dieser Zusammenhang ergibt sich durch die stetige Verringerung der Energiedichte am Ort der Abtrags. Im

Folgenden sollen die sich beim Bohrprozess typischerweise ergebenden Intensitätsänderungen näher erläutert werden. Weiterhin soll untersucht werden, inwieweit der Laserpuls durch die sich im Bohrkanal ergebene Atmosphäre aus Umgebungsluft und ablatierten Teilchen beeinflusst wird.

5.1.1 Änderungen der effektiven mittleren Energiedichte beim Laserbohren

Üblicherweise verfolgt man beim Laserbohren das Ziel, möglichst effizient, runde und zugleich geradwandige, also zylindrische Bohrungen zu erzeugen. Ein idealer Prozess zum Erzeugen einer zylindrischen Bohrung müsste gewährleisten, dass während des gesamten Bohrprozesses eine ebene Fläche gleichmäßig mit konstanter Lichtintensität beleuchtet wird und somit der Abtrag gleichmäßig vollzogen werden kann. In der Realität ist man von solchen idealen Bedingungen allerdings weit entfernt. Allein die Tatsache, dass die Energieverteilung im Laserstrahl üblicherweise gaußförmig ist, widerspricht den gewünschten Bedingungen. Durch die gaußförmige Energieverteilung ergeben sich im Zentrum der bestrahlten Fläche höhere Abtragsraten als in den Randbereichen.

Wenn sonst gleiche Laserparameter vorliegen, also die Wellenlänge, die Pulsdauer, die Polarisation und die Richtung der Strahlung konstant sind, wird der Abtrag des Materials nur durch die Energiedichte bestimmt. Die tatsächlich an der Materialoberfläche anliegende Energiedichte kann als *effektive mittlere Energiedichte* (gemittelt über die Fläche) bezeichnet werden. Häufig wird beim Laserabtrag lediglich der Maximalwert der mittleren Energiedichte angegeben, der jedoch nur in der Fokusebene erreicht wird ($H_{\max} = Q/\pi w_0^2$). Tatsächlich ergeben sich im Verlauf des Bohrprozesses erhebliche Änderungen der effektiven mittleren Energiedichte

- infolge geometrischer Veränderungen des Bohrungsprofils,
- durch die vorgegebene Strahlkaustik, und
- durch Reflexionen an der Bohrungswand.

Entsprechend der gaußförmigen Energieverteilung bildet sich im Allgemeinen das Sackloch bis zum Durchbruch an der Materialunterseite konisch aus (Bild 5-3). Während zu Beginn des Bohrprozesses der Laserpuls senkrecht auf die ebene Materialoberfläche trifft, ergibt sich mit fortschreitender Bohrtiefe in der spitz zulaufenden Bohrung eine größer werdende Bestrahlungsfläche. Mit zunehmender Bohrungstiefe findet die Ablation verstärkt auch an den Seitenwänden statt, wo der Einfallswinkel flacher ist. Dadurch verteilt sich die Energie auf eine größere Fläche,

die Energiedichte verringert sich also. Bei gleichbleibender Pulsenergie sinkt die Effizienz des Bohrprozesses daher mit fortschreitender Bohrtiefe.

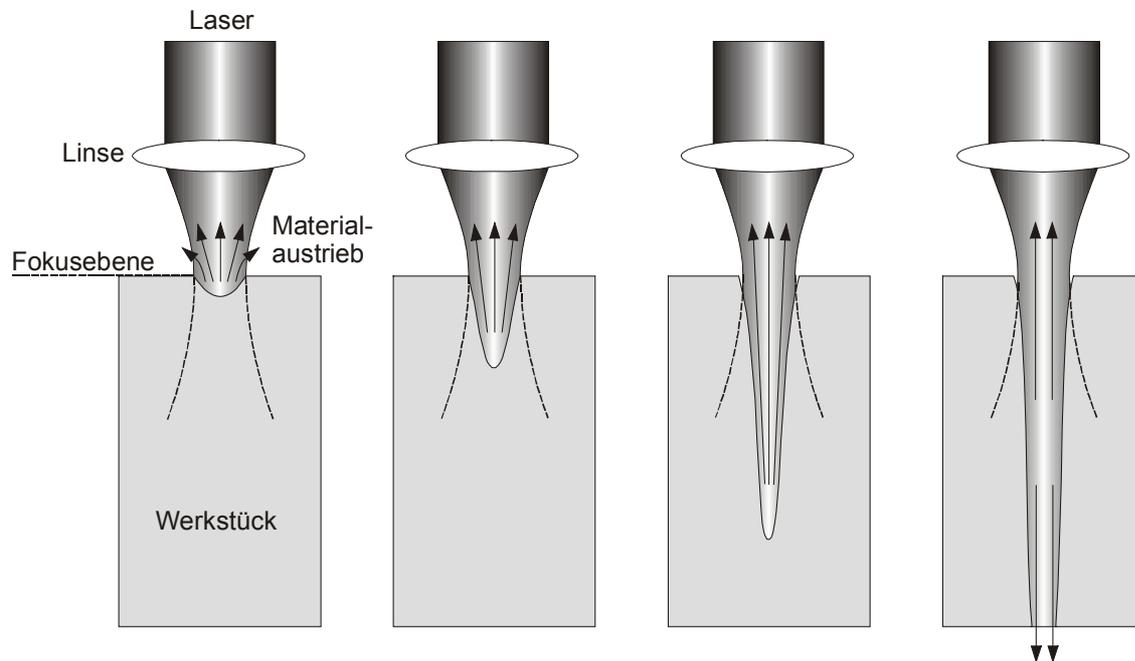


Bild 5-3: Entstehung des Bohrkanals beim Perkussionsbohren

Nicht nur das entstehende konische Bohrungsprofil sorgt für eine Veränderung der effektiven Energiedichte. Auch ändert sich im Verlauf des Bohrprozesses die Energiedichte am Ort der Ablation gemäß der durch die Sammellinse erzeugten Strahlkaustik (Einhüllende der fokussierten Einzelstrahlen). Die Energiedichte ist in der Fokusebene am größten, oberhalb sowie unterhalb dieser Ebene nimmt diese kleinere Werte an. Somit ändert sich die effektive Energiedichte durch die Strahlkaustik mit zunehmender Bohrtiefe. Bei jedem Puls liegt eine andere Energiedichte an der Materialoberfläche im Bohrungskanal vor. Die Änderungen, die sich durch die Fokussierung ergeben, lassen sich einfach durch Berechnung des jeweiligen Strahldurchmessers ermitteln.

Nach [HÜGE92] gilt beim Fokussieren eines TEM_{00} Modes für den Strahlradius $w(z)$:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (5.1)$$

mit der Rayleighlänge

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} . \quad (5.2)$$

w_0 ist dabei der minimale Fokusradius. Das vereinfachte Modell geht davon aus, dass bei einem TEM_{00} Mode das Strahlenbündel nahezu parallel auf die Fokussierlinse trifft und die Linse fehlerfrei abbildet. Unter diesen Annahmen kann der minimale Fokusradius durch

$$w_0 = \frac{\lambda f}{\pi w_s} \quad (5.3)$$

bestimmt werden. Hierbei bezeichnet λ die Wellenlänge der Strahlung, f die Brennweite der Linse und w_s den Strahlradius vor der Linse (Bild 5-4).

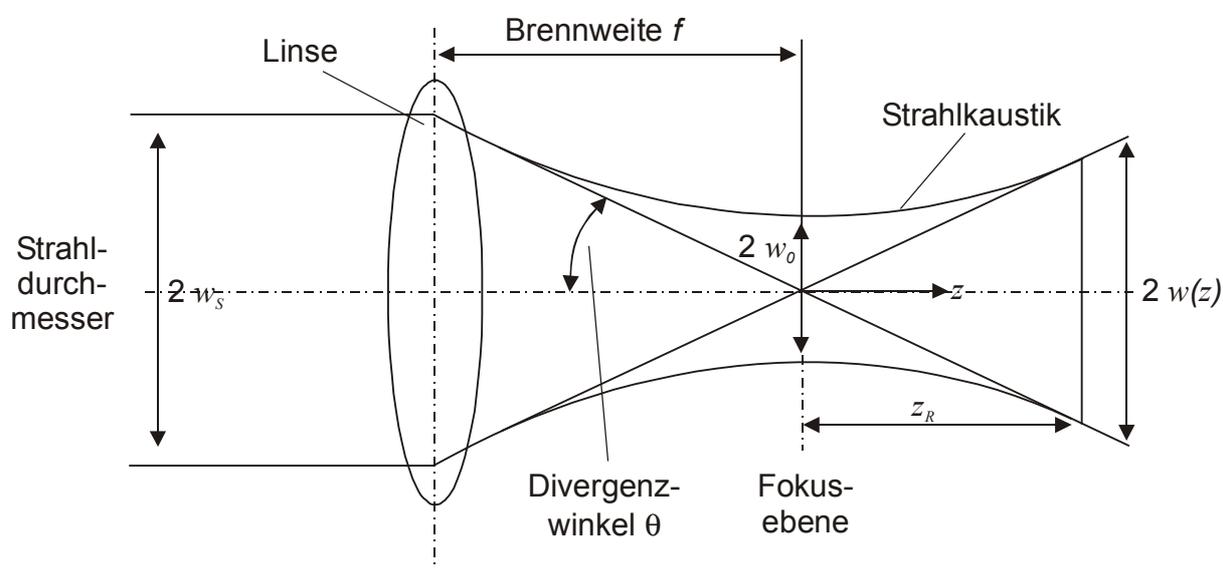


Bild 5-4: Fokussierung eines Gaußstrahls

Um die Abweichungen vom idealisierten Modell zu berücksichtigen, kann der Quotient in Gl. (5.3) mit der Qualitätskennzahl M^2 multipliziert werden. Durch das M^2 wird das Verhältnis der Strahlparameterprodukte vom realen zum TEM_{00} Mode angegeben. Das Strahlparameterprodukt errechnet sich aus dem Radius der Strahltaile w_0 und dem Divergenzwinkel θ . Das M^2 kennzeichnet also die Strahlqualität des Ausgangsstrahls ($M^2 = \pi/2\lambda w_0 \theta$).

Eine gesicherte Aussage über die Strahlqualität bekommt man nur durch Messen der tatsächlicher Strahlkaustik im Fokusbereich (siehe Kap. 4.3). Für den im Rahmen der Experimente verwendeten Laserstrahl konnte ein M^2 von 1.3 ermittelt werden.

Mit Hilfe der Gleichungen (5.1) bis (5.3) lässt sich der Fokusradius entlang der Strahlachse und damit auch die effektive mittlere Energiedichte als Funktion des Abstandes von der Fokusebene bestimmen.

Im Bild 5-5 ist die Energiedichte entlang der Strahlkaustik im Bereich der Fokusebene dargestellt (Bereich $z = -0,5 \text{ mm}$ bis $+0,5 \text{ mm}$ bzgl. der Fokusebene). Bei einer mittleren Wellenlänge von $\lambda = 775 \text{ nm}$, einem Strahlradius von $w_s = 4 \text{ mm}$ und einer Brennweite von $f = 80 \text{ mm}$, ergibt sich rechnerisch ein minimaler Fokusradius von $w_0 \approx 6,5 \mu\text{m}$. Die mittlere Energiedichte errechnet sich jeweils aus der Pulsenergie pro Flächeneinheit:

$$H(w(z)) = \frac{Q}{A(w(z))} = \frac{Q}{\pi w(z)^2} \quad (5.4)$$

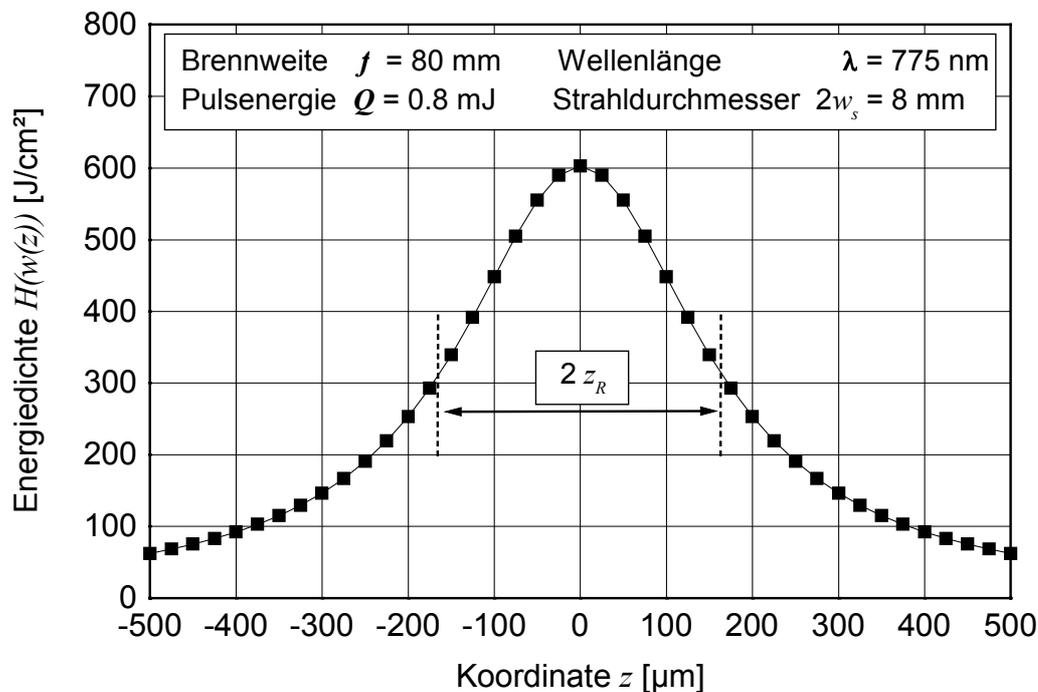


Bild 5-5: Energiedichteänderung im Fokusbereich

Die Graphik zeigt deutlich die starken Veränderungen der Energiedichte über den gewählten Fokusbereich von 1 mm. Bei der hier verwendeten Pulsenergie von $Q = 0,8 \text{ mJ}$ ergibt sich ein Energiedichtemaximum von $H = 600 \text{ J}/\text{cm}^2$ in der Fokusebene ($z = 0$). Im Abstand von $z = \pm 0,5 \text{ mm}$ bzgl. der Fokusebene verringert sich die Energiedichte um fast 90 %. Somit findet beim Erzeugen von 1 mm tiefen Bohrungen eine erhebliche Änderung der effektiven mittleren Energiedichte während des Prozesses statt.

Die starke Energiedichteänderung entlang der Strahlachse erklärt auch den großen Einfluss der Fokusposition bzgl. der Materialstärke s auf die Bohrgeschwindigkeit. In Bild 5-6 sind die Bohrzeiten für zwei verschiedene Materialstärken $s = 1$ mm und $s = 0,5$ mm in Abhängigkeit von der Fokusposition dargestellt. Die Bohrzeiten ergeben sich jeweils aus der bei einer Pulsfolgefrequenz von $f_p = 1$ kHz benötigten minimalen Pulsanzahlen n , die zum Durchbohren der Materialstärke erforderlich sind (Durchgangsbohrungen). Fokusposition $z_F = 0$ mm bedeutet, die Fokusebene liegt genau auf der Oberfläche des Materials.

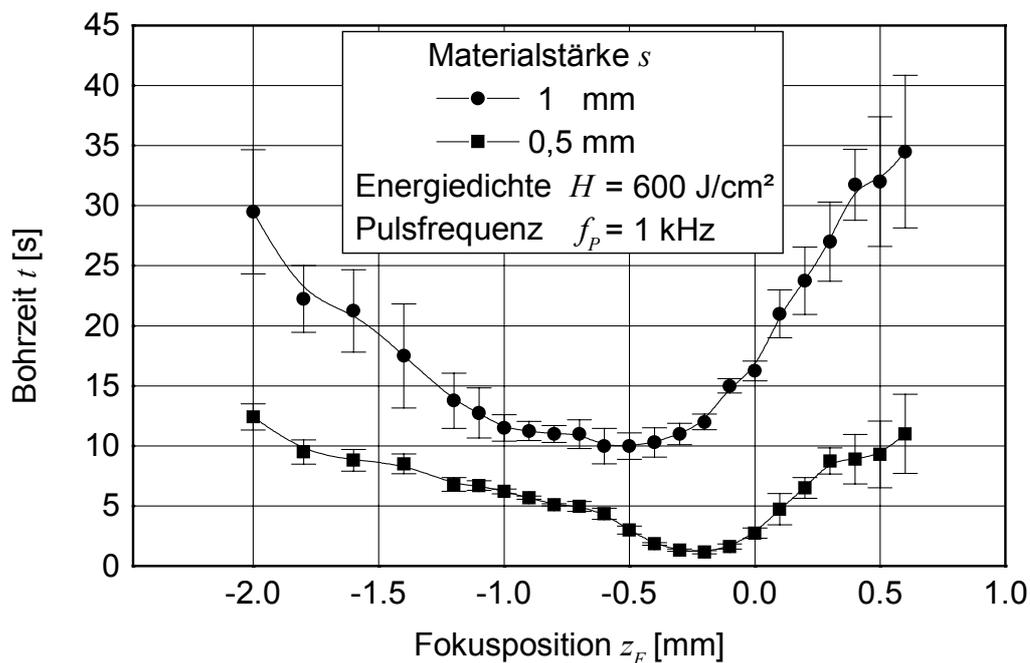


Bild 5-6: Bohrzeit t in Abhängigkeit der Fokusposition z_F bei $s = 1$ mm und $s = 0,5$ mm

Eine positive Fokusposition liegt vor, wenn sich die Fokusebene oberhalb des Materials befindet. Entsprechend liegt die Fokusebene bei einer negativen Fokusposition innerhalb des Materials. Bei der Betrachtung der dargestellten Kurvenverläufe wird deutlich, dass der Bohrprozess am effizientesten verläuft, wenn sich die Fokusebene im mittleren Bereich der Materialstärke befindet. In diesem Fall ergibt sich ein optimales Verhältnis aus Energiedichteänderungen und Verlusteffekten (s.u.). Dieser Zusammenhang konnte auch für das Bohren mit anderen Laserstrahlquellen ermittelt werden [KOCH00].

Liegt der Fokus innerhalb der Materials, so kann zudem eine höhere Prozessstabilität festgestellt werden. Dies ist anhand der Fehlerbalken erkennbar, die den jeweiligen

Messpunkten in Bild 5-6 zugeordneten sind. Bei den dargestellten Messwerten handelt es sich jeweils um arithmetische Mittelwerte, die sich aus den Ergebnissen von je fünf einzelnen Bohrversuchen ergeben. Die eingetragenen Fehlerbalken verdeutlichen die Streuung (oder empirische Standardabweichung) um den jeweiligen arithmetischen Mittelwert. Mit zunehmender Entfernung der Fokusposition von der Materialmitte (unterhalb wie oberhalb) nehmen die Streuungen der Bohrzeiten zu, der Prozessablauf wird instabiler.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich anhand der Bohrgeschwindigkeit keinerlei Aussagen über Form und Qualität der Bohrungen ermitteln lassen. Die Bohrgeschwindigkeit bezeichnet lediglich den Zusammenhang zwischen Bohrtiefe und Prozessdauer bzw. Anzahl der Pulse.

Bei Betrachtung der Veränderungen der Laserintensität während des Bohrprozesses spielt auch die Reflexion der Strahlung im Inneren des Bohrkanals eine wichtige Rolle. Generell wird bei jedem Laserabtrag ein Teil der Strahlung an der Materialoberfläche reflektiert. Teilweise wird die Strahlung diffus, teilweise gerichtet reflektiert. Somit geht immer ein Teil der für die Ablation notwendigen Energie verloren. Der Reflexionsanteil steigt im Allgemeinen mit flacher werdendem Einfallswinkel. In einer konisch zulaufenden Bohrung treten somit mehr Reflexionen auf als beim senkrechten Auftreffen eines Laserpulses auf eine ebene Oberfläche, wie zu Beginn des Bohrprozesses.

Zwar kann der reflektierte Anteil, insbesondere in einem spitz zulaufenden Bohrkanal, an anderer Stelle wiederum absorbiert werden, wenn der Einfallswinkel günstig ist. Allerdings bedeuten Mehrfachreflexionen auch mehr Streuung an den zum Teil relativ rauhen Oberflächen. Zudem gibt es einen größeren Anteil an Energieverlusten durch Wechselwirkungen mit den sich im Bohrkanal befindlichen Teilchen. Somit ergeben sich für den einfallenden Laserpuls entlang des Bohrkanals mehr Verluste durch Reflexionen und Streuung, je tiefer der Kanal ist.

5.1.2 Energieverluste während des Bohrprozesses

Neben den oben genannten Gründen für die Änderungen der effektiven Energiedichte gibt es weitere Einflüsse auf die Energiedichte am Ort der Ablation, welche jedoch auf tatsächliche Energieverluste zurückzuführen sind. Die Höhe der Verluste ändern sich ebenfalls mit zunehmender Bohrtiefe. Sie entstehen

- durch den Materialtransport, der mit größerer Bohrtiefe zunimmt,
- durch die aufgrund der extrem hohen Intensitäten erzeugten Luftdurchbrüche in der Atmosphäre (Ionisation der Luft), und
- durch Wechselwirkungen zwischen Laserpuls und ablatiertem Material (Metалldampf).

Energieverluste und somit Einbußen der Bohreffizienz ergeben sich mit tiefer werdendem Bohrkanal dadurch, dass das ablatierte Material über größere Distanzen bis zur Materialoberfläche transportiert werden muss. Bei längeren Wegen ist auch eine höhere kinetische Energie der abgetragenen Teilchen erforderlich, bzw. bei zu geringer Energie bleibt das abgetragene Material zunächst noch in der Bohrung zurück und muss folglich mehrfach bewegt werden.

Weitere Energieverluste werden hervorgerufen, wenn der Bohrprozess bereits in größere Tiefen fortgeschritten ist und es im Bereich des Fokus im freien Bohrkanal zur Zündung eines Plasmas kommt. Dabei wird aufgrund der extrem hohen Leistungsdichte (Intensität) das Gemisch aus Luft und dem ablatierten Metall ionisiert. Dies bedeutet einen Energieverlust für den späteren Ablationsprozess. Besonders beim Fokussieren von extrem kurzen Laserpulsen nimmt die Intensität sehr schnell hohe Werte an. Zur Ionisation der Luftpartikel wird jedoch nur ein Teil der verfügbaren Pulsenergie beansprucht.

In Bild 5-7 ist der Verlustanteil durch Ionisation beim Fokussieren in normaler Atmosphäre für verschiedene Energiedichten und Pulsfolgefrequenzen dargestellt. Der Verlustanteil kann durch Messung der Pulsenergien vor und nach dem Fokusbereich ermittelt werden. Die Experimente wurden in normaler Umgebung durchgeführt.

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Energiedichte auch jeweils der Energieverlustanteil ansteigt. Durch die räumliche Energieverteilung des Gaußstrahls ergibt sich mit zunehmender Pulsenergie ein größeres Volumen der ionisierten Luftpartikel. Dadurch sind auch die Verluste größer. Im Rahmen der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass bei der Fokussierung von ultrakurzen Laserpulsen (Pulsdauer $\tau = 150$ fs) auf eine Fläche mit einem Durchmesser von $d_0 = 13$ μm

bereits kleine Pulsenergien von $Q \approx 50 \mu\text{J}$ ausreichen, um in der Luft ein sichtbares Plasma zu erzeugen. Die Energiedichte beträgt dann $H \approx 40 \text{ J/cm}^2$, die Leistungsdichte erreicht dabei Werte im Bereich von $I = 10^{14} \text{ W/cm}^2$. In diesem Intensitätsbereich kann allerdings noch kein Energieverlust durch Plasmazündung gemessen werden.

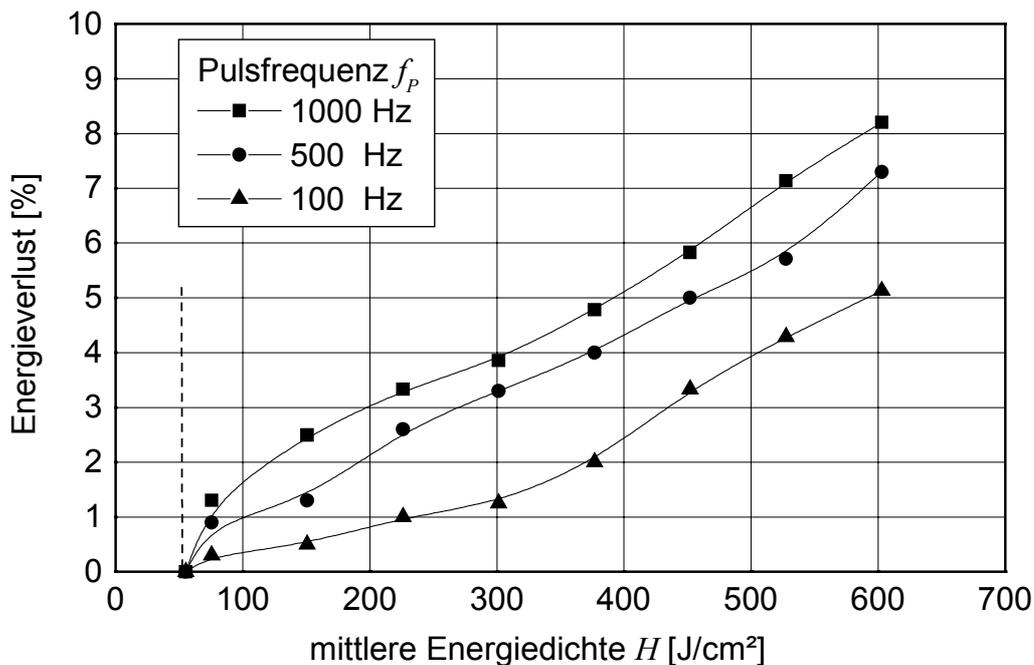


Bild 5-7: Energieverluste durch Luftionisation in normaler Atmosphäre bei unterschiedlichen mittleren Energiedichten H und Pulsfrequenzen f_p

Wird die Energiedichte auf den maximalen Wert von $H = 600 \text{ J/cm}^2$ erhöht, so erhöht sich die Leistungsdichte entsprechend um eine Größenordnung, die Verluste steigen dabei deutlich an. Interessant ist die Tatsache, dass mit höherer Pulsfrequenz auch größere Verluste zu verzeichnen sind. Offensichtlich bleiben auch nach Ende der Plasmazündung ionisierte bzw. erwärmte Teilchen noch mehrere Millisekunden lang in der Luft zurück. Dadurch wird für den jeweils nachfolgenden Puls die Ionisationsschwelle kleiner. Bei gleichbleibender Energieverteilung vergrößert sich somit das Ionisationsvolumen. Dennoch werden bei einer Pulsfrequenz von $f_p = 1 \text{ kHz}$ und einer Energiedichte von $H = 600 \text{ J/cm}^2$ nur maximal 8 % der einfallenden Energie durch die Plasmazündung absorbiert bzw. diffus gestreut.

Untersuchungen haben ergeben, dass das Ablationsplasma nur eine relativ kurze Lebensdauer hat, die deutlich geringer ist als das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen (1 Millisekunde bei $f_p = 1$ kHz). Die Lebensdauer des Ablationsplasmas liegt im Bereich einiger 100 Nanosekunden. Zudem besitzen die ablatierten Teilchen sehr hohe Anfangsgeschwindigkeiten im Bereich von 10^4 bis 10^5 m/s [ITO99, NOLT99a]. Es konnte jedoch auch festgestellt werden, dass beim Laserbohren sich auch nach einigen Millisekunden noch Partikel im Bohrkanal befinden. Die zunächst stark beschleunigten Partikel des Festkörpers werden in einem tiefen Bohrkanal in der normalen Atmosphäre schnell abgebremst [DAUS03, DAUS99]. Das lässt die Folgerung zu, dass mit zunehmender Bohrtiefe stärkere Wechselwirkungen zwischen Laserpuls und den noch im Bohrkanal schwebenden Teilchen zu erwarten sind. Diese Teilchen können einen Teil der einfallenden Strahlung absorbieren oder diese ablenken (Streuung), so dass wiederum weniger Energie zur Ablation zur Verfügung steht. Tests beweisen allerdings, dass die Dichte der Teilchenwolke scheinbar nicht groß genug ist, um einen nennenswerten Energieverlust herbeizuführen. Wenn die Wechselwirkung zwischen Puls und Metaldampf eine deutliche Beeinträchtigung der Laserenergie herbeiführen würde, so müsste der Energieverlust mit zunehmender Pulsfolgefrequenz steigen.

In Bild 5-8 sind die mittleren Ablationsraten a_p für drei verschiedene Materialstärken in Abhängigkeit der Pulsfolgefrequenz f_p dargestellt. Die Bohrrate bleibt je Materialstärke nahezu konstant. Offensichtlich wird also die Bohreffizienz nicht durch die ablatierten Partikel beeinflusst, zumindest nicht im betrachteten Frequenzbereich bis $f_p = 1$ kHz.

Auch wenn die zuletzt genannten Verlusteffekte zum Teil nur einen geringen Anteil an den energetischen Veränderungen im Verlauf des Bohrprozesses haben, so führen diese zusammen mit den im Abschnitt 5.1.1 beschriebenen geometrisch bedingten Verlusten zu einer erheblichen Verringerung der Abtragseffizienz mit fortschreitender Bohrtiefe, wie sie gemäß Bild 5-1 beobachtet werden kann. Da alle Wechselwirkungseffekte mehr oder weniger gleichzeitig zum Tragen kommen, ergibt sich ein sehr komplexer Bohrprozess. Bei jedem Laserpuls, der entlang des Bohrkanals propagiert, liegen, im Vergleich zum vorherigen Puls, leicht veränderte Bedingungen vor. Die Effizienz des Abtrags lässt sich allerdings durch Anpassen der Bedingungen während des Bohrvorgangs optimieren. Beispielsweise kann die Pulsenergie oder die Fokussierung im Verlauf des Bohrvorgangs gezielt variiert werden, um so den Verlusten in bestimmten Phasen des Bohrprozesses entgegenzuwirken. Jedoch haben Änderungen der Bearbeitungsparameter auch stets Auswirkungen auf die Bohrungsgeometrie. Da in der Regel die Bohrungsgeometrie im Vordergrund steht, ist es sinnvoll, zunächst zu ermitteln, welche Bohrparameter bzw. Bohrstrategien zu der gewünschten Bohrungsform

führen. Mit der Kenntnis der grundlegenden Wechselwirkungseffekte während des Bohrprozesses können dann gegebenenfalls Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ergriffen werden.

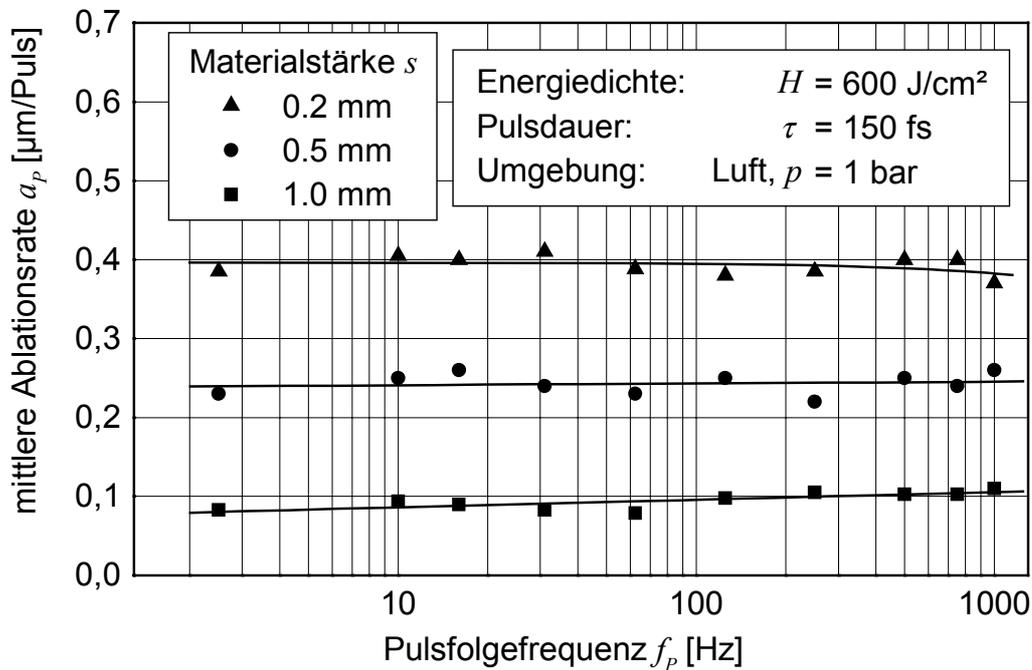


Bild 5-8: Mittlere Ablationsrate a_p bei verschiedenen Pulsfrequenzen f_p und Materialstärken s

5.2 Einflussfaktoren auf die Bohrungsgeometrie

Die Entstehung einer Laserbohrung mit großem Aspektverhältnis wird von unterschiedlichen Effekten beeinflusst. Dabei stehen die Laserparameter, die Strahlformung sowie die Material- und Umgebungsbedingungen in einem komplizierten Zusammenspiel. Je nach Kombination dieser Parameter und Bedingungen können unterschiedliche Bohrungsgeometrien entstehen. Mit dem Begriff „Bohrungsgeometrie“ ist hier das Profil des Bohrkanals in Richtung der Laserachse gemeint. Quer zur Laserachse ist die Bohrung im Allgemeinen kreisförmig (siehe auch Kap. 2.2).

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits erläutert, dass beim Erzeugen von Durchgangsbohrungen mit dem Durchbruch an der Materialunterseite eine weitere Phase des Bohrprozesses beginnt. Die ersten zwei Phasen des Bohrprozesses bis zum Durchbruch dienen zum Erzeugen einer Startkapillare. Ist eine Startkapillare vorhanden, so kann die Bohrung im Weiteren noch nachbearbeitet werden. Die beiden ersten Phasen des Bohrprozesses können also als „Vorbohrphase“

zusammengefasst werden, woran sich die „Nachbohrphase“ anschließt, in der die Geometrie des Bohrkanals durch die Wahl der Bearbeitungsparameter nachträglich beeinflusst werden kann. Allerdings müssen die Weichen für eine bestimmte Form bereits in der Vorbohrphase gestellt werden. Die entscheidenden Parameter sind dabei die Fokussierung des Laserstrahls, also die Strahlkaustik und deren Lage im Material, die Intensität der Strahlung, die sich aus der Energiedichte und der Pulsdauer ergibt, aber auch die Pulsfolgefrequenz sowie die Anzahl der Laserpulse je Bohrphase. Die einzelnen Einflussfaktoren sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

5.2.1 Einfluss der Strahlkaustik auf die Bohrungsgeometrie

Den größten Einfluss auf die Geometrie einer Bohrung bewirkt die Strahlkaustik sowie deren Position relativ zur Werkstückoberfläche (Fokuslage oder Fokusposition). Bild 5-9 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Fokusposition auf das Bohrungsprofil. Aufgetragen sind jeweils die Bohrungseintritts- und -austrittsdurchmesser in Abhängigkeit von der Fokusposition.

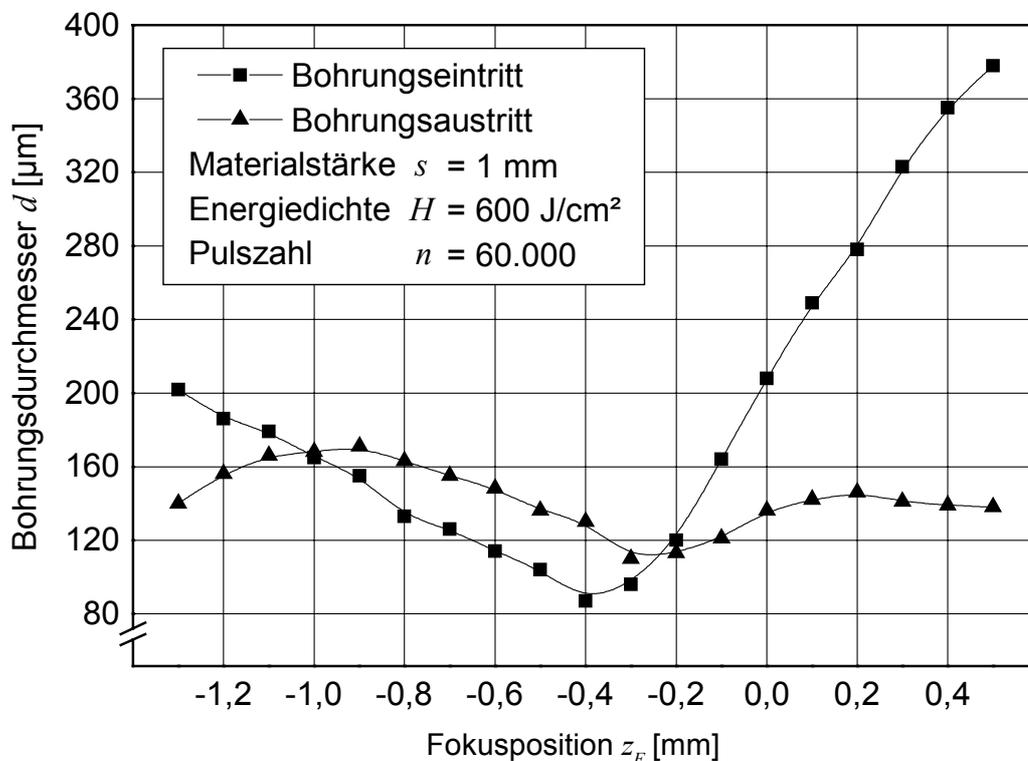


Bild 5-9: Einfluss der Fokusposition z_F auf die Bohrungsgeometrie

Entsprechend Bild 5-6 bedeutet die Fokusposition $z_F = 0$ mm, dass die Fokusebene genau auf der Oberfläche des Materials liegt. Eine positive Fokusposition liegt vor, wenn sich die Fokusebene oberhalb des Materials befindet, eine negative, wenn die Fokusebene im Material liegt.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Ein- und Austrittsdurchmesser mit Änderung der Fokusposition stark variieren. Allerdings beschränkt sich die Graphik nur auf die Durchmesser der Ein- und Austrittsöffnungen. Eine genaue Aussage über das tatsächliche Bohrungsprofil ist anhand dieser Darstellung nicht möglich, lediglich eine Tendenz lässt sich ablesen. Zur Bestimmung des Bohrungsprofils ist immer eine Messung der Innenkontur, beispielsweise durch Abformen mittels Replika-Technik, notwendig.

In Bild 5-10 sind drei typische Bohrungsprofile bei variiertem Fokusposition dargestellt. Liegt die Fokusebene weit oberhalb der Materialoberfläche (positive Fokusposition), so entsteht ein konisches (konvergentes) Bohrungsprofil, d.h. der Durchmesser ist am Bohrungseintritt größer als an dessen Austritt (Profil A). Die Bohrungswand verläuft dabei annähernd geradlinig. Ist die Fokusebene in der Nähe der Oberfläche, so entstehen nahezu zylindrische Bohrungsgeometrien (Profil B). Sobald der Fokus tiefer im Material liegt, bildet sich das Profil ähnlich der Strahlkaustik aus (Profil C). Wiederum konvergent-konische Bohrungsprofile (Profil A) entstehen, wenn sich die Fokusebene unterhalb des Materials befindet.

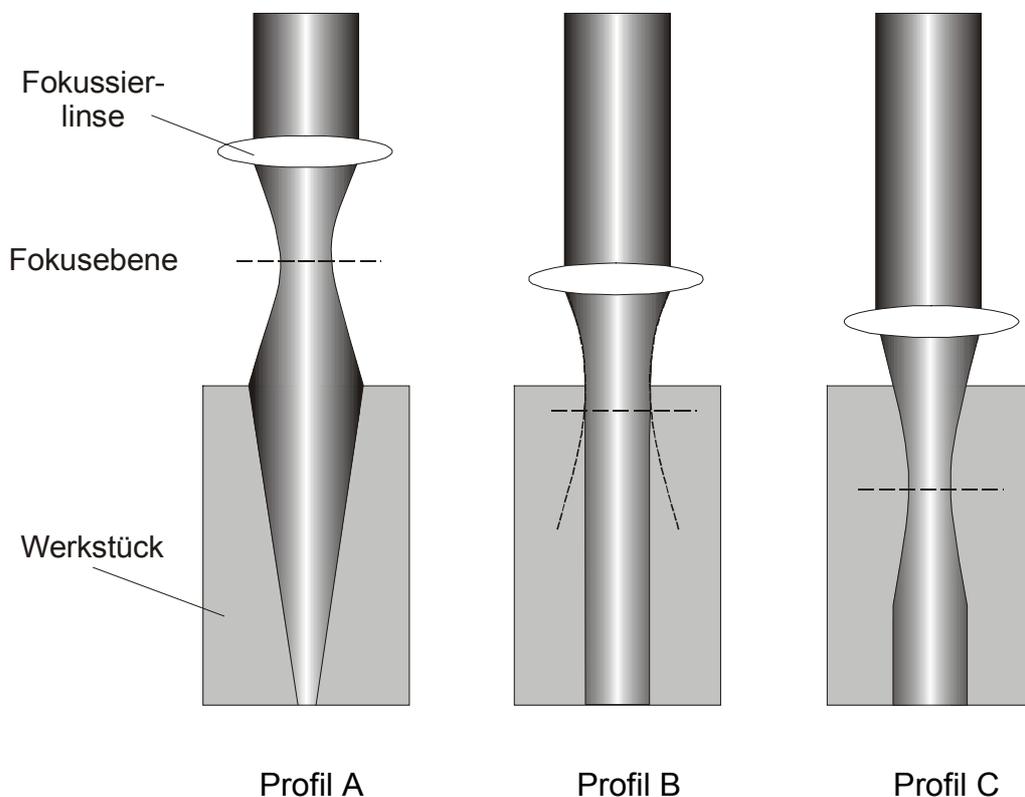


Bild 5-10: Drei typische Bohrungsprofile in Abhängigkeit der Fokusposition

Die Entstehung dieser drei typischen Bohrungsformen kann wie folgt erklärt werden: Bei positiver Fokusposition entsteht eine konische Form, da sich der Laserstrahl unterhalb des Fokus divergent ausbreitet und sich mit zunehmender Bohrtiefe der Abstand zwischen Fokus und Materialoberfläche vergrößert. Dabei verringert sich die Energiedichte am Werkstück. Der Abtrag im Bohrungsgrund wird somit bei zunehmender Bohrtiefe geringer. Das führt zu immer kleiner werdenden Querschnitten und somit zu einem konvergenten Bohrungsprofil.

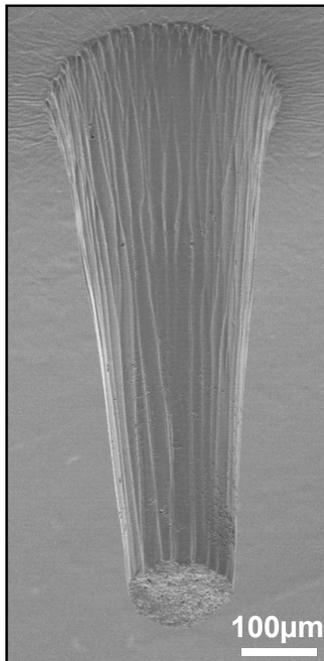
Liegt die Fokusebene nahe der Oberfläche, so stellt sich ein zum Erzeugen zylindrischer Bohrungen günstiger Zustand ein. In Fokusnähe weist die gaußförmige Intensitätsverteilung steile Flanken auf. Dadurch verläuft nach Ablation die Bohrungswand steiler im Material. Der Durchmesser der Eintrittsbohrung ist in Fokusnähe minimal. Somit entsteht ein günstiges Verhältnis zwischen Ablation in der Tiefe, am Grund des Bohrkanals, und der Ablation an der Seitenwand. Hierbei ist der divergente Strahlenverlauf unterhalb der Fokusebene hilfreich. Zusätzlich wird durch die höhere Intensität in der Nähe der Fokusebene effektiver abgetragen, d.h. pro Puls wird mehr Volumen in der Tiefe abgetragen, es sind also weniger Pulse zum Durchbohren notwendig. Die Verluste reduzieren sich durch die insgesamt geringere Pulszahl.

Liegt die Fokusebene innerhalb des Materials, so bildet sich das Profil ähnlich der Strahlkaustik aus. Es entsteht eine Taille in der Nähe der Fokusebene. In dieser Ebene sind die Flanken der Energieverteilung besonders steil. Ein Abtrag an den Wänden findet nach Ausräumung dieses Bereichs kaum noch statt. Unterhalb der Taille bildet sich die Bohrung ähnlich des Profils B aus. Ein Gleichgewicht zwischen Tiefenabtrag und Wandabtrag ergibt einen nahezu zylindrischen Verlauf.

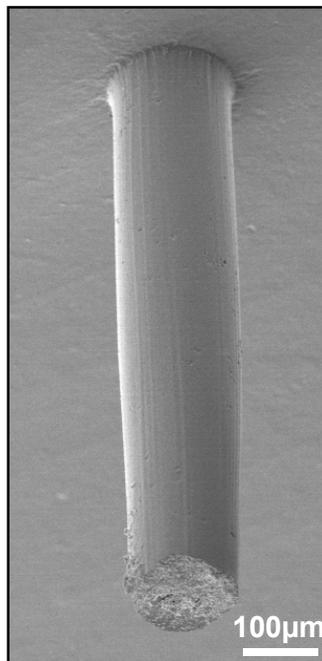
Befindet sich die Fokusebene unterhalb des Materials, so entsteht das Bohrungsprofil entsprechend der konvergenten Strahlkaustik oberhalb der Fokusebene. Der Bohrungsdurchmesser ist dabei aufgrund der geringeren Energiedichte kleiner als beim Bohren mit positiver Fokusposition.

In Bild 5-11 sind Abformungen von drei Bohrungen dargestellt, die bei gleichen Laser- und Prozessparametern, jedoch bei variiertem Fokusposition ($z_F = +0,4, -0,2$ und $-0,8$ mm) gebohrt wurden. Die drei oben beschriebenen unterschiedlichen Bohrungsprofile sind deutlich zu erkennen. Die Bohrung, deren Abformung in Bild 5-11 rechts dargestellt ist, weist eine Taille bei etwa 0,5 mm Bohrtiefe auf, obwohl die eigentliche Fokusposition $z_F = -0,8$ mm ist. Der Grund für die Verlagerung der Bohrungstaille ist die extreme Plasmabildung innerhalb der Bohrungskanals. Durch die Plasmabildung entsteht eine künstliche Strahltaile („virtueller Fokus“) oberhalb der tatsächlichen Fokusebene. Bei den hier verwendeten Laser- und Prozessparametern ergibt sich eine Verlagerung von etwa 0,3 mm. Nähere Erläuterungen zu diesem Effekt werden im folgenden Abschnitt gegeben.

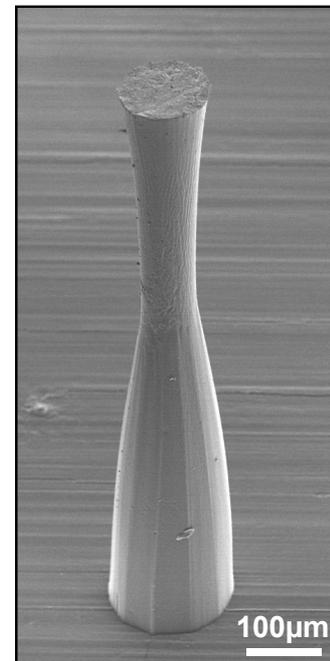
Laser- und Prozessdaten			
Laser	: Ti:Saphir	Pulszahl	: $n = 60.000$
Wellenlänge	: $\lambda = 775 \text{ nm}$	Materialstärke	: $s = 1 \text{ mm}$ (Stahl)
Pulsdauer	: $\tau = 150 \text{ fs}$	Energiedichte	: $H = 600 \text{ J/cm}^2$
Pulsfolgefrequenz	: $f_P = 1 \text{ kHz}$	Umgebung	: Luft, 1 bar



$z_F = +0,4 \text{ mm}$



$z_F = -0,2 \text{ mm}$



$z_F = -0,8 \text{ mm}$

Bild 5-11: Abformungen von drei typischen Bohrungsprofilen bei unterschiedlicher Fokusposition z_F (Strahleintritt jeweils oben)

5.2.2 Einfluss der laserinduzierten Plasmen auf die Bohrungsgeometrie

In Kap. 5.1.2 wurde bereits erwähnt, dass beim Bohren mit intensiven, ultrakurzen Laserpulsen zwei Arten von Plasmen unterschieden werden können. Einerseits entsteht ein Plasma bei der Ablation des Festkörpermateriale, das Ablationsplasma. Der Festkörper wird dabei durch den Laserpuls mit einer so hohen Intensität bestrahlt, dass das feste Material im Bereich der optischen Eindringtiefe der Laserstrahlung direkt verdampft. Die zur Verdampfung notwendige Leistungsdichte liegt bei Metallen je nach Materialeigenschaften im Bereich von $I = 10^6 \text{ W/cm}^2$ und 10^8 W/cm^2 . Bei der Bestrahlung mit ultrakurzen Laserpulsen werden sogar Leistungsdichten im Bereich von $I = 10^{15} \text{ W/cm}^2$ erreicht (s.o.). Bei der Ablösung des Materials entsteht ein Metaldampf mit extrem hoher Temperatur und hohem Dampfdruck. Im diesem Metaldampf sind sowohl freie Ladungsträger (Ionen, Elektronen) als auch Cluster der Metallatome enthalten. Dieser Zustand wird als

Plasma bezeichnet. Zwar findet bei der kurzen Bestrahlungszeit der Femtosekunden-Laserpulse keinerlei direkte Wechselwirkung des Ablationsplasmas mit dem einfallenden Laserpuls selbst statt, jedoch steht das Plasma im Energieaustausch mit der Werkstückoberfläche und der umgebenden Atmosphäre.

Neben dem Ablationsplasma ist zudem Plasmaerzeugung in der freien Atmosphäre im Bereich der Fokusebene zu beobachten. Ähnlich wie beim Ablationsplasma sorgen hier hohe Leistungsdichten für die Trennung der Luftmoleküle in einzelne Ladungsträger (Luftionisation). Nach [HÜGE92] beginnt die Ionisation der freien Atmosphäre etwa bei $I \geq 10^9 \text{ W/cm}^2$.

Bei genauerer Betrachtung der im Verlauf eines Bohrvorgang entstehenden Plasmen, lassen sich grundsätzlich drei Fälle unterscheiden: Liegt der Fokus genügend weit im Material, so reicht die Energiedichte nicht aus, um die Luft oberhalb der Materialoberfläche zu ionisieren. In diesem Fall gibt es kein Ionisationsplasma. Plasmazündung ist nur infolge der Ablation an der Materialoberfläche zu beobachten. Befindet sich die Fokusebene weiter oben im Material, in der Nähe der Oberfläche, so kommt es schon vor der eigentlichen Ablation in der freien Atmosphäre zur Luftionisation, während das Ablationsplasma kurze Zeit später nach der Wechselwirkung mit dem Festkörper initiiert wird. In diesem Fall können sich beide Plasmen überlagern und gegenseitig beeinflussen. Befindet sich die Fokusebene genügend weit oberhalb der Materialoberfläche, so sind zwei räumlich getrennte Plasmen zu beobachten (Bild 5-12).

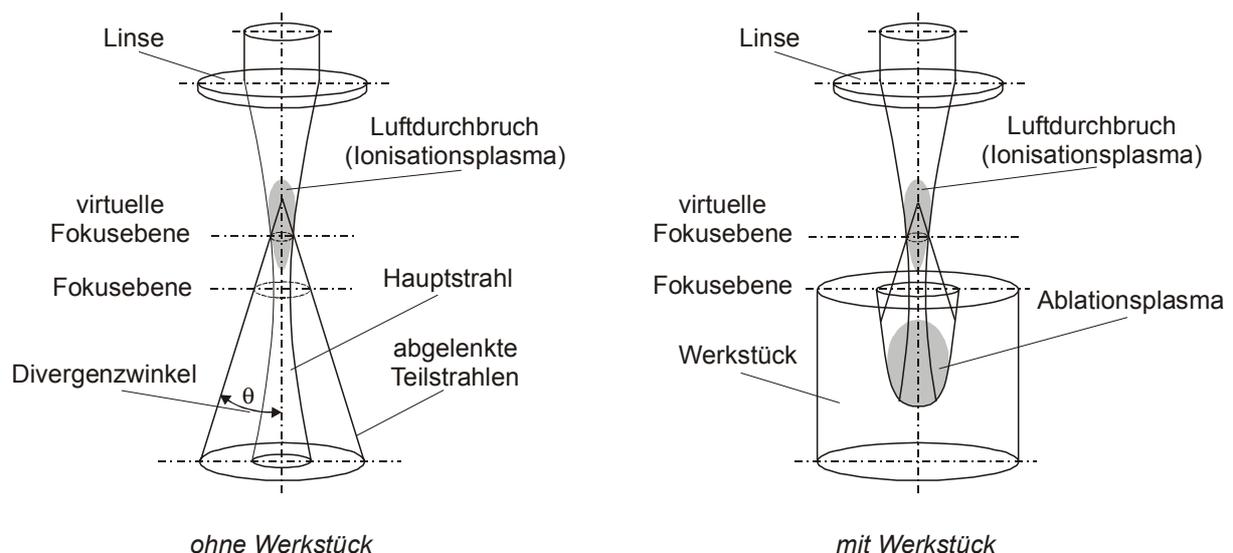


Bild 5-12: Plasmaerzeugung in der freien Atmosphäre (Ionisationsplasma) und am Ort der Ablation (Ablationsplasma)

Da die Fokusposition beim Bohren mit Laserstrahlung typischerweise in der Nähe der Oberfläche liegt, zudem zum Erzeugen tiefer Bohrungen eine relativ hohe Energiedichte notwendig ist, findet stets eine Überlagerung der beiden Plasmen, zumindest zu Beginn eines Bohrprozesses statt. Die starke Plasmabildung, sowohl des Ionisationsplasmas also auch des Ablationsplasmas, sorgt für ein Aufweiten des Bohrungseintritts. In Bild 5-13 sind die Bohrungsdurchmesser d in Abhängigkeit der Energiedichte H dargestellt. Die Graphik zeigt die Eintrittsdurchmesser nach jeweils zwei unterschiedlichen Pulszahlen ($n = 100$ und 20.000). Die Fokusposition für alle Bohrversuche ist $z_F = 0$ mm, die Fokusebene liegt also direkt auf der Oberfläche. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich mit steigender Energiedichte die Bohrungsdurchmesser erheblich vergrößern. Im hier dargestellten Energiedichtebereich von $H = 4$ bis 600 J/cm² kann eine Vergrößerung des Eintrittsdurchmessers je nach Anzahl der Pulse um das 3- bis 5fache festgestellt werden. Nur bei sehr geringer Energiedichte (vergl. 4 J/cm²) liegt der Bohrungsdurchmesser im Bereich des tatsächlichen Fokusedurchmessers ($d_0 \approx 13$ μm). Nicht nur die Energiedichte, sondern auch die Anzahl der Laserpulse beeinflusst den Bohrungsdurchmesser. Mit jedem Puls vergrößert sich der Durchmesser der Eintrittsöffnung.

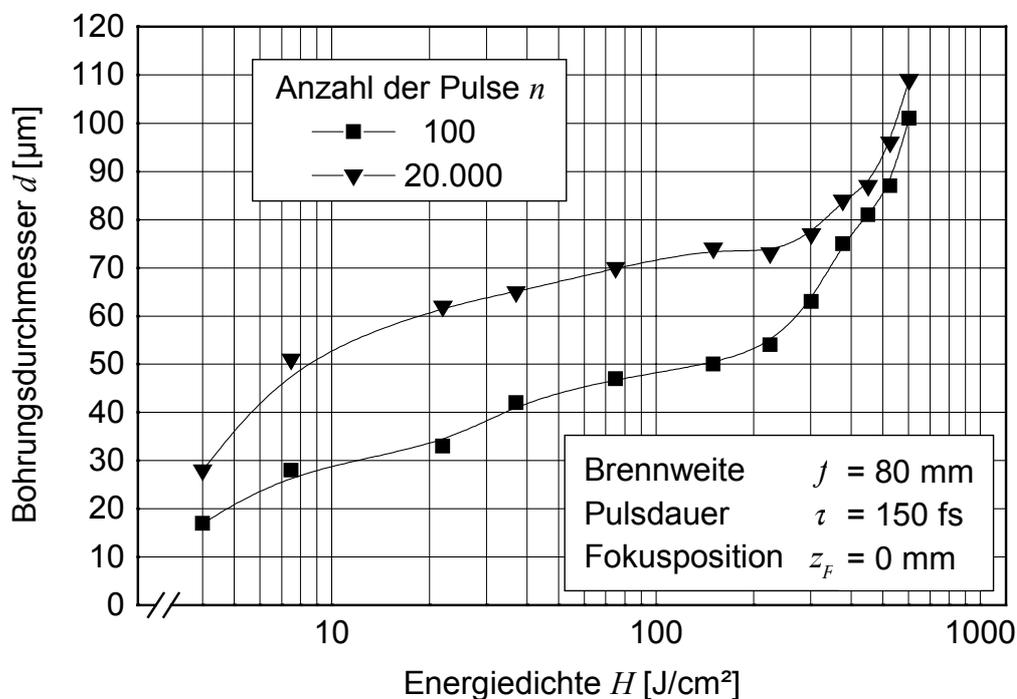


Bild 5-13: Einfluss von Energiedichte H und Pulsanzahl n auf den Bohrungsdurchmesser d

Dieser Effekt kann wie folgt erklärt werden: Wie bereits in Kap. 2.2 erläutert, kommt es bei hohen Energiedichten ($H > 0,5 \text{ J/cm}^2$) aufgrund der Diffusion überthermischer Elektronen zu Ablationstiefen, die erheblich größer sind als die optische Eindringtiefe der Laserstrahlung. Dabei wird eine Schmelzschicht erzeugt. Die Plasmabildung, die stark durch den Luftsauerstoff unterstützt wird, erzeugt einen so großen Ablationsdruck, dass verdampftes und geschmolzenes Material gleichzeitig mit hoher Expansionsgeschwindigkeit aus der Kontur gedrückt werden. Dadurch ergibt sich ein vergrößertes Ablationsvolumen, dass sich nicht nur in Tiefenrichtung, sondern auch radial zur Strahlachse ausweitet. Somit vergrößert sich der Durchmesser einer Bohrung stets mit zunehmender Energiedichte. Beim Perkussionsbohren wird zwar der größte Teil des Bohrungsquerschnitts durch die ersten Pulse erzeugt, dennoch können nachfolgende Pulse durch die starke Plasmaentwicklung weiter abtragen und somit den Bohrungsdurchmesser solange vergrößern bis die Energiedichte an der Bohrungswand die Ablationsschwelle des Materials unterschreitet.

Nicht nur das Ablationsplasma, auch das Luftionisationsplasma unterstützt die Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers bei steigender Energiedichte. Wie in Bild 5-12 dargestellt, bildet sich das Plasma bei genügend hoher Energiedichte im Zentrum des Strahlquerschnitts bereits oberhalb der Fokusebene aus. Die durch den Laserpuls verursachte Plasmawolke lenkt dabei einen Teil der Strahlung desselben Pulses ab, wobei einzelne Filamente entstehen (Strahlfilamentierung). Die Plasmawolke hat auf diesen Teil der Strahlung eine defokussierende Wirkung, der Hauptanteil der Strahlung folgt jedoch der ursprünglichen Strahlkaustik. Durch das Ionisationsplasma ergibt sich also ein größerer Divergenzwinkel und gleichzeitig bildet sich eine andere Strahltaile, deren schmalste Stelle oberhalb der eigentlichen Fokusebene liegt. Diese verlagerte, von der Größe des Ionisationsplasmas abhängige Ebene kann als „virtuelle Fokusebene“ bezeichnet werden (vgl. Bild 5-12). Der minimale Fokusdurchmesser in der virtuellen Fokusebene ist stets größer als der ursprüngliche Fokusdurchmesser. Durch die Ablenkung der Teilstrahlen mit einem größeren Divergenzwinkel vergrößert sich auch der Bohrungsquerschnitt.

Der starke Einfluss des Ionisationsplasmas auf die Strahlablenkung kann anhand eines einfachen Experiments überprüft werden. Dabei wird der fokussierte Laserstrahl entlang einer Metalloberfläche geführt, während gleichzeitig die Position des Fokus senkrecht zur Oberfläche variiert wird. Durch den Materialabtrag lässt sich so die Strahlkaustik im Bereich des Fokus auf der Metalloberfläche abbilden. Um eine maßstabsgetreue Abbildung zu erhalten, muss sich der Fokus in beide Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit bewegen. In Bild 5-14 oben ist das Prinzip dieses Experiments skizziert. Im linken Teil der Skizze befindet sich die Fokusebene unterhalb der Metalloberfläche, im rechten Teil liegt die Fokusposition oberhalb der

Metalloberfläche. In Bild 5-14 unten sind zwei Abbildungen der Strahlkaustik bei unterschiedlicher Energiedichte dargestellt ($H_{max} = 30 \text{ J/cm}^2$ und 600 J/cm^2). Bei höherer Energiedichte zeigt die Strahlkaustik deutlich eine starke Vergrößerung des Divergenzwinkels sowie die Bildung der virtuellen Fokusebene, die sich in diesem Vergleich um ca. $300 \mu\text{m}$ gegenüber der ursprünglichen Fokusebene in Richtung der Fokussieroptik verschiebt. Sowohl das Ionisationsplasma als auch das Ablationsplasma sind sehr stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Sie bilden sich am stärksten in normaler Atmosphäre aus. In Vakuum- oder Schutzgasumgebungen, wie z.B. in Helium oder Argon, ist die Plasmaausbildung deutlich kleiner.

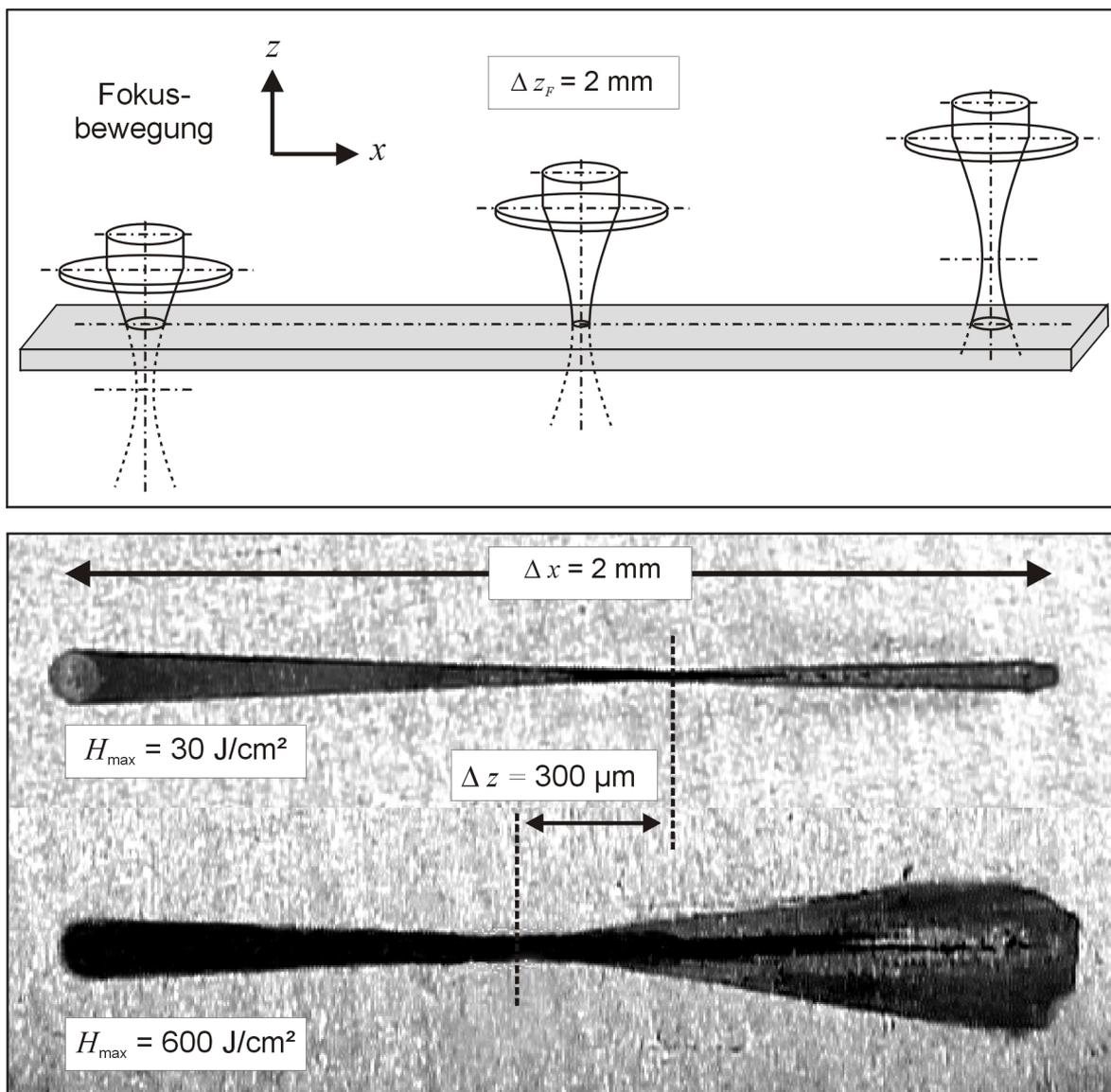


Bild 5-14: Einfluss des Ionisationsplasmas auf die Strahlkaustik

Die starken Plasmaeffekte wirken sich nicht nur auf die Größe der Eintrittsöffnung der Bohrung aus. Je nach Intensität, Ort und Häufigkeit (Repetitionsrate) der laserinduzierten Plasmen kann das gesamte Bohrungsprofil beeinflusst werden. Dabei spielt, zumindest beim Bohren in normaler Atmosphäre, auch die Pulsfolgefrequenz eine wichtige Rolle. Der Einfluss der laserinduzierten Plasmen auf das Bohrungsprofil kann durch vergleichende Untersuchungen in normaler Atmosphäre und unter Vakuumbedingungen demonstriert werden. In Bild 5-15 sind die gemessenen Ein- und Austrittsdurchmesser von 1 mm tiefen Bohrungen dargestellt. Die Bohrungen wurden jeweils bei verschiedenen Pulsfolgefrequenzen f_P im Vakuum erzeugt. Die Fokusposition bei den durchgeführten Bohrversuchen ist jeweils $z_F = 0$ mm. Beim Vergleich der Durchmesser kann festgestellt werden, dass bei allen Bohrungen eine konvergent-konische Bohrungsgeometrie zu erkennen ist. Die Eintrittsdurchmesser sind jeweils deutlich größer als die Durchmesser der Bohrungsausritte. Offensichtlich wird die Bohrungsentstehung im Vakuum nicht durch die Pulsfolgefrequenz beeinflusst, da sowohl die Eintrittsdurchmesser als auch die Austrittsdurchmesser über den gesamten Frequenzbereich nahezu konstant bleiben.

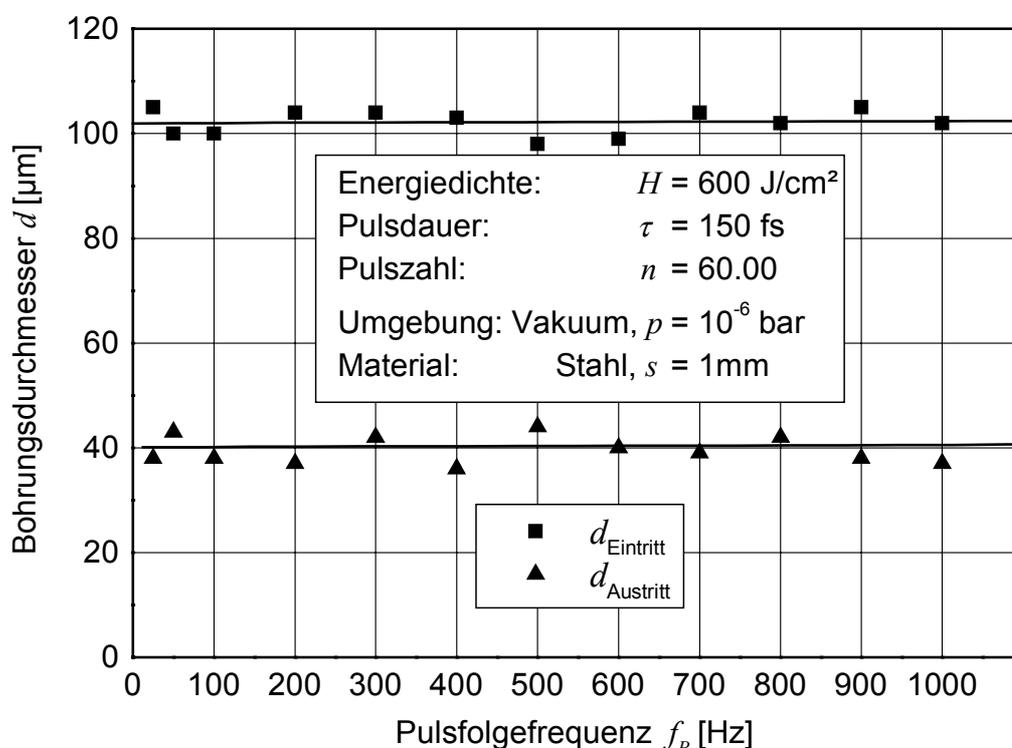


Bild 5-15: Bohrungsgeometrie in Abhängigkeit von der Pulsfolgefrequenz f_P beim Bohren in Vakuum

Ein ganz anderes Verhalten zeigt sich, wenn die gleichen Bohrversuche in normaler Atmosphäre durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der entstehenden virtuellen Fokusebene (s.o.) wurde bei dieser Versuchsreihe die Fokusposition auf $z_F = -0,3$ mm gesetzt. Die Ergebnisse sind in Bild 5-16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei sehr kleiner Pulsfolgefrequenz im Vergleich zu den Vakuumexperimenten sowohl die Eintritts- als auch die Austrittsdurchmesser der Bohrungen nahezu doppelt so groß sind. Bei kleinen Folgefrequenzen entstehen ebenfalls konvergente Bohrungsprofile ($d_{\text{Eintritt}} > d_{\text{Austritt}}$). Wird die Pulsfolgefrequenz weiter erhöht, bis sie den maximalen, durch das Lasersystem begrenzten Wert von 1 kHz erreicht, so ist eine interessante Entwicklung der Bohrungsgeometrie zu beobachten: Mit zunehmender Wiederholfrequenz verringert sich der eintrittsseitige Bohrungsdurchmesser von anfänglich $d \approx 170$ μm auf ca. $d \approx 100$ μm . Bei einer Pulsfolgefrequenz $f_P = 1$ kHz werden in normaler Atmosphäre also ähnliche Eintrittsdurchmesser erreicht wie bei den Vakuumexperimenten. Gleichzeitig bewirkt die Erhöhung der Pulsfolgefrequenz ein Aufweiten des Austrittsdurchmessers auf ca. $d = 135$ μm . Die Austrittsöffnungen sind also im höheren Frequenzbereich größer als die Eintrittsöffnungen, es entstehen divergente Bohrungsgeometrien.

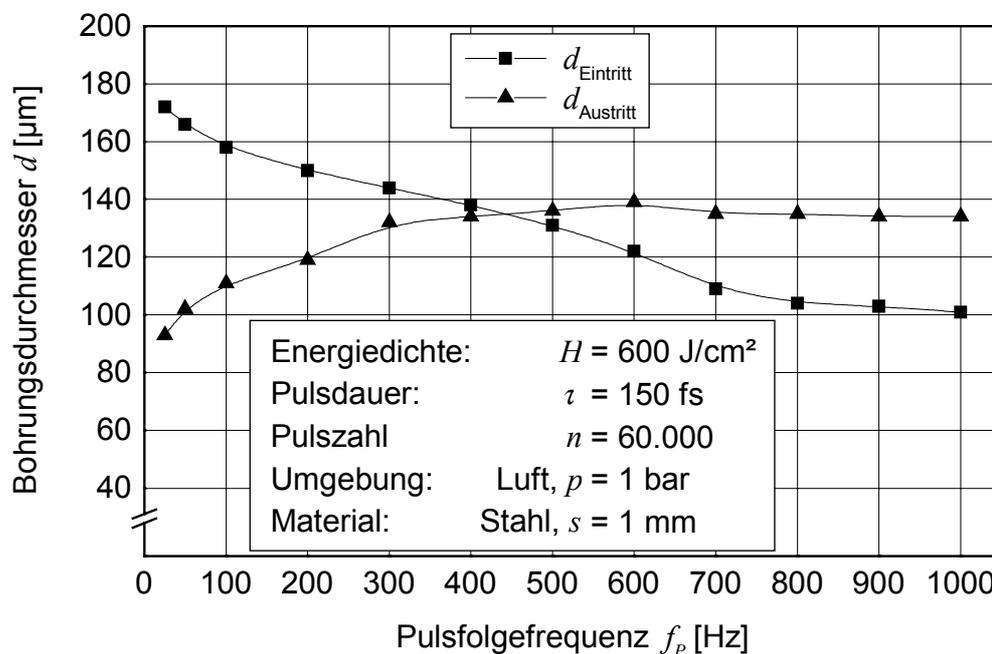


Bild 5-16: Bohrungsgeometrie in Abhängigkeit von der Pulsfolgefrequenz f_P beim Bohren in normaler Atmosphäre, Fokusposition $z_F = -0,3$ mm

Die starken Unterschiede beim Bohren in normaler Atmosphäre und in Vakuum können wie folgt erklärt werden: Findet der Bohrprozess in einer evakuierten Umgebung statt, so ist die Plasmaentwicklung um ein Vielfaches geringer als in normaler Atmosphäre. In normaler Atmosphäre wird die Plasmazündung sehr stark durch den Luftsauerstoff und durch ablatierte Partikel unterstützt. Im Vakuum werden die einfallenden Laserpulse nicht durch ablatierte Partikel irritiert, da diese sich in der Zeit zwischen den Laserpulsen im evakuierten Raum ungebremst bewegen und somit den Bohrkanal genügend schnell verlassen können. Daher gibt es auch keine Veränderungen des Bohrprozesses bei Variation der Pulsfolgefrequenz, wie Bild 5-15 verdeutlicht.

Bei Normaldruck führt die stärkere Ausbildung der Plasmen zu einer Aufweitung des unteren Teils des Bohrkanals, insbesondere wenn die Fokusposition tiefer im Material liegt. Aufgrund der kürzeren Relaxationszeiten liegt bei steigender Pulsfolgefrequenz ein dichteres Gemisch aus Luft und Partikeln vor. Durch die höhere Partikeldichte sinkt die Schwelle der Plasmazündung, die Intensität und das Volumen der Plasmen nehmen infolgedessen zu. Dadurch wird auch eine stärkere Ablenkung der Strahlfilamente bewirkt (vgl. Bild 5-14). Stärkere Plasmen und größere Divergenzwinkel führen zu größeren Abträgen an den Wänden des Bohrkanals und somit zu einer Aufweitung der Bohrungsausstrittsöffnungen.

Zu Beginn des Bohrprozesses, wenn der Abtrag an der Oberfläche des Materials stattfindet, spielt die Wechselwirkung mit den ablatierten Partikeln eine untergeordnete Rolle. In dieser Phase des Prozesses können die Teilchen auch seitlich in alle Richtungen den Ort der Ablation mit hoher Geschwindigkeit verlassen. Die Dichte der Partikel beim Auftreffen der folgenden Laserpulse ist somit geringer als im tiefen Bohrkanal. Bei Prozessbeginn bleiben die Luftschichten nahe der Metalloberfläche und die Metalloberfläche selbst auch nach dem eigentlichen Ablationsvorgang erwärmt. Je kürzer die Zeit zwischen den Laserpulsen ist, desto höher ist die Umgebungstemperatur nahe der Metalloberfläche. Die höhere Umgebungstemperatur bewirkt eine Reduzierung der Moleküldichte der Atmosphäre, wodurch ein Art Vakuumzustand erreicht wird. Hieraus ergibt sich die Erklärung für die Verringerung der Eintrittsdurchmesser bei höheren Pulsfolgefrequenzen. Durch die geringere Luftdichte sind die Intensitäten und Volumina der Ablations- und Ionisationsplasmen ebenfalls geringer. Dadurch ist eine bessere Fokussierung bei gleichzeitig reduzierter Strahlzerstörung möglich. Folglich entstehen bei höheren Pulsfolgefrequenzen kleinere Eintrittsdurchmesser.

In Bild 5-17 sind vergleichend vier verschiedene Abtragsspuren auf einer Stahloberfläche zu erkennen. Diese wurden nach dem in Bild 5-14 beschriebenen Experiment hergestellt. Die erste Spur (links) wurde im Vakuum bei einer Pulsfolgefrequenz $f_p = 1$ kHz, die anderen drei Spuren wurden in normaler

Atmosphäre bei unterschiedlichen Pulsfolgefrequenzen erzeugt. Die Spuren zeigen jeweils die Abbildung des Fokusbereichs über eine Länge von 2 mm.

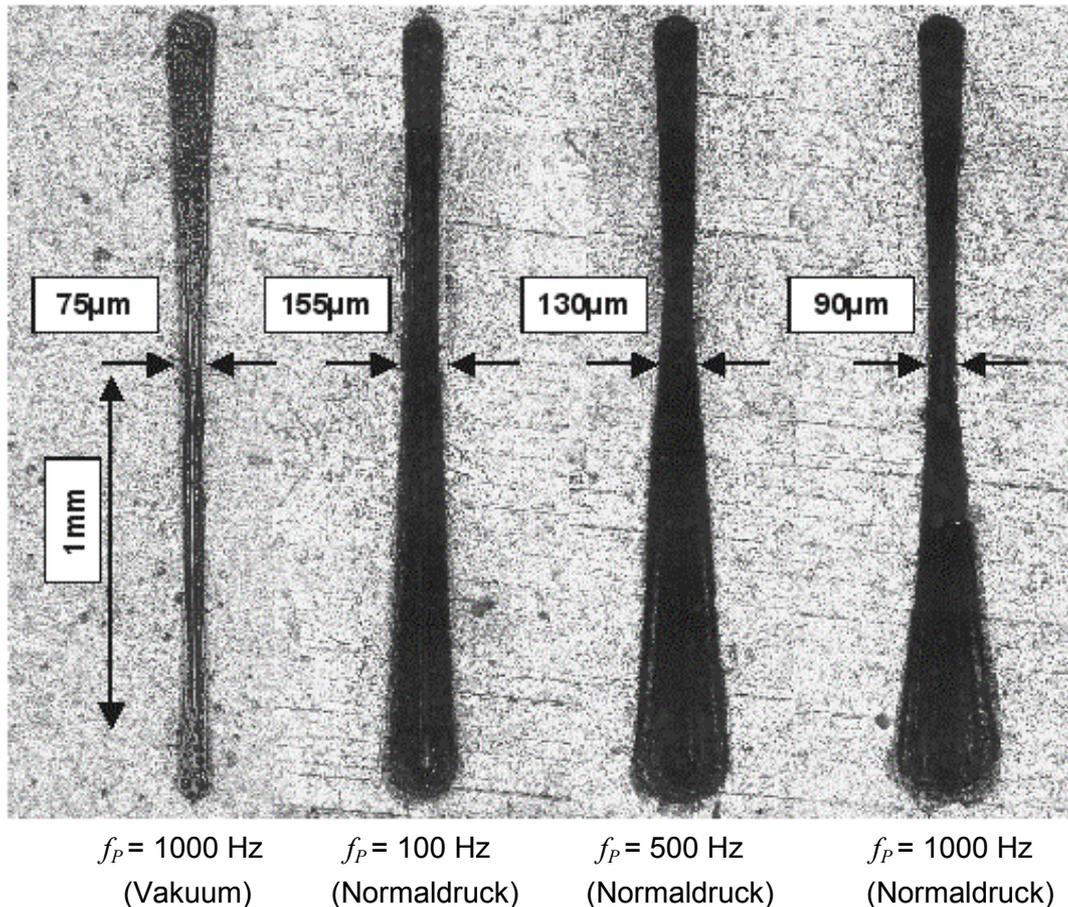


Bild 5-17: Abbildung der Strahlkaustik im Vakuum (links) bei $f_p = 1 \text{ kHz}$ und in normaler Atmosphäre bei verschiedenen Pulsfolgefrequenzen

Dieses Experiment unterstützt die Erläuterungen zu den oben beschriebenen Zusammenhängen zwischen der Bohrungsgeometrie und der Pulsfolgefrequenz bei unterschiedlichem Umgebungsdruck (Bild 5-16). Im Vakuum sind Plasmabildung und Strahlableitung gering. Daher werden beim Bohren auch vergleichsweise kleine Eintrittsdurchmesser erreicht. Die Bohrungen erhalten ein konvergentes Profil. In normaler Umgebung werden bei kleinen Pulsfolgefrequenzen relativ große Eintrittsdurchmesser erreicht (vgl. Spurbreite im Fokus bei 100 Hz ca. 155 μm). Die Ausbildung der Plasmen ist deutlich stärker als im Vakuum, jedoch reicht die Plasmaintensität nicht aus, um im tiefen Bohrkanal genügend Material abzutragen, so dass eine zylindrische oder divergente Bohrungsgeometrie entsteht. Bei höheren Pulsfolgefrequenzen wird einerseits die Plasmaausbildung durch die höhere

Partikeldichte im Inneren des Bohrkanals unterstützt, wodurch größere Austrittsdurchmesser möglich sind. Andererseits führen zu Beginn des Bohrprozesses Aufheizungen in den oberflächennahen Bereichen zu einer besseren Strahlfokussierung und weniger Plasmabildung. Dadurch entstehen, wie in Bild 5-16 gezeigt, relativ kleine Eintrittsdurchmesser. Insgesamt können daher nur bei genügend hohen Pulsfolgefrequenzen und hohen Energiedichten divergente Bohrungsprofile erzeugt werden.

In Kap. 2.3 wurde beschrieben, dass für eine präzise Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen stets eine optimale Leistungsdichte der Laserstrahlung erforderlich ist. Insbesondere bei zu hoher Leistungsdichte wird die Präzision durch das Auftreten von Schmelze beeinträchtigt. Zudem führt die Zerstörung des Strahls durch das intensive Plasma typischerweise zur Ausbildung von Längsriefen an der Bohrungswand [OSTE00b]. Zum Erzeugen von Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis ist jedoch eine hohe Leistungsdichte notwendig, damit die gewünschte Bohrungstiefe überhaupt erreicht wird. Es stellt sich daher die Frage, warum es dennoch gelingt, genaue und reproduzierbare Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis zu erzeugen. Hierzu müssen die bereits erwähnten Phasen des Bohrprozesses, die „Vorb Bohrphase“ und die „Nachbohrphase“ betrachtet werden. In der Vorb Bohrphase wird mit maximaler Leistungsdichte eine zunächst, insbesondere austrittsseitig, kleine Durchgangsbohrung erzeugt. In dieser Phase des Prozesses ist die Bohrung stark durch Schmelz- und Riefenbildung gekennzeichnet. In der sich daran anschließenden Nachbohrphase findet die Nachbearbeitung der Kontur statt, wobei der Hauptteil der Laserenergie mehr oder weniger ungehindert den Bohrkanal passiert. Nur am äußeren Rand des fokussierten Laserstrahls, durch das intensive Ionisationsplasma und durch die abgelenkten Strahlfilamente, findet noch Abtrag statt. Hierbei reduziert sich die Laserintensität an der Materialoberfläche auf Werte, die in der Nähe der Ablationsschwelle des Materials liegen. Somit findet nach der nur bedingt präzisen Vorb Bohrphase sukzessive eine feine und schädigungsarme Nachbearbeitung statt. In Bild 5-18 sind verschiedene Stufen der Nachbohrphase dargestellt. In der unteren Reihe sind jeweils elektronenmikroskopische Aufnahmen der Bohrungsausritte abgebildet. Man erkennt, dass in diesem Beispiel nach etwa 10.000 Laserpulsen ein Durchbruch erreicht ist. Allerdings sind auch nach 40.000 Laserpulsen immer noch feine Riefen in der Bohrungswand zu erkennen. Erst durch weitere Laserpulse kann die Kontur vollständig geglättet werden. Die Bohrungen wurden mit maximaler Leistungsdichte und einer Pulsfolgefrequenz $f_p = 1$ kHz gebohrt.

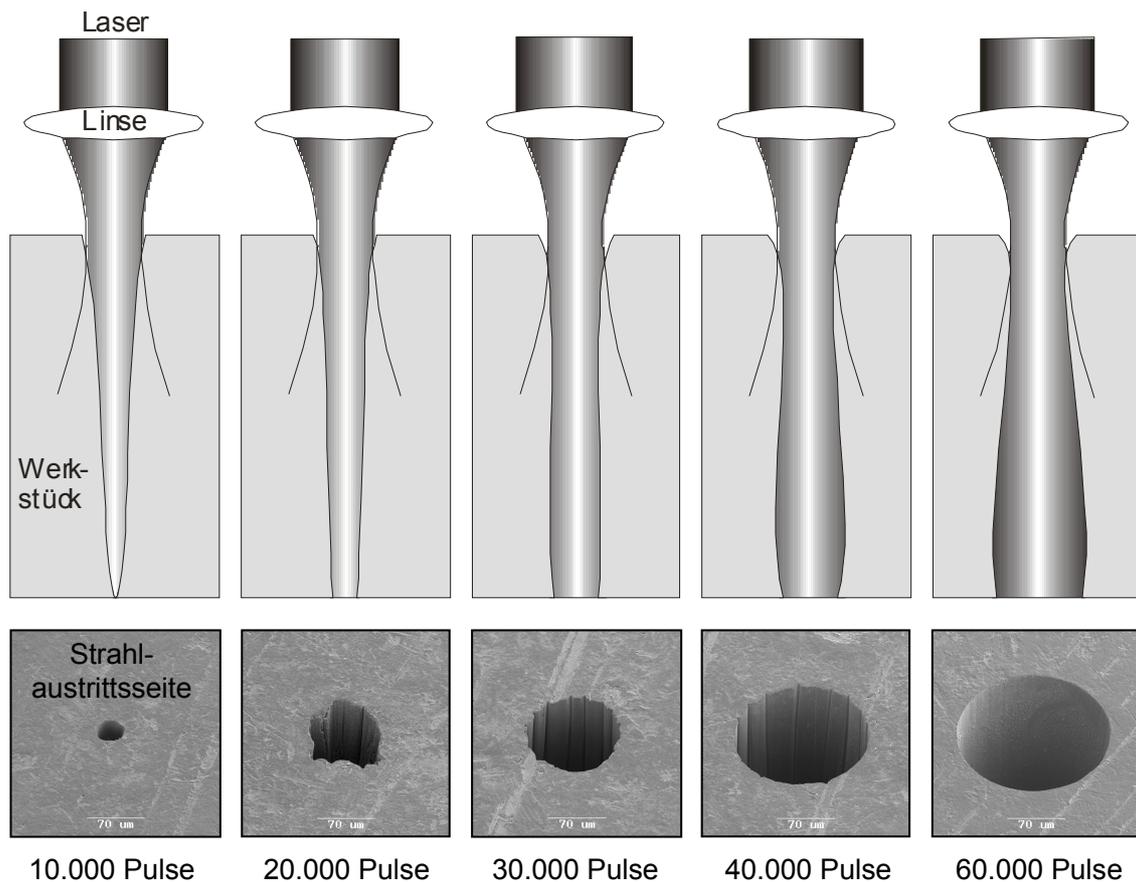


Bild 5-18: Bohrfortschritt nach der Vorbohrphase

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass tiefe Bohrungen hoher Präzision nur mit Hilfe hoher Leistungsdichten erzeugt werden können. Die Vorteile der kurzen Wechselwirkungszeiten zeigen sich besonders während der Nachbearbeitungsphase. Nur aufgrund der starken Plasmaentwicklung ist es möglich zylindrische oder divergente Bohrungsprofile bei Bohrungstiefen bis zu 1 mm und darüber hinaus zu erzeugen.

5.2.3 Morphologische Beurteilung der Innenflächen

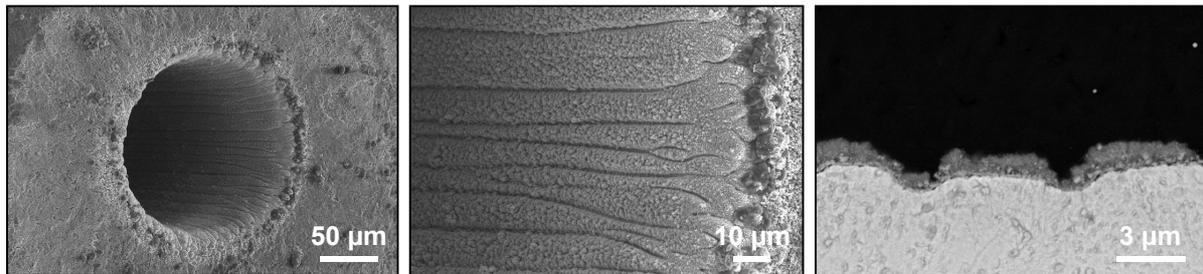
Die Qualität einer Laserbohrung wird nicht nur über die erreichte Bohrungsgeometrie und dessen Reproduzierbarkeit definiert. Mit entscheidend ist auch die Beschaffenheit der beim Abtragen erzeugten Oberflächen. Hierbei sind neben der Oberflächenrauheit auch Veränderungen der äußeren Gefügeschichten von Bedeutung. Häufig werden Strukturen, die durch die Bearbeitung mit Ultrakurzpulslasern erzeugt wurden, als schadungsfrei bezeichnet. Allerdings ist diese Bezeichnung nicht ganz zutreffend. Wie bereits in Kap. 2.3 erläutert wurde,

können je nach Material und Bearbeitungsparametern mit ultrakurzen Laserpulsen sowohl sehr schädigungsarme Strukturen als auch Strukturen mit erheblichen thermischen und mechanischen Schäden erzeugt werden. Tatsächlich gibt es kein Laserverfahren, mit dem ein Festkörpermateriale restlos schädigungsfrei bearbeitet werden kann. Selbst bei sehr vorsichtiger Dosierung der Laserenergie und extrem kurzen Wechselwirkungszeiten bleibt immer ein kleiner Teil der absorbierten Energie im Material zurück, wodurch Veränderungen hervorgerufen werden.

Auch beim Bohren tiefer Kanäle mittels Femtosekundenlaser kann trotz der Nachbearbeitung bei geringer Leistungsdichte (s.o.) eine Schicht veränderten Materials entlang der Bohrungswand festgestellt werden. Gefügeuntersuchungen zeigen, dass jeweils von innen nach außen eine redeponierte Anlagerungsschicht (Oxidschicht) sowie eine daran angrenzende, strukturell veränderte Schicht erkennbar ist. Je nach Laserparameter und Bohrungsgeometrie liegen die Schichtdicken allerdings nur im Bereich von bis zu 2 μm (siehe Bild 5-19, oben rechts).

Bei den Gefügeänderungen handelt es sich hauptsächlich um mechanische Schädigungen, die infolge des laserinduzierten Ablationsdrucks entstehen. Bei hohen Leistungsdichten nimmt dieser Druck Werte in der Größenordnung von $p \approx 10^6$ bar an [NOLT99d]. Direkte thermische Einflüsse durch das heiße Plasma sind beim Abtragen im Leistungsdichtebereich nahe der Ablationsschwelle nicht messbar. Die Anlagerungsschicht entsteht, wenn sich das ablatierte Material nach dem Ablösen unter sehr hohem Druck und bei sehr hoher Anfangsgeschwindigkeit seinen Weg in Richtung Bohrungsöffnung sucht. Dabei ergeben sich Wechselwirkungen mit der kalten Bohrungswand wodurch die Partikel anhaften. Dicke und Morphologie der Schicht hängen von der Bohrungsgeometrie, der Tiefe im Bohrkanal und von den Bearbeitungsparametern ab. Solange der Bohrprozess in einem Sackloch stattfindet, kann mit steigender Pulszahl, also mit zunehmender Bohrungstiefe, im oberen Bereich des Bohrkanals eine Zunahme der Oxidschicht beobachtet werden, während am Bohrungsgrund keine Ablagerungen erkennbar sind. Nach dem Durchbrechen der Materialunterseite ändern sich die Verhältnisse im Bohrkanal deutlich. Da nun der größte Teil der Laserstrahlung die Bohrung mehr oder weniger ungehindert passieren kann, und nur noch an der Seitenwand abgetragen wird, ist das Ablationplasma entsprechend schwächer. Aufgrund der weniger starken Ablationsplasmen sind auch die Druckwellen und somit die Strömungsgeschwindigkeiten des Materials geringer. Zusätzlich entspannt sich die Situation durch die Tatsache, dass nun das abgelöste Material auch über den Bohrungsaustritt entweichen kann.

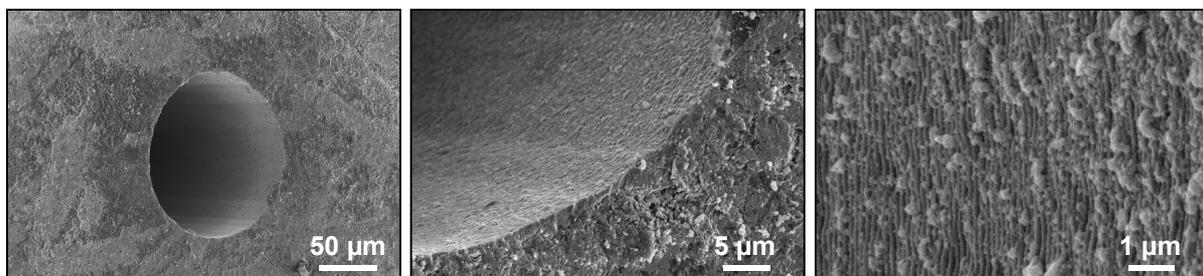
Laser- und Prozessdaten			
Laser	: Ti:Saphir	Pulszahl	: $n = 60.000$
Wellenlänge	: $\lambda = 775 \text{ nm}$	Materialstärke	: $s = 1 \text{ mm (Stahl)}$
Pulsdauer	: $\tau = 150 \text{ fs}$	Energiedichte	: $H = 600 \text{ J/cm}^2$
Pulsfrequenz	: $f_p = 1 \text{ kHz}$	Umgebung	: Luft, 1 bar



Bohrungseintritt

Bohrungskante (Eintritt)

Querschliff bei 50µm Tiefe



Bohrungsausritt

Bohrungskante (Austritt)

Oberfläche der Innenwand

Bild 5-19: Morphologie der Bohrungswand

Insbesondere im oberen Bereich des Bohrungskanals sind häufig feine Riefen erkennbar (Bild 5-19, oben Mitte). Diese sind eine Folge der starken Strahlfilamentierung durch das Ionisationsplasma und können Tiefen bis zu $5 \mu\text{m}$ erreichen. Im unteren Teil des Bohrkanals wirken sich die Filamentierungen kaum noch aus. Hier entstehen typischerweise sehr glatte Oberflächen mit Rauheiten im Bereich der Laserwellenlänge (Bild 5-19, unten rechts). Abgesehen von feinen Riefen und einer sehr dünnen angelagerten Oxidschicht erhalten die Innenflächen der Bohrungen somit eine relativ gute Oberflächengüte. Schmelzanhaftungen können nicht beobachtet werden. Strukturelle Schädigungen der oberflächennahen Bereiche erreichen Tiefen von maximal $1\text{-}2 \mu\text{m}$.

Die im diesem Kapitel ermittelten Ergebnisse der quantitativen Betrachtung des Bohrprozesses und der geometrischen Einflussfaktoren sollen im Folgenden nochmals kurz zusammengefasst werden.

Beim Bohren von tiefen Kanälen kann festgestellt werden, dass sich mit zunehmender Tiefe erhebliche Verluste der Bohreffizienz ergeben. Diese sind in erster Linie durch stetige Reduktion der am Ort der Ablation (am Bohrungsgrund) vorliegenden Energiedichte der Laserstrahlung zurückzuführen. Die Veränderungen der Energiedichte ergeben sich aus der geometrischen Entwicklung des Bohrungsprofils, aus der durch die Fokussierung vorgegebenen Strahlkaustik und den sich daraus ergebenden Reflexionen an der Bohrungswand. Zudem kommen weitere Verluste dadurch zustande, dass der Materialtransport in größerer Tiefe zunimmt, sich Ionisationsplasmen im offenen Kanal bilden und es zu Wechselwirkungen zwischen dem einfallenden Laserpuls und den ablatierten Teilchen kommt.

Eine Erhöhung der Laserpulsenergie führt zwar generell zur Steigerung der Bohrrate, jedoch ergeben sich für hohe Energiedichten auch größere Verlustanteile. Die extreme Plasmaentwicklung bei höheren Energiedichten führt verstärkt zur Aufweitung des Bohrkanals, weniger zur Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit. Die Bohreffizienz lässt sich somit nicht beliebig durch Erhöhen der Laserpulsenergie steigern, vielmehr kann ein spezifischer Maximalwert nicht überschritten werden. Neben der Energiedichte der Laserstrahlung ist die Position des Fokusbereichs relativ zur Werkstückoberfläche (Fokuslage) entscheidend für die Effizienz des Bohrprozesses. Die größten Bohrgeschwindigkeiten können erreicht werden, wenn sich die Fokusposition im mittleren Bereich der Materialstärke befindet.

Auch die Geometrie einer Bohrung wird überwiegend durch die Fokusposition beeinflusst. Durch Variation der Fokuslage, aber auch der Pulsanzahl sowie der Energiedichte kann ein weites Spektrum an Bohrungsprofilen und Bohrungsdurchmessern realisiert werden. Durch die Unterstützung des Ablations- und Ionisationsplasmas im Inneren des Bohrungskanals können sogar divergente Geometrien erzeugt werden. Dieser Vorgang erfordert jedoch eine genügend hohe Pulsfolgefrequenz.

Grundsätzlich kann der Bohrvorgang in zwei Phasen unterteilt werden. In der Vorbohrphase wird mit hoher Energiedichte zunächst eine Durchgangsbohrung erzeugt, die sich eher durch eine geringere Qualität auszeichnet. Daran anschließend findet in der Nachbohrphase die Nachbearbeitung der Kontur statt. Hierbei wird sukzessive eine Glättung der Oberfläche bei geringerer Energiedichte vorgenommen. Durch die Nachbearbeitung werden extrem glatte Oberflächen mit Rauheiten im Bereich der Laserwellenlänge erzeugt. Insgesamt zeichnet sich das Bohrergebnis durch sehr schädigungsarme Materialoberflächen aus, da strukturelle Schädigungen nur in Tiefenbereiche von wenigen Mikrometern beobachtet werden können.

6 Prozessmodell

Die Ergebnisse aus den quantitativen Betrachtungen und den Untersuchungen zur Entwicklung der Bohrungsgeometrie (Kap. 5.1 und Kap. 5.2) sollen im Folgenden zu einem Prozessmodell zusammengefasst werden. Das Modell erläutert den Gesamtprozess anhand der Energiebilanz in räumlicher Auflösung entlang der Bohrtiefe. Da die Berücksichtigung aller variablen Parameter in einem Modell nahezu unmöglich ist, werden alle Laser- und Bearbeitungsparameter als konstant definiert. Es wird der Fall betrachtet, dass die virtuelle Fokusbene unterhalb, jedoch nahe der Materialoberfläche liegt und in der Fokusebene die maximale Energiedichte vorliegt. Die Ausgangsbasis für das Prozessmodell bilden die Untersuchungen zur Bohreffizienz durch die Ermittlung der mittleren Bohrraten a_p gemäß Bild 5-1. Auf dieser Grundlage werden drei unterschiedliche Stadien des Bohrprozesses diskutiert: der Prozessbeginn (Stadium I) sowie die Zustände bei 0,5 mm Bohrtiefe (Stadium II) und bei 1 mm Bohrtiefe (Stadium III). In Bild 6-1 sind die drei beschriebenen Bohrstadien graphisch dargestellt.

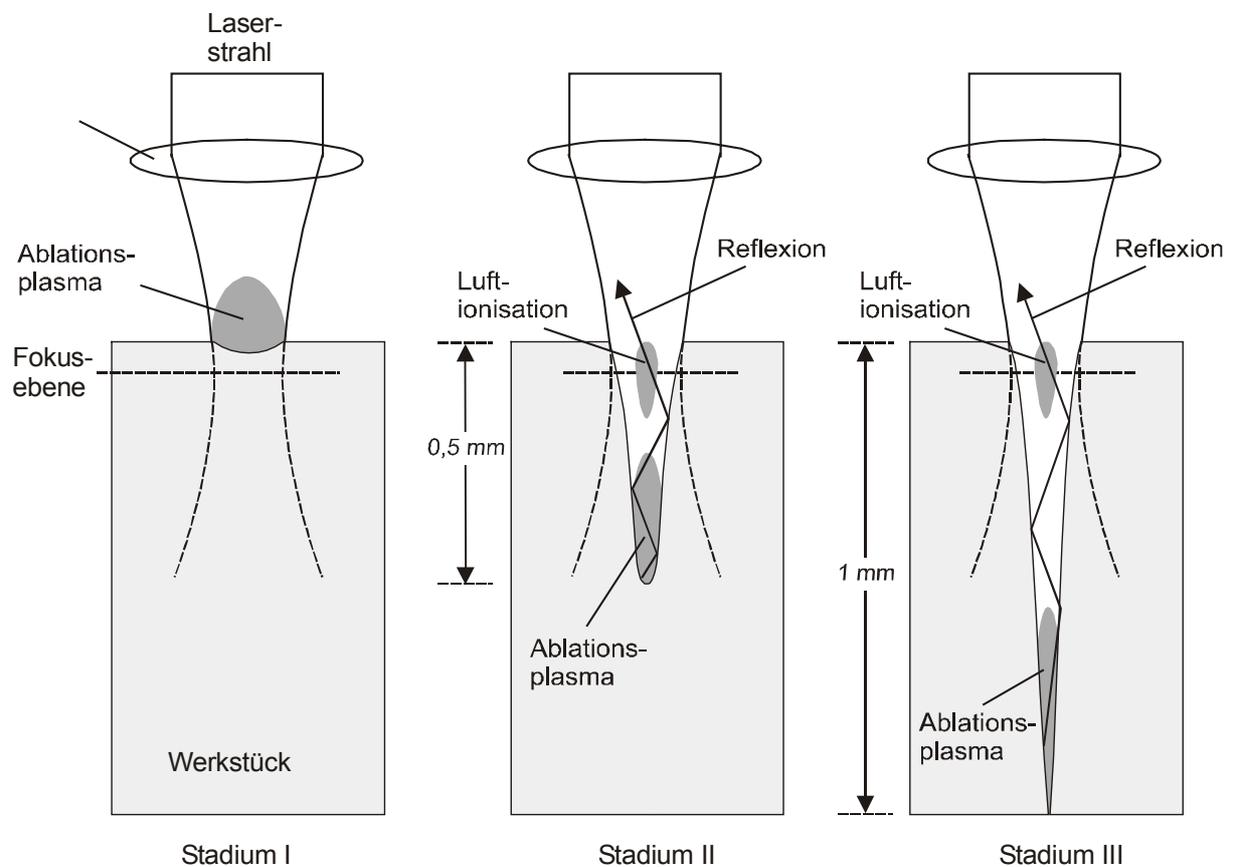


Bild 6-1: Drei Stadien des Bohrprozesses

Aus den grundlegenden Untersuchungen ist bekannt, dass die Energie eines Laserpulses E_{Gesamt} nur zum Teil der Ablation des Materials ($E_{Ablation}$) zur Verfügung steht. Der restliche Teil der Energie verliert sich hauptsächlich durch Reflexion ($E_{Reflexion}$), durch Luftionisationsprozesse ($E_{Ionisation}$) und durch Wechselwirkungen zwischen der Strahlung und dem im Bohrkanal befindlichen Material ($E_{Material}$). Die Anteile von absorbierter Energie und den Energieverlusten verändern sich mit zunehmender Bohrtiefe, wobei die Summe der Anteile aufgrund der Energieerhaltung gleich bleibt. Die Energie eines Laserpulses E_{Gesamt} verteilt sich jeweils nach:

$$E_{Gesamt} = E_{Ablation} + E_{Ionisation} + E_{Reflexion} + E_{Material} . \quad (6.1)$$

Zu Beginn des Bohrprozesses kann das in Kap. 2 beschriebene theoretische Modell zur Ermittlung der Ablationstiefe bei hohen Energiedichten herangezogen werden, wonach die Ablationstiefe durch

$$L \approx l \ln \left(\frac{H_a}{H_{th}} \right) \quad (6.2)$$

berechnet werden kann. Nach [Nolt99a] ergibt sich für metallische Werkstoffe eine Elektronendiffusionslänge $l \approx 100$ nm. Bei einer Energiedichte $H_a = 600$ J/cm² an der Materialoberfläche und einer Schwellenenergiedichte von $H_{th} \approx 0.45$ J/cm² [Nolt99a] erhält man zu Beginn des Bohrprozesses eine theoretische Ablationstiefe von $L \approx 0.72$ µm. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem in Kap. 5.1 ermittelten Wert überein. Die für eine Bohrtiefe von 0,1 mm gemessene mittlere Bohrrate ergab $a_p = 0.78$ µm/Puls. Das theoretische Modell basiert jedoch auf der Annahme, dass sich im bestrahlten Körper eine ebene Welle von einer ebenen Oberfläche ausgehend ausbreitet. Beim Bohrprozess mit einer Vielzahl von Laserpulsen ist diese Situation nur am Anfang der Bohrprozesses gegeben. Wie in Kap. 5.1.1 beschrieben, entwickelt sich mit fortschreitender Bohrtiefe ein spitz zulaufender Kanal mit entsprechend größer werdender Bestrahlungsfläche. Das theoretische Modell nach [Nolt99a] ist daher nur für die ersten Pulse des Bohrprozesses geeignet.

In der Startphase des Bohrprozesses (Stadium I) wird nahezu 100% der Energie für die Ablation umgesetzt. Wenn die Fokusslage nahe unterhalb der Materialoberfläche

liegt, können in dieser ersten Phase Verluste durch Reflexion, Luftionisation oder Wechselwirkungen mit dem ablatierten Material vernachlässigt werden. Der reflektierte Anteil ist aufgrund des senkrechten Strahlungseinfalls und der kleinen Bestrahlungsfläche sehr gering. Zur Luftionisation oberhalb der Materialoberfläche kommt es nicht, da sich die Fokusebene im Material befindet. Auch Wechselwirkungen zwischen Strahlung und abgetragenem Material finden kaum statt. Durch den hohen Ablationsdruck und dadurch dass noch kein Bohrkanal entstanden ist, werden die ablatierten Teilchen sehr schnell in alle Richtungen beschleunigt, bevor ein nachfolgender Puls die Materialoberfläche erreicht. In der Startphase gilt demnach: $E_{Gesamt} \approx E_{Ablation}$.

Ist eine Bohrtiefe von 0,5 mm erreicht (Stadium II), so verringert sich die mittlere Bohrrate auf $a_p = 0.21 \mu\text{m}/\text{Puls}$ (vgl. Bild 5-1). Die Ablationseffizienz ist somit gegenüber der Startphase auf 27 % gesunken. Die Untersuchungen des Energieverlustes durch Luftionisation in normaler Atmosphäre (Kap. 5.1.2) zeigen, dass sich in dieser Phase das Ionisationsplasma innerhalb des Bohrkanals voll ausbildet und ein konstanter Energieverlust von 8 % entsteht (vgl. Bild 5-7). Nach der Energieerhaltung gemäß Gleichung (6.1) geht in dieser Bohrphase bereits 65 % der Gesamtenergie durch Reflexion und Wechselwirkungseffekte verloren. Hauptsächlich verantwortlich für die enormen Reflexionsverluste gegenüber der Startphase sind die geometrische Entwicklung des Bohrkanals sowie die Einflüsse der Strahlkaustik. In Kap. 5.1.1 wurde diskutiert, dass sich im stark konischen Bohrkanal im Vergleich zum Prozessbeginn die Energie auf eine vielfach größere Oberfläche verteilt. Dadurch sinkt die Energiedichte in vielen Bereichen auf Werte unterhalb der Ablationsschwelle, insbesondere an der Bohrungswand. Gleichzeitig steigt der reflektierte Anteil erheblich an.

Zum Ende des Bohrprozesses, bei einer Bohrtiefe von 1 mm (Stadium III), sinkt die Ablationseffizienz auf etwa 10% ab (vgl. Bild 5-1). Die Energieverluste durch die Luftionisation bleiben ab einer Bohrtiefe von etwa 0,4 mm konstant bei 8 % der Gesamtenergie. Aus der Differenz der Gesamtenergie und den experimentell ermittelten Energieanteilen $E_{Ablation}$ und $E_{Ionisation}$ lassen sich die Verluste durch Reflexion und Wechselwirkungen zwischen Strahlung und frei schwebenden Teilchen ermitteln. Zum Ende des Bohrprozesses steigen diese Verlustanteile auf ca. 82 % an.

In Bild 6-2 ist die Energiebilanz des Bohrprozesses entlang der Bohrtiefe im Überblick dargestellt. Die Werte für die Energieanteile der Ablation ($E_{Ablation}$) sowie der Luftionisation ($E_{Ionisation}$) ergeben sich aufgrund der experimentellen Ergebnisse aus Kap. 5.1.1 und Kap. 5.1.2. $E_{Reflexion}$ und $E_{Material}$ sind in einer Kurve zusammengefasst und bilden die Differenz zur Gesamtenergie.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Energieanteile wird deutlich, dass nur im oberen Drittel der Bohrung der überwiegende Teil der Laserpulsenergie für den Materialabtrag zur Verfügung steht. Im unteren Teil der Bohrung wird der Bohrprozess sehr stark durch die Verluste durch Reflexion und Strahl-Materie-Wechselwirkungen dominiert.

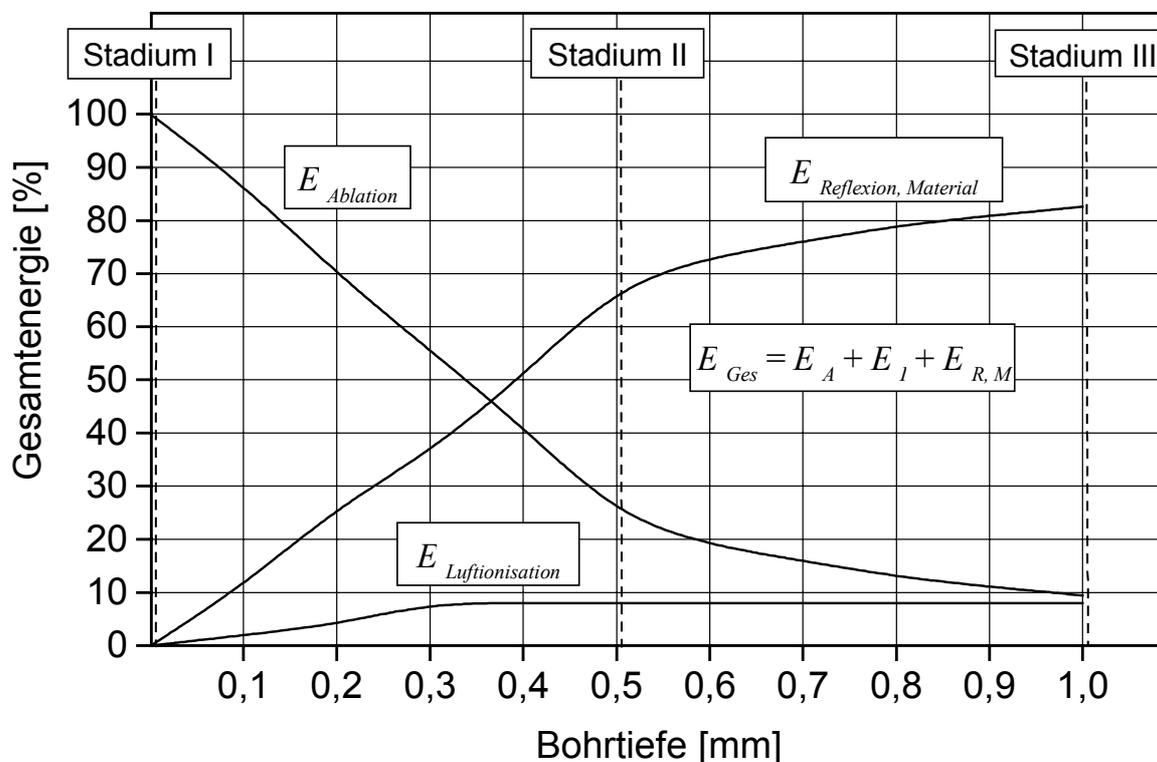


Bild 6-2: Prozessmodell: Energiebilanz in räumlicher Auflösung entlang der Bohrtiefe

Aus dem Prozessmodell wird ersichtlich, dass das Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen nur für begrenzte Materialstärken einsetzbar ist. Präzise Bohrungen in Materialstärken größer als 1 mm sind mit den heute verfügbaren Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen aus technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht realisierbar.

7 Experimentelle Untersuchungen zum Strahlrotationsbohren

Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen ist es, das entwickelte Laserbohrverfahren hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit im Vergleich zum konventionellen Perkussionsbohren darzustellen. Im Wesentlichen stehen hier die erreichbare Prozesseffizienz und die Qualität im Vordergrund. In dem Begriff „Qualität“ vereinen sich vier verschiedene Beurteilungskriterien: die Rundheit der Bohrung, ihre Kantenschärfe, die geometrische Reproduzierbarkeit sowie die Morphologie der Innenwand.

7.1 Prozesseffizienz im Vergleich zum konventionellen Perkussionsbohren

Entsprechend der Untersuchungen in Kap. 5 kann die Prozesseffizienz beim Bohren mit dem Strahlrotor anhand der gemittelten Bohrtiefe je Puls, der Bohrrate a_p , quantifiziert werden. Allerdings können bei einem quantitativen Vergleich nicht alle Bohrverfahren direkt miteinander verglichen werden. Das Einzelpulsbohren lässt sich beispielsweise kaum mit dem starren Perkussionsbohren vergleichen, da die beiden Bohrverfahren für sehr unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden. Das Einzelpulsbohren ist im Allgemeinen viel effizienter, da die Bohrung durch einen einzigen sehr intensiven Laserpuls erzeugt wird. Die Qualität der Bohrung ist dabei vergleichsweise gering. Beim Perkussionsbohren ist die Abtragtiefe je Puls typischerweise kleiner, dafür sorgen eine große Anzahl von Pulsen für eine bessere Bohrungsqualität.

Auch ist es schwierig, quantitative Vergleiche zum Trepanieren anzustellen, da dieses Verfahren im Unterschied zu den anderen perkussierenden Verfahren stets größere Bohrungsdurchmesser erzeugt, wodurch entsprechend mehr Material entfernt werden muss und sich somit die Bohrgeschwindigkeit verringert. Gut vergleichen lässt sich jedoch das starre Trepanieren mit dem Strahlrotationsbohren, da hierbei ähnliche Bohrungsdurchmesser erzielt werden.

Beim Bohren von 1 mm dicken Stahl mit dem Strahlrotor ergibt sich der in Bild 7-1 dargestellte Zusammenhang zwischen der Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls v_{RS} und der mittleren Bohrrate a_p . Die Graphik zeigt die Veränderung der Bohrrate im Geschwindigkeitsbereich von $v_{RS} = 0$ bis 1200 /min. Wie der Kurvenverlauf zeigt, gibt es einen deutlichen Abfall der Bohrrate a_p , sobald sich der Rotor zu drehen beginnt. Während beim starren Perkussionsbohren eine Bohrrate $a_p \approx 0.075 \mu\text{m}/\text{Puls}$ erreicht wird, sinkt diese bereits bei sehr langsamer Drehgeschwindigkeit von $v_{RS} = 10$ /min auf $a_p \approx 0.055 \mu\text{m}/\text{Puls}$ ab. Im Geschwindigkeitsbereich von etwa 10 bis 500 /min bleibt die Bohrrate annähernd

konstant. Bei noch höheren Drehgeschwindigkeiten ist erneut ein Abfall der Bohrrate zu erkennen. Für diesen dreistufigen Verlauf gibt es folgende Erklärung: Die Abnahme der Bohrrate mit einsetzender Drehbewegung ist dadurch begründet, dass durch die Rotation ein im Vergleich zum starren Perkussionsbohren kreisförmiger und somit größerer Bohrungsquerschnitt entsteht (siehe Kap. 7.2). Dies bedeutet, dass insgesamt ein größeres Volumen entfernt wird und dafür mehr Laserpulse benötigt werden. Die mittlere Abtragtiefe je Puls ist somit kleiner. Sobald der Laserstrahl mit moderater Geschwindigkeit rotiert, entsteht immer eine runde Kontur, wobei die Drehgeschwindigkeit über einen weiten Bereich keinen nennenswerten Einfluss auf die mittlere Bohrrate hat. Die in der Graphik zu erkennende Abnahme der Bohrrate bei sehr hohen Drehgeschwindigkeiten ($v_{RS} > 500$ /min) ist durch das Verbiegen der Rotorwelle infolge von Fliehkräften zu erklären.

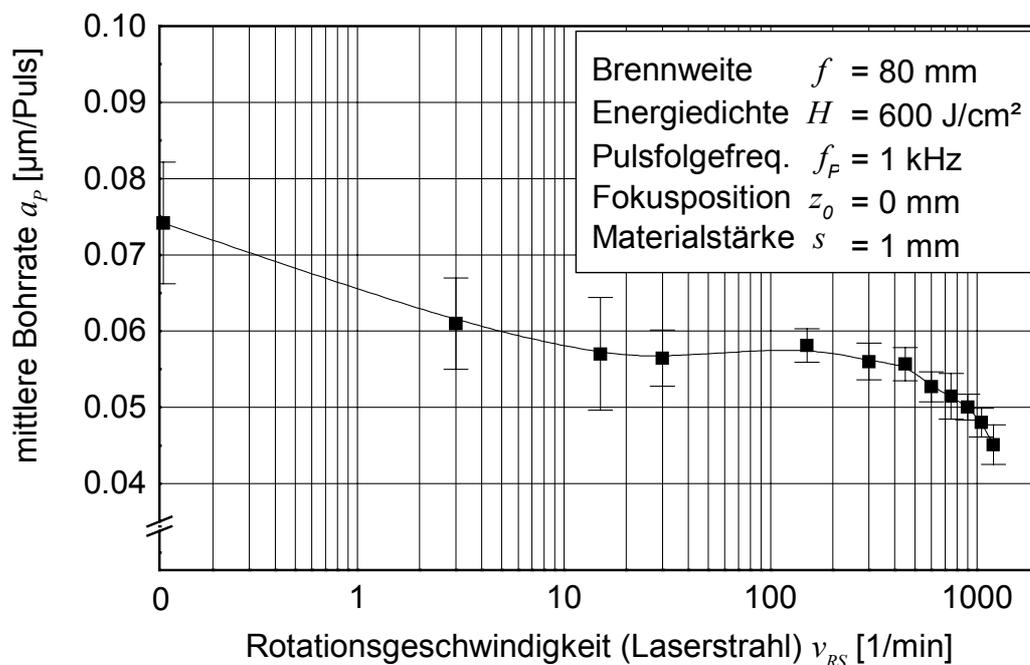


Bild 7-1: Mittlere Bohrrate a_p in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls v_{RS}

Aufgrund der Fliehkräfte erfährt das Spiegelsystem eine kleine Auslenkung, wodurch der fokussierte Laserstrahl auf eine koaxiale Bahn gelenkt wird. Eine genaue Betrachtung der entstehenden Bohrungsdurchmesser bestätigen diesen Effekt. Es kann festgestellt werden, dass die Bohrungen, die im höheren Geschwindigkeitsbereich gebohrt werden, jeweils größere Durchmesser haben (siehe Bild 7-2). Teilweise können bei hohen Drehzahlen auch Taumelbewegungen

des rotierenden Strahls beobachtet werden, die dann zu unrunder Bohrungsquerschnitten führen. Daher ist der höhere Drehzahlbereich zum Herstellen von möglichst kleinen und runden Bohrungen nicht geeignet. Eine zu geringe Drehgeschwindigkeit ist für die Bohrungsqualität ebenfalls ungünstig, da es bei sehr langsamen Drehgeschwindigkeiten zu starken Streuungen der Bohrrate kommt. Dies wird durch die in der Kurve eingetragenen Fehlerbalken verdeutlicht. Die Fehlerbalken bezeichnen die Standardabweichung der Bohrrate bei jeweils 10 Bohrungen pro Rotationsgeschwindigkeit. Der Prozess verläuft gleichmäßiger und dadurch reproduzierbarer, wenn der Laserstrahl mit einer Rotationsgeschwindigkeit $v_{RS} > 30$ /min rotiert. Die Mittelung der Intensität durch die Drehbewegung hat einen homogenisierenden Effekt auf den gesamten Bohrprozess. Somit kann der Geschwindigkeitsbereich von etwa $v_{RS} = 30 - 300$ /min als günstiger Bereich eingestuft werden. Die Bohreffizienz ist in diesem Drehzahlbereich zwar deutlich geringer als beim starren Bohren, für die Reproduzierbarkeit der Bohrergebnisse ergeben sich jedoch deutliche Vorteile.

7.2 Qualitative Bewertung der Bohrergebnisse

Der entscheidende Vorteil des Rotationsbohrens gegenüber anderen Bohrverfahren liegt in der erreichbaren Bohrungsqualität. In Bild 7-2 sind REM-Aufnahmen von vier Bohrungen dargestellt, die mit unterschiedlicher Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls gebohrt wurden. Von links nach rechts steigt die Rotationsgeschwindigkeit von $v_{RS} = 0$ /min bis $v_{RS} = 1000$ /min. Die obere und die untere Bildreihe zeigen jeweils dieselben Bohrungen unter verschiedenem Betrachtungswinkel. Wenn der Strahl sich nicht bewegt, die Rotationsgeschwindigkeit also $v_{RS} = 0$ /min ist, liegt ein starres Perkussionsbohren vor. In diesem Fall ist am Bohrungseintritt klar zu erkennen, wie sich die inhomogene, räumliche Energieverteilung des Laserstrahls in der Bohrungskontur abbildet. Sobald sich der Laserstrahl beim Bohren um die Strahlachse dreht, entstehen deutlich rundere Bohrungskonturen. Bereits bei Rotationsgeschwindigkeiten von $v_{RS} = 15$ /min werden Bohrungen mit guter Rundheit erreicht. Die Qualität der Laserbohrungen wird also allein durch die Rotationsbewegung erheblich verbessert. Der Vergleich der Bohrungsdurchmesser mit $v_{RS} = 15$ /min und $v_{RS} = 1000$ /min verdeutlicht die Auslenkung des Laserstrahls durch die am Rotor wirkenden Fliehkräfte bei sehr hohen Drehzahlen. Durch die Verkipfung der Rotorwelle wird in diesem Fall eine Vergrößerung des Durchmessers um ca. 20 μm bewirkt. Zudem führt der Strahl durch die kreisförmige Bewegung auf der Fokussieroptik im Bereich des Fokus eine Taumelbewegung aus, die zu einer stärkeren Kantenverrundung am Bohrungseintritt führt. Weiterhin ist eine größere

Riefenbildung an den Innenwänden des Bohrungskanals bei höheren Drehzahlen sichtbar.

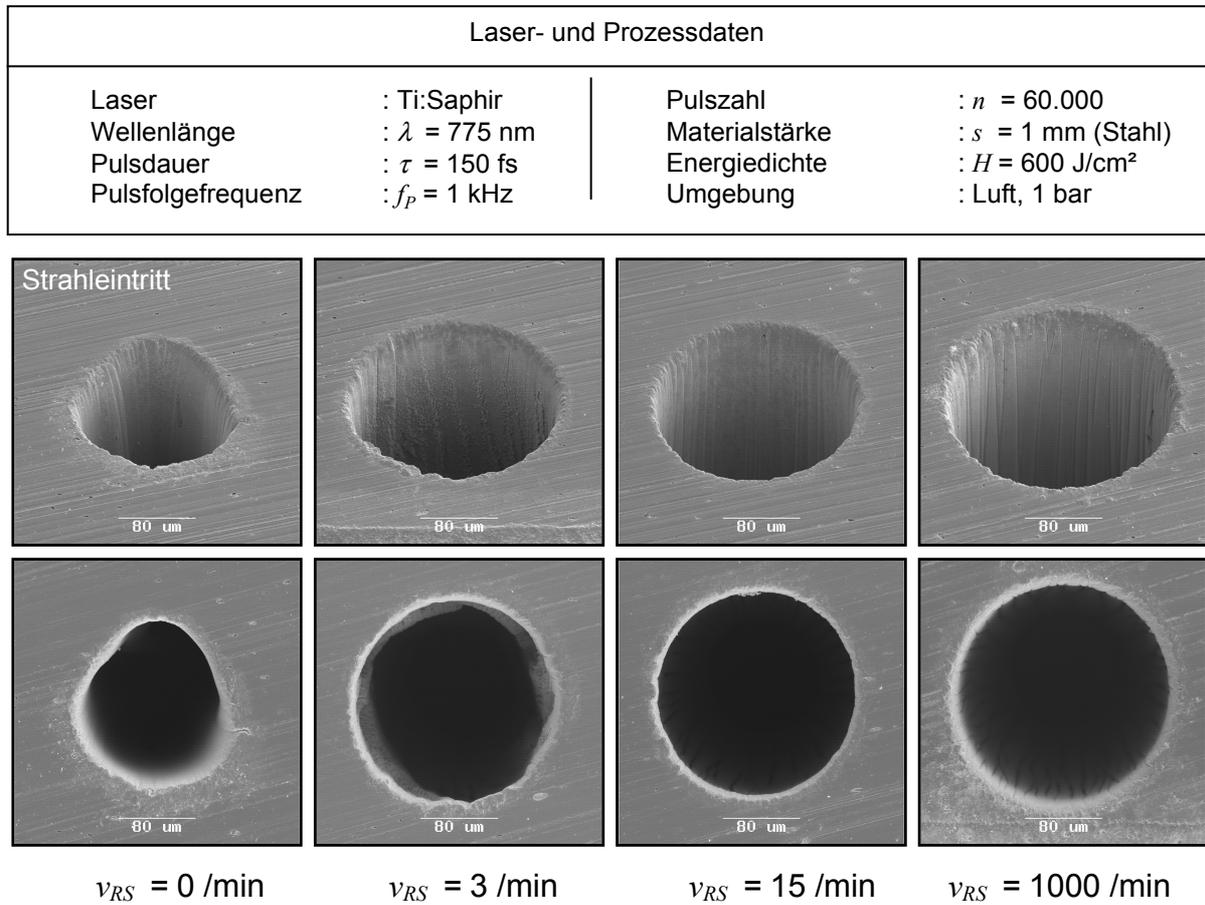


Bild 7-2 Bohren mit dem Strahlrotor bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten, obere Reihe: Blickrichtung 45° , untere Reihe: Blickrichtung 0°

Gemäß internationaler Normen können zur Beurteilung der Rundheit von Bohrungen Referenzkreise für das gemessene Profil ermittelt werden [DIN ISO 4291, DIN ISO 6318, VDI/VDE 2631]. Die Rundheitsabweichung ergibt sich dann als Differenz zwischen dem größten und kleinsten Radius der Referenzkreise, r_{\max} und r_{\min} , der sog. kleinsten Ringzone (Minimum Zone Circles, Bild 7-3). Beim Rotationsbohren mit ultrakurzen Laserpulsen werden im Durchmesserbereich von $d = 100$ bis $200 \mu\text{m}$ bei Rotationsgeschwindigkeiten $v_{RS} > 30 \text{ /min}$ Rundheitsabweichungen von $\Delta Z_z = \pm 3 \mu\text{m}$ erreicht. Damit ist dieses Bohrverfahren etwa um den Faktor 3 bis 5 genauer als alle anderen bisher bekannten Laserverfahren, die im Bereich des Metallbohrens eingesetzt werden [ALVE94, NN00].

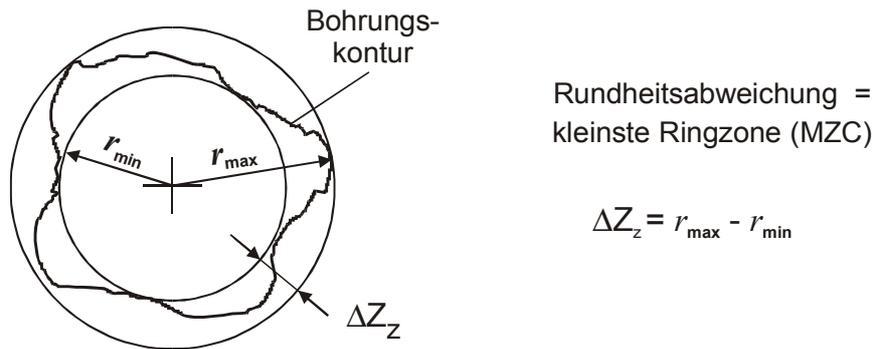
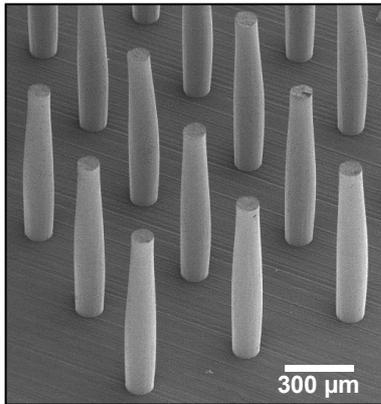


Bild 7-3 Rundheitsabweichung bei Bohrungen nach DIN ISO 4291

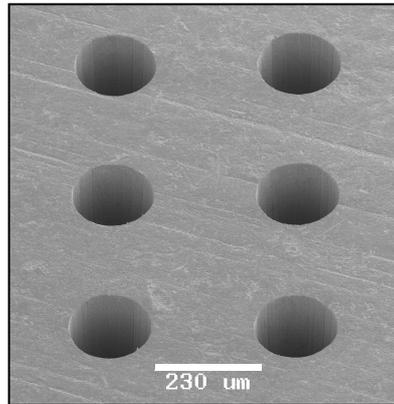
Das Strahlrotationsbohren begünstigt ebenfalls eine gute geometrische Reproduzierbarkeit der Bohrungen. Bei der Herstellung von Mikrobohrungen mit einer Tiefe von 1 mm und Durchmessern im Bereich von $d = 100$ bis $200 \mu\text{m}$ wurden Abweichungen der Durchmesser von $\Delta d = \pm 2\%$ ermittelt (mittlere Abweichung bei 49 Bohrungen). Demnach variieren die absoluten Durchmesser von Bohrung zu Bohrung wiederum jeweils nur um wenige Mikrometer. Mit konventionellen Laserbohrtechniken ist eine derart gute Reproduzierbarkeit beim Bohren von metallischen Werkstoffen nicht erreichbar, zumindest nicht bei Mikrobohrungen mit hohen Aspektverhältnissen. Die in Bild 7-4 abgebildeten elektronenmikroskopischen Aufnahmen demonstrieren die hohe Reproduzierbarkeit der Bohrprozesse. Im Bild links sind einige Abformungen (Replikas) von Laserbohrungen dargestellt, die bei gleichen Laser- und Prozessbedingungen hergestellt wurden. Die Bohrtiefe beträgt jeweils 1 mm, die Laserstrahlrichtung im linken Bild ist von oben nach unten. Anhand der Austrittsöffnungen im mittleren Bild wird deutlich, dass die Bohrungen auch an der Austrittsöffnung eine sehr gute Rundheit zeigen und die Durchmesser annähernd gleich sind. Zudem vermitteln die Bilder einen Eindruck von der Scharfkantigkeit sowie der Oberflächenqualität im Inneren der Bohrungen.

Durch das Bohren mit dem Strahlrotationssystem ergeben sich im Vergleich zum herkömmlichen Perkussionsbohren deutliche Einbußen der Bohrgeschwindigkeit, je nach Geometrie und Bohrtiefe bis zu 25%. Allerdings kann mit diesem Verfahren eine erhebliche Qualitätssteigerung erzielt werden. Im Hinblick auf die mikrometeregenaue Bearbeitung von metallischen Werkstoffen eröffnen sich dadurch Anwendungsfelder, die bisher der Laserbearbeitung nicht zugänglich waren.

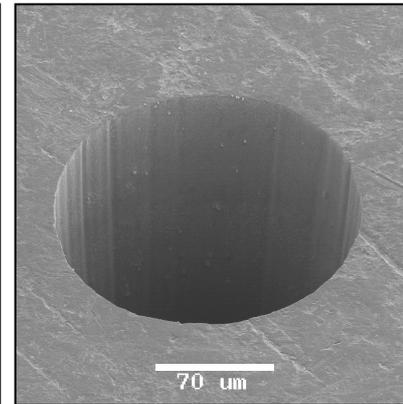
Laser- und Prozessdaten			
Laser	: Ti:Saphir	Pulszahl	: $n = 60.000$
Wellenlänge	: $\lambda = 775 \text{ nm}$	Materialstärke	: $s = 1 \text{ mm (Stahl)}$
Pulsdauer	: $\tau = 150 \text{ fs}$	Energiedichte	: $H = 600 \text{ J/cm}^2$
Pulsfolgefrequenz	: $f_p = 1 \text{ kHz}$	Umgebung	: Luft, 1 bar



Replikas



Austrittsöffnungen



Austrittsöffnung, Detail

Bild 7-4 Reproduzierbarkeit des Mikrobohrprozesses; Bild links: Replikas, Strahleintritt oben; Bild Mitte: Austrittsöffnungen; Bild rechts: Detail von Bild Mitte

8 Entwicklung neuer Bohrstrategien

Die Grundlagenuntersuchungen aus Kap. 5 sowie die experimentellen Untersuchungen zum Bohren mit dem neu entwickelten Bohrverfahren in Kap. 7 haben gezeigt, dass mit diesem Verfahren qualitativ hochwertige Mikrobohrungen mit unterschiedlichen Bohrungsprofilen hergestellt werden können. Die Form des Bohrungskanals kann dabei über die verschiedenen Laser- und Prozessparameter beeinflusst werden. Das Erreichen einer bestimmten Bohrungsgeometrie ist jedoch schwierig, da die eingreifenden Parameter in komplexer Wechselwirkung stehen. In diesem Kapitel sollen daher die für die geometrische Form einer Bohrung dominierenden Faktoren quantitativ betrachtet werden. Durch gezielte Anpassung der entscheidenden Laser- und Bearbeitungsparameter lassen sich Bearbeitungsstrategien entwickeln, mit deren Hilfe variable Bohrungsgeometrien über einen weiten Bereich gezielt und reproduzierbar hergestellt werden können.

In Kap. 5.2 wurde demonstriert, dass das geometrische Profil einer Bohrung in erster Linie durch die Fokussierung, also durch die Strahlkaustik und deren Position (z_F) relativ zur Materialoberfläche bestimmt wird. Zusätzlich kann die Geometrie durch die Energiedichte H , durch die Anzahl der Pulse n sowie durch die Pulsfolgefrequenz f_P und die Umgebungsbedingungen beeinflusst werden.

Um die Anzahl der Variablen bei der Formgestaltung zu reduzieren, werden bei den hier beschriebenen Versuchsreihen die Brennweite f der Fokussieroptik, die Pulsfolgefrequenz f_P , sowie die Umgebungsbedingung konstant gehalten.

Beim Bohren in 1 mm dicken Stahlwerkstoffen mit Ultrakurzpulslasern kann grundsätzlich das zu erreichende Bohrungsprofilspektrum von konvergenten, zylindrischen und divergenten Bohrungsprofilen im Durchmesserbereich von $d = 100$ bis $200 \mu\text{m}$ durch Fokussierung mittels Sammellinse mit einer Brennweite von $f = 80 \text{ mm}$ abgedeckt werden. Die Plasmabildung lässt sich, insbesondere in tieferen Bereichen der Laserbohrung, vorteilhaft nutzen, wenn der Bohrprozess in normaler Atmosphäre ($p \approx 1 \text{ bar}$) durchgeführt wird. Dadurch ergibt sich, im Vergleich zu Prozessen im Vakuum oder in anderen Gasatmosphären, ein relativ einfacher Versuchsaufbau. Eine ausreichend hohe Pulsfolgefrequenz ist ebenfalls notwendig für die Formgebung. Daher wird die Pulsfolgefrequenz für alle Bohrversuche auf dem maximalen Wert von $f_P = 1 \text{ kHz}$ konstant gehalten. Die Zahl der Variablen reduziert sich dadurch auf drei: die Fokusposition z_F , die Pulsanzahl n sowie die Energiedichte H .

Die Auswirkungen der drei Laser- bzw. Prozessparameter sollen in diesem Abschnitt quantitativ untersucht werden, wobei nicht nur die Bohrungsdurchmesser, sondern das gesamte Bohrungsprofil betrachtet werden sollen. Zur Beurteilung der

Bohrungsgeometrien sind jeweils Abformungen nach der Replika-Technik erforderlich. Diese können mit einem Lichtmikroskop mikrometergenau vermessen werden.

In Bild 8-1 und Bild 8-2 sind die Bohrungsradien r entlang des Bohrkanals (Bohrtiefe a_z) für je vier Bohrungsprofile, die bei unterschiedlicher Fokusposition z_F erzeugt wurden, dargestellt. Bei allen Bohrungen wurde die gleiche Anzahl von Laserpulsen eingesetzt ($n = 60.000$) sowie die gleiche Energiedichte ($H = 600 \text{ J/cm}^2$). Die Messung der Bohrungsprofile erfolgte anhand der Abformungen, die jeweils in sechs Ebenen vermessen wurden. Die Bohrungstiefe $a_z = 0 \text{ mm}$ bezeichnet die Bohrungseintrittsöffnung. Entsprechend befindet sich bei $a_z = 1,0 \text{ mm}$ der Bohrungsaustritt.

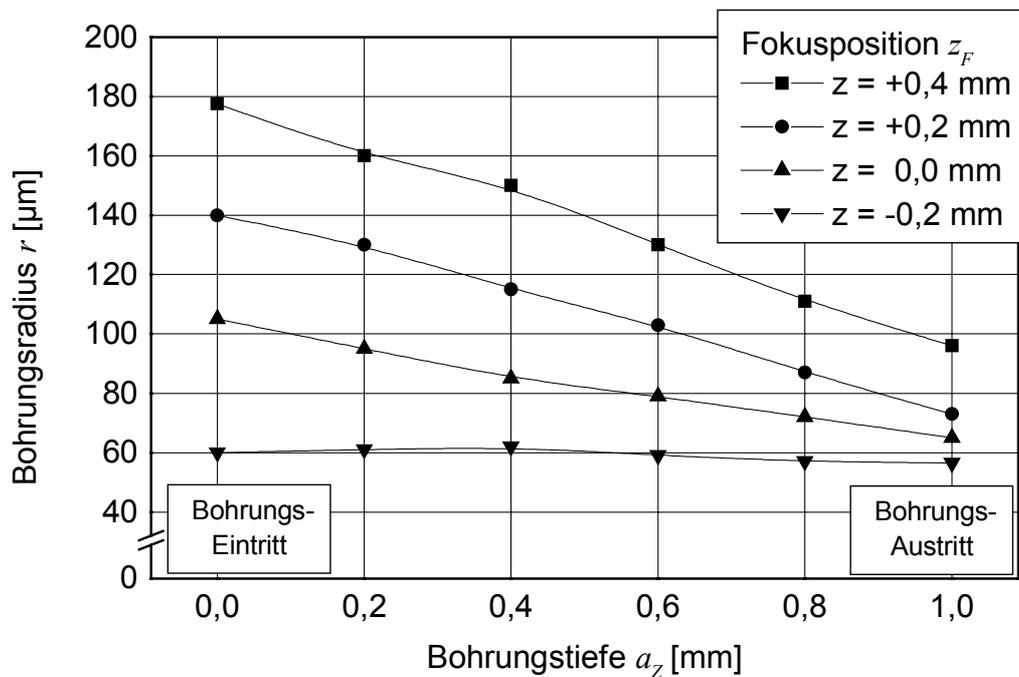


Bild 8-1: Profil der Laserbohrungen bei verschiedenen Fokuspositionen z_F , Materialstärke $s = 1 \text{ mm}$

Anhand der dargestellten Bohrungsprofile in Bild 8-1 zeigt sich, dass sich im Bereich von $z_F = 0$ bis $+0,4 \text{ mm}$, wenn die Fokusposition also oberhalb bzw. auf der Materialoberfläche liegt, konvergent-konische Bohrungen mit relativ geradlinigem Konturverlauf erzeugen lassen. Bei $z_F = -0,2 \text{ mm}$ verläuft das Bohrungsprofil nahezu zylindrisch, es gibt in diesem Fall nur leichte Änderungen des Bohrungsradius entlang des Bohrkanals.

Tiefer liegende Fokuspositionen (s. Bild 8-2) ergeben dagegen kurvige Profile, wobei sich die schmalste Stelle der Kontur (der minimale Bohrungsradius) entsprechend der Fokusposition verlagert. So entsteht beispielsweise bei $z_F = -1,0$ mm eine Bohrungstaille bei einer Bohrungstiefe von $a_Z \approx 0,7$ mm. Die Entstehung dieser Bohrungsprofile sowie der Grund für die Verschiebung der Taille gegenüber der tatsächlichen Fokusebene wurden bereits in Kap. 5.2 ausführlich diskutiert. Die durch die starke Plasmabildung erzeugte virtuelle Fokusebene ist gegenüber der realen Fokusebene um ca. 0,3 mm verlagert (s. Bild 5-14).

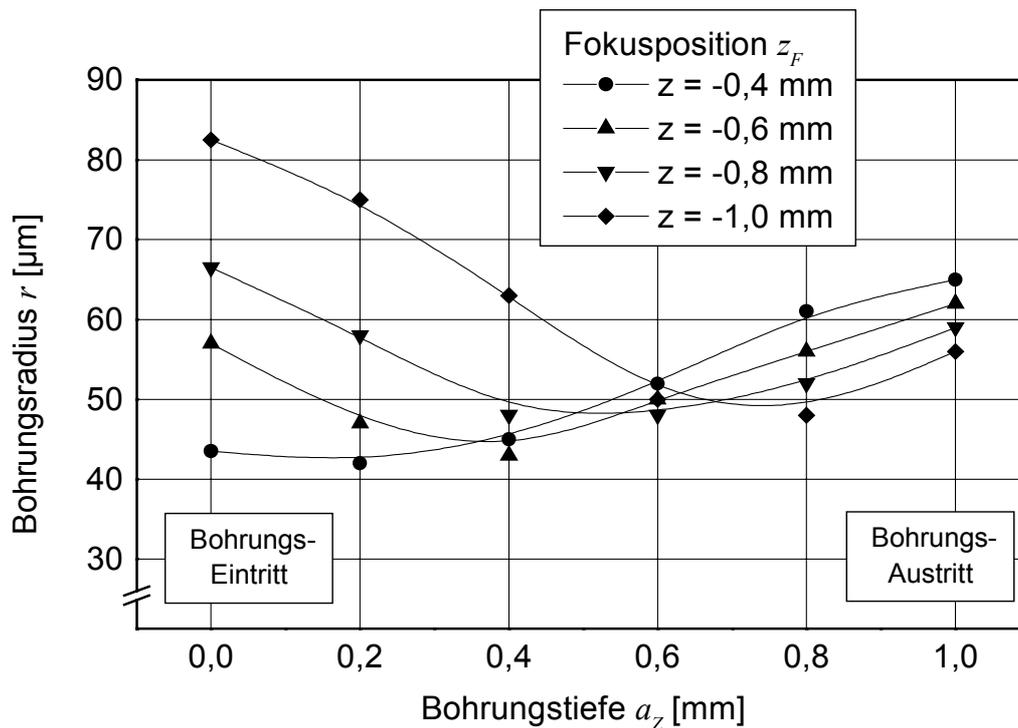


Bild 8-2: Profil der Laserbohrungen bei verschiedenen Fokuspositionen z_F , Materialstärke $s = 1$ mm

Da für die meisten Anwendungen von Mikrobohrungen geradlinig verlaufende Bohrkanäle gefordert sind, besteht die Aufgabe darin, durch geeignete Kombinationen der Parameter Fokusposition, Pulszahl und Energiedichte die gewünschten Bohrungsgeometrien zu erreichen. Divergente ($d_{\text{Eintritt}} < d_{\text{Austritt}}$) und zylindrische ($d_{\text{Eintritt}} = d_{\text{Austritt}}$) Bohrungsformen sind nur schwierig herzustellen. Konvergente Bohrkanäle können vergleichsweise einfach erzeugt werden.

Im Verlauf der experimentellen Untersuchungen zur Erzeugung der verschiedenen Bohrungsgeometrien hat sich gezeigt, dass das genannte Geometriespektrum durch eine zweistufige Bohrstrategie abgedeckt werden kann. Diese Strategie beruht

darauf, dass je Bohrung an zwei unterschiedlichen Fokuspositionen mit geeigneten Pulsanzahlen abgetragen wird. Die Funktionsweise der zweistufigen Bohrstrategie kann folgendermaßen erläutert werden: Bei konstanter Pulsleistung wird der Durchmesser der Eintrittsöffnung im Wesentlichen durch die Fokusposition der ersten Bohrstufe festgelegt. In dieser Stufe des Bohrprozesses sorgt eine genügend große Zahl von Laserpulsen zunächst für das Durchbohren des Materials (Vorbohren). Bei tiefer liegender Fokusposition kann anschließend die Bohrung im unteren Teil nachbearbeitet werden, so dass sich dort beispielsweise größere Bohrungsdurchmesser ergeben als im oberen Teil. Mit dem zweistufigen Bohrverfahren können geradlinige Bohrungsprofile, insbesondere bei zylindrischen und divergenten Formen, einfacher hergestellt werden, während die konvergenten Formen in der Regel keiner zweiten Stufe bedürfen, wie in Bild 8-1 zu erkennen ist.

Bild 8-3 verdeutlicht die Funktion der zweiten, tiefer liegenden Fokusposition. In der Graphik sind die Konturen von vier Bohrungen dargestellt, die in einem zweistufigen Verfahren mit gleichen Parametern erzeugt wurden, wobei jedoch die Fokuspositionsänderung zwischen $\Delta z = -0,3$ bis $-0,6$ mm variierte. Man erkennt, dass mit tiefer liegendem Fokus zunehmend ein Aufweiten der Austrittsöffnung bewirkt wird, der Durchmesser der Eintrittsöffnung ändert sich dabei nur wenig.

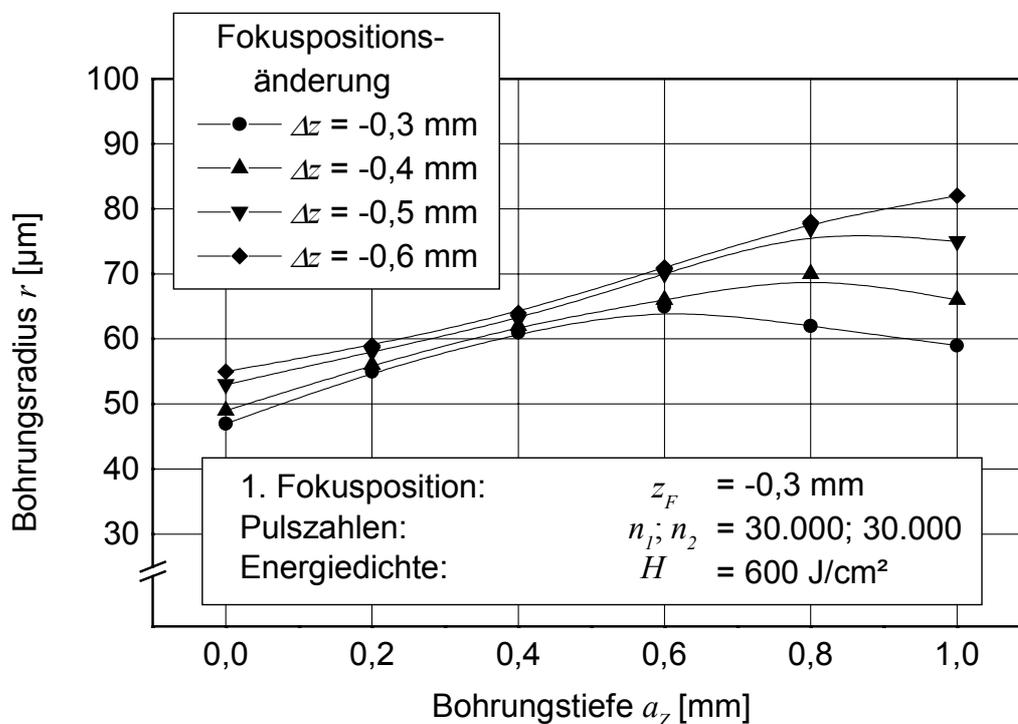


Bild 8-3: Profil der Laserbohrungen bei verschiedenen Fokuspositionsänderungen Δz , Materialstärke $s = 1$ mm

Für die Herstellung von geradlinigen Bohrkanälen in 1 mm dicken Stahlwerkstoffen mit insgesamt guter Bohrungsqualität ist generell eine Gesamtpulszahl von $n \approx 60.000$ Pulsen notwendig. Zylindrische und insbesondere divergente Formen können dabei einfacher durch die Verteilung von 30.000 Pulsen je Bohrstufe erzeugt werden. Weiterhin kann festgestellt werden, dass zum Bohren von stark divergenten Bohrungsprofilen große Fokuspositionsänderungen von $\Delta z = -0,6$ mm erforderlich sind. Durch diese Technik sind Öffnungswinkel der Bohrungen von $\beta = 2^\circ$ und mehr möglich.

Besonders interessant ist die Tatsache, dass beim 2-Stufen-Prozess mit hohen Gesamtpulszahlen und konstanter Fokuspositionsänderung der Durchmesser des Bohrungsaustritts kaum Änderungen erfährt, wenn die erste Fokusposition z_{F1} variiert. In Bild 8-4 sind vier Konturverläufe dargestellt, wobei jeweils in zwei Stufen mit Fokuspositionsänderungen $\Delta z = -0,6$ mm und unterschiedlichen Start-Fokuspositionen z_{F1} gebohrt wurde. Man erkennt, dass sich im betrachteten Fokuspositionsbereich von $z_{F1} = 0$ bis $-0,3$ mm der Bohrungseintrittsradius von 50 μm auf etwa 110 μm vergrößert, während sich der Bohrungsaustrittsradius um nur 10 μm verkleinert.

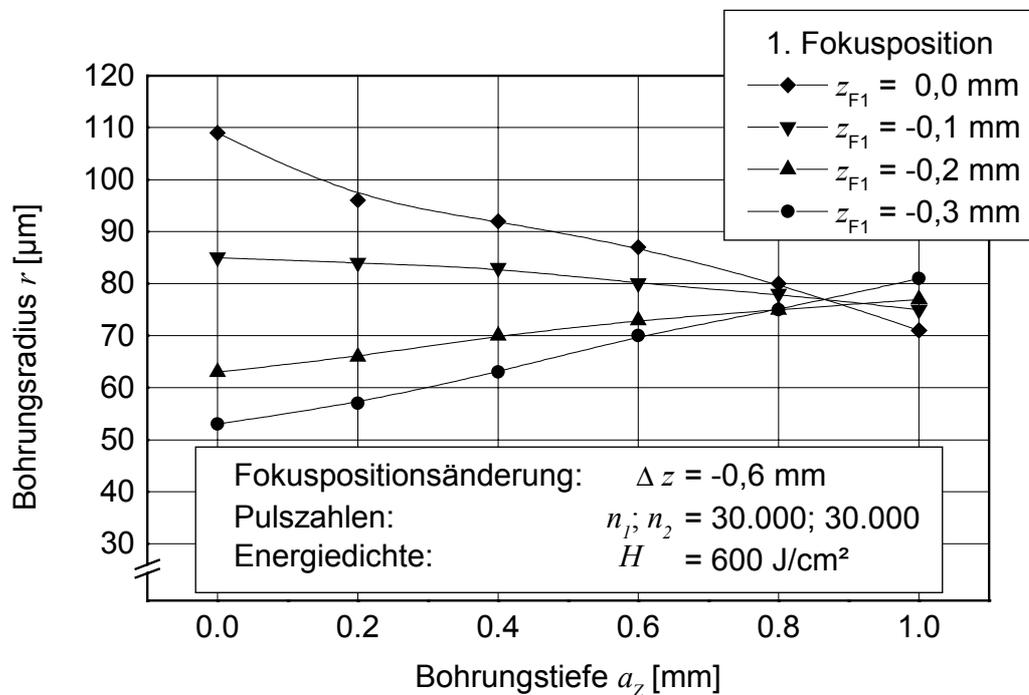


Bild 8-4: Profil der Laserbohrungen bei verschiedenen Start-Fokuspositionen z_{F1} , Materialstärke $s = 1$ mm

Die Fokusposition der ersten Bearbeitungsstufe gibt also im Wesentlichen den Eintrittsdurchmesser vor. Der endgültige Verlauf der Kontur kann im Folgenden durch eine zweite Fokusposition und durch die Pulsanzahlen beeinflusst werden.

Ist das gewünschte Bohrprofil erreicht, so können die Durchmesser über einen bestimmten Bereich durch die Energiedichte variiert werden. Bei Änderung der Energiedichte bleibt die Bohrungsentstehung grundsätzlich erhalten, nur der Durchmesser der Bohrung ändert sich insgesamt.

Bild 8-5 zeigt vier Profile von stark divergenten Bohrungen, die in zwei Stufen mit jeweils einer Start-Fokusposition $z_{F1} = -0,3$ mm und einer Fokuspositionsänderung $\Delta z = -0,6$ mm gebohrt wurden. Die Bohrprozesse unterscheiden sich lediglich durch unterschiedliche Energiedichten H der Laserstrahlung. Der Vergleich der Konturen verdeutlicht, dass der Öffnungswinkel bei Änderung der Energiedichte annähernd gleich bleibt.

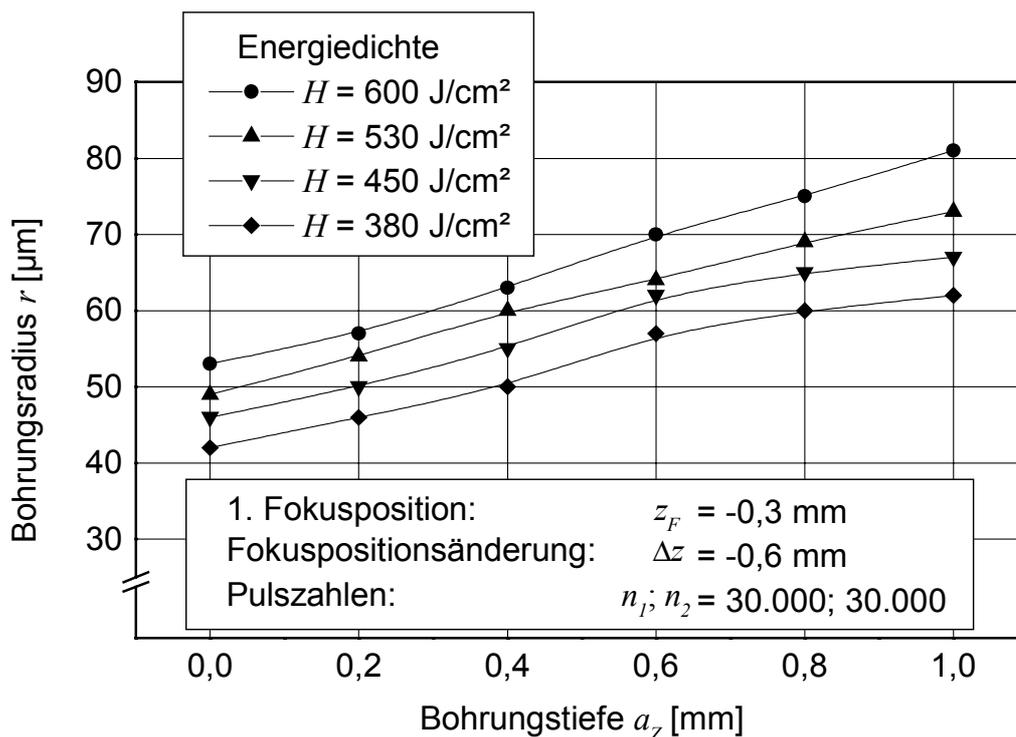


Bild 8-5: Profil der Laserbohrungen bei verschiedenen Energiedichten H , Materialstärke $s = 1$ mm

Durch Anpassen der Energiedichte kann somit der Zieldurchmesser sehr genau eingestellt werden. Die dabei entstehenden Bohrungen zeigen keine qualitativen Unterschiede, wie die elektronenmikroskopischen Aufnahmen in Bild 8-6 beweisen.

Laser- und Prozessdaten			
Laser	: Ti:Saphir	Start-Fokusposition	: $z_{Fl} = -0,3$ mm
Wellenlänge	: $\lambda = 775$ nm	Fokuspos.änderung	: $\Delta z = -0,6$ mm
Pulsdauer	: $\tau = 150$ fs	Pulszahl	: $n_1, n_2 = 30.000, 30.000$
Pulsfrequenz	: $f_p = 1$ kHz	Materialstärke	: $s = 1$ mm (Stahl)

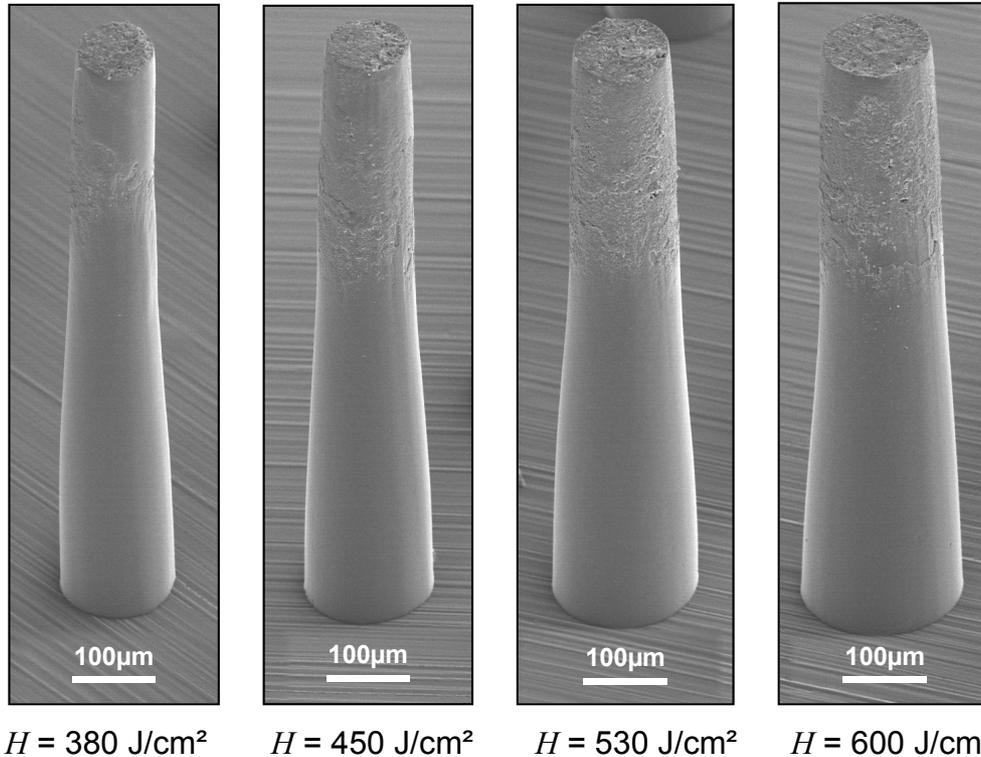


Bild 8-6: Abformungen von divergenten Bohrungen, die bei verschiedenen Energiedichten H durch einen zweistufigen Bohrprozess erzeugt wurden, Materialstärke $s = 1$ mm

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das neu entwickelte Rotations-Bohrverfahren einerseits deutliche Qualitätssteigerungen bezüglich der erreichbaren Rundheit der Bohrungsdurchmesser und der Oberflächengüte im Inneren der Konturen ermöglicht. Andererseits können durch einfache Anpassung der drei Laser- und Prozessparameter Fokusposition, Pulsanzahl und Energiedichte unterschiedliche Bohrungsprofile stufenlos hergestellt werden. Ein zweistufiger Prozess kann dazu dienen, neben konvergent-konischen Bohrungsprofilen, auch zylindrische und insbesondere divergent-konische Profile zu erzeugen. Aufbauend auf dem Verständnis der unterschiedlichen Funktionen der drei variierten Parameter, ist es möglich, bereits durch die Auswertung weniger experimenteller Bohruntersuchungen eine Profil-Matrix zu erstellen, aus der sich, innerhalb bestimmter prozesstechnischer Grenzen, Zielgeometrien direkt oder durch Interpolation der Messwerte ermitteln lassen.

9 Anwendung des Ultrakurzpuls-Laser-Mikrobohrverfahrens in der Praxis

Lasergestützte Mikrobohrprozesse sind seit langem in der industriellen Produktion etabliert. Täglich bohren Laseranlagen Millionen von Bohrungen z.B. in Motor- und Getriebeteile oder massive Bauteile aus hochlegierten Stählen, häufig unter sehr schwierigen Einfallswinkeln. Solche Komponenten werden vielfach in der Automobil-, der Luft- und Raumfahrtindustrie benötigt. In Zukunft können viele der angewandten Bohrverfahren immer dann durch das neue Ultrakurzpuls-Laserbohren ersetzt werden, wenn die bislang erreicht Präzision nicht mehr ausreichend ist.

Eine potentielle industrielle Anwendung für das Mikrobohren mit ultrakurzen Laserpulsen stellt das Bohren von Dieseleinspritzdüsen dar. Da das bei dieser Anwendung bislang eingesetzte Funkenerosionsverfahren nahezu seine Grenzen erreicht hat, werden neue Lösungswege gesucht, um den ständig steigenden geometrischen Anforderungen der einzelnen Einspritzbohrungen gerecht zu werden. Bei der gegenwärtigen Entwicklung der Common-Rail-Systeme (CR) ist eine klare Tendenz zu immer höheren System-Drücken zu verzeichnen. Ziel dabei ist es, die Kraftstoff-Einspritzmengen zu verringern bzw. effizienter zu dosieren. Dadurch können entweder die Emissionen gesenkt, oder die Leistung des Motors gesteigert werden. Durch den enormen Anstieg des System-Drucks der geplanten CR-Systeme (bis zu 1800 bar) verringern sich entsprechend die Durchmesser der Mikrobohrungen bis in den Bereich von 100 μm und darunter.

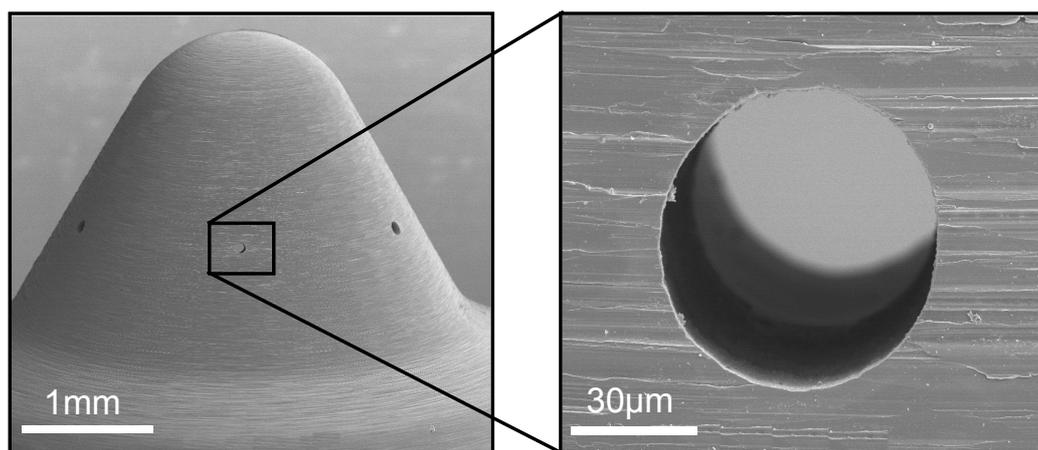


Bild 9-1 Mikrobohrungen in einer Diesel-Einspritzdüse, hergestellt mit einem fs-Ti:Saphir-Laser; Durchmesser der Bohrung: außen 120 μm , innen 140 μm

Zusätzlich gibt es Tendenzen zu leicht divergenten Bohrungsformen. Aufgrund der steigenden Drücke im CR-System sind thermische Belastungen der durch die Bohrungen perforierten und nur 1 mm dicken Düsenkuppe zu vermeiden, da sonst ein Abriss der Kuppe droht. Aus diesen Gründen ist die Verwendung eines UltrakurzpulsLasers beim Bohren der Einspritzdüsen derzeit der hoffnungsvollste Ansatz. Bild 9-1 zeigt eine mit UltrakurzpulsLaser gebohrte Einspritzdüse. Anhand der Rundheit und Scharfkantigkeit der Bohrungskante erkennt man die hohe Qualität der Bohrungen. Das Bohrergebnis bedarf keiner Nachbearbeitung.

Für das Bohren mittels UltrakurzpulsLaser ergeben sich eine Reihe weiterer Anwendungen beispielsweise im Bereich der Drucktechnik, der Telekommunikation oder der Medizin. Dabei eröffnen sich durch das bessere Verständnis des Bohrprozesses und die Weiterentwicklungen der Bohrtechnik nicht nur neue Möglichkeiten bei der Bearbeitung von metallischen Werkstoffen. Überall dort, wo sensible Werkstoffe, wie z.B. organische Stoffe, präzise bearbeitet werden müssen, können die enormen Vorteile des UltrakurzpulsLasers genutzt werden.

Bei der Entwicklung von Kontaktlinsen wird derzeit beispielsweise erprobt, den Tragkomfort durch das Einbringen von feinen Laserbohrungen zu erhöhen (vgl. Bild 9-2). Die Bohrungen ermöglichen den Flüssigkeitsaustausch zwischen der Hornhaut und der Linsenoberfläche. Dadurch wird das Austrocknen der Linsenoberfläche verhindert, das Augenlid kann folglich leichter und somit schmerzfrei über das Auge gleiten. Zudem gelangt durch die Öffnungen Sauerstoff an die Hornhaut. Für diese Anwendung ist der UltrakurzpulsLaser ideal, da die Bohrungen äußerst schädigungsarm eingebracht werden müssen. Das Marktpotential für derart optimierte Kontaktlinsen ist enorm.

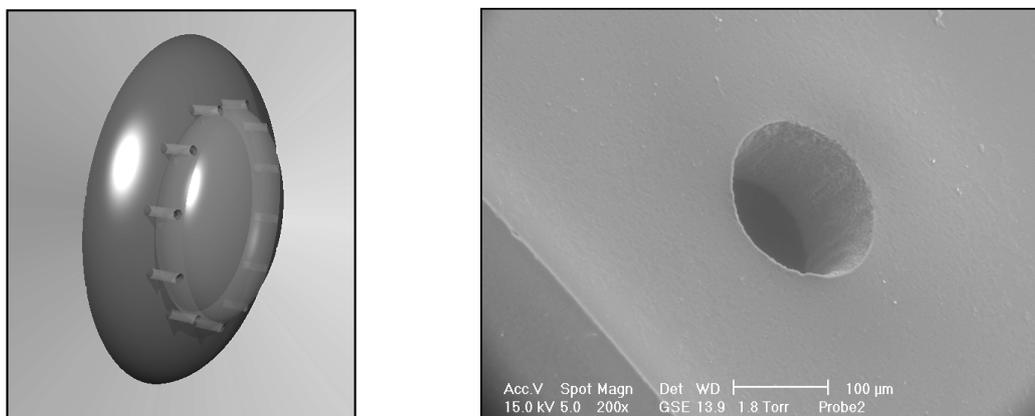


Bild 9-2 Mikro-Perforierung in einer Kontaktlinse, hergestellt mit einem fs-Ti:Saphir-Laser; Durchmesser der Bohrung 150 µm

Die Möglichkeiten der praktische Anwendung des Ultrakurzpuls-Laserbohrens sind zahlreich. Jedoch wird sich diese Technologie auch mittelfristig nur zögerlich im industriellen Einsatz beweisen können, da die heute verfügbaren Lasersysteme relativ unzuverlässig arbeiten und zudem hohen Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten bewirken. Daher stellt die Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern bislang lediglich eine Nischen-Technologie dar.

Die stetige Weiterentwicklung der Ultrakurzpuls-Verstärkersysteme, insbesondere im Pikosekundenbereich, wird jedoch langfristig den Sprung in die industrielle Fertigung ermöglichen. Neu Laserkonzepte werden einerseits die Zuverlässigkeit der Systeme erhöhen, gleichzeitig sind deutlich effizientere Prozesse aufgrund höherer mittlerer Ausgangsleistungen zu erwarten.

10 Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Ultrakurzpulslasern mit extrem kurzen Pulslängen im Femtosekundenbereich kann die Qualität von Mikrobohrungen gegenüber den herkömmlichen Bohrverfahren deutlich erhöht werden. Da die Ultrakurzpulslaser aufgrund ihrer Komplexität häufig jedoch nur unzureichende Strahlqualität bieten und sich daher mit den konventionellen Laserbohrtechniken keine zufriedenstellenden Bohrergebnisse erzielen lassen, ist die Entwicklung einer neuartigen Bohrtechnik erforderlich. Zudem fehlen detaillierte Untersuchungen des Bohrvorgangs, die einerseits das Verständnis des Ablationsprozesses, andererseits quantitative Aussagen über die erreichbare Präzision und Reproduzierbarkeit sowie über die Prozesseffizienz ermöglichen. Diese weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben stellen die wesentlichen Inhalte der hier vorliegenden Arbeit dar.

Zur Optimierung der Bohrungsqualität wird eine neue Bohrtechnik entwickelt. Diese basiert auf einer präzisen Bildrehvorrichtung, bei der ein rotierendes Spiegelsystem die axiale Rotation des Laserstrahls gegenüber dem Werkstück bewirkt. Der rotierende Laserstrahl bietet den Vorteil, dass die Qualität der Bohrungen nur noch geringfügig von der Strahlqualität des Lasers abhängt. Kreisförmige Laserbohrungen sind dadurch deutlich einfacher herzustellen. Das robuste und nahezu verschleißfrei arbeitenden Rotationssystem wird für den dauerhaften Einsatz in der Massenproduktion konzipiert.

Die Ergebnisse der grundlegenden Untersuchungen beim Bohren von 1 mm tiefen Mikrobohrungen mit Durchmessern $d < 0,2$ mm zeigen, dass sich bei der Materialablation mit ultrakurzen Laserpulsen mit zunehmender Bohrungstiefe erhebliche Energieverluste ergeben. Die Verringerung der Bohreffizienz ist auf die Reduktion der am Ort der Ablation vorliegenden Energiedichte der Laserstrahlung zurückzuführen. Die wesentlichen Gründe hierfür sind die geometrische Entwicklung des Bohrungsprofils, die durch die Fokussierung vorgegebene Strahlkaustik sowie Reflexionen an der Bohrungswand. Zusätzlich werden Energieverluste durch den erhöhten Materialtransport bei tieferen Bohrungen, durch Ionisationsplasmen innerhalb bzw. oberhalb des Bohrungskanals und durch Wechselwirkungen zwischen dem einfallenden Laserpuls und dem ablatierten Material bewirkt, wobei die drei zuletzt genannten Verlustanteile insgesamt als gering einzustufen sind.

Anhand der experimentellen Bohrversuche wird deutlich, dass die Effizienz des Bohrprozesses nicht beliebig durch Erhöhen der Laserpulsenergie gesteigert werden kann. Es ergibt sich ein prozessspezifischer Maximalwert, da es aufgrund höherer

Energiedichten zu überproportional großen Verlusten und zudem durch die starke Plasmabildung eher zur Aufweitung des Bohrkanals als zum Tiefenabtrag kommt. Neben der Energiedichte ist überwiegend die Fokusposition für die Bohrgeschwindigkeit entscheidend. Die größten Bohrgeschwindigkeiten können erreicht werden, wenn sich die Fokusposition im oberen Bereich des Material befindet.

Der Entstehungsprozess einer präzisen Durchgangsbohrung lässt sich grundsätzlich in zwei Phasen unterteilen. In der ersten Phase („Vorbohren“) wird mit hoher Intensität durch vergleichsweise wenige Laserpulse zunächst eine Durchgangsbohrung erzeugt, deren Durchmesser und Qualität relativ gering sind. In der anschließenden zweiten Phase findet die Nachbearbeitung der Kontur statt, wobei durch die sich zwangsläufig ergebende verringerte Intensität sukzessive eine Glättung der Oberfläche erfolgt. Die starke Plasmabildung im Inneren des Bohrkanals wirkt unterstützend bei der Ausformung bzw. Glättung der Bohrungswand. Insgesamt entsteht eine Bohrung mit höchster Qualität, strukturelle Schäden und Rauheiten an der Oberfläche treten nur in Tiefenbereichen von wenigen Mikrometern auf.

Beim Bohren mit dem entwickelten Strahlrotationssystem ergeben sich im Vergleich zum herkömmlichen Perkussionsbohren deutliche Einbußen der Bohrgeschwindigkeit, je nach Geometrie und Bohrtiefe bis zu 25 %. Dem gegenüber ist allerdings die erreichbare Qualitätssteigerung erheblich. Es zeigt sich, dass im Durchmesserbereich von $d = 0,1 \text{ mm} - 0,2 \text{ mm}$ Rundheitsabweichungen von nur $\Delta Z_z = \pm 3 \mu\text{m}$ und Durchmesserschwankungen von $\Delta d = \pm 2 \%$ erreicht werden können. Weiterhin zeigt sich, dass beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen und einer Pulsfrequenz von $f_p = 1 \text{ kHz}$ bereits eine Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls von $v_{RS} = 30 \text{ /min}$ für qualitative hochwertige Bohrung ausreicht.

Nicht nur die Effizienz des Bohrprozesses, sondern auch das Bohrungsprofil wird überwiegend durch die Fokusposition beeinflusst. Zudem spielen bei der Formgebung die Pulsleistung, die Anzahl der Laserpulse und die Umgebungsbedingung eine entscheidende Rolle. Durch Anpassung der verschiedenen Laser- und Prozessparameter können unterschiedliche Bohrungsprofile, wie z.B. konvergente, zylindrische und divergente Formen stufenlos hergestellt werden. Die besondere Herausforderung besteht darin, zylindrische und divergente Profile mit geradwandigem Verlauf zu erzeugen. Hierfür hat sich ein zweistufiges Bohrverfahren bewährt, bei dem pro Bohrung an zwei verschiedenen Fokuspositionen gebohrt wird.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen leistungsfähige Werkzeuge zum Erzeugen von präzisen Mikrobohrungen in Stahlwerkstoffen sind. Die erreichbare Bearbeitungsqualität ist im Vergleich zu den Bohrerergebnissen anderer Laserstrahlquellen deutlich höher. Durch das Rotations-Bohrverfahren ergeben sich qualitative Verbesserungen im Hinblick auf die Rundheit der Bohrungen und deren Oberflächengüte. Die insgesamt hohe Reproduzierbarkeit der Bohrprozesse wird durch die Robustheit des Strahlrotations-Systems gestützt und ist ein Maßstab für die Prozessstabilität. Die Stabilität des Prozesses ist eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige praktische Anwendungen des Bohrverfahrens.

Das große Anwendungspotential dieser Laserbohrtechnik zeigt sich insbesondere darin, dass durch einfache Anpassung weniger Laser- und Prozessparameter ein großes Spektrum an Bohrungsgeometrien erfasst werden kann. Die erreichbare Vielfalt an präzisen Bohrungsprofilen in Kombination mit der hohen Bearbeitungsqualität kann im untersuchten Durchmesserbereich durch kein anderes Mikrobohrverfahren bereitgestellt werden.

11 Literaturverzeichnis

- [ABEL99] ABELN, T.; RADTKE, J.; DAUSINGER, F.: *High Precision Drilling with Short-Pulsed Solid-State Lasers*. Proceedings of ICALEO'99, San Diego (1999)
- [ADAM98] ADAM, P.: *Elektrochemisches Bohren kleiner Löcher – Fertigungstechniken zur Herstellung kleiner Löcher*. VDI-Fachtagung: Kleine Löcher aber wie?, Böblingen (1998)
- [ALLM78] ALLMEN V., M.; BLASER, P.; AFFOLTER, K.; STRÜRMER, E.: *Absorption Phenomena in Metall Drilling Nd-Lasers*. IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. QE-14, Nr. 2 (Feb. 1978), Seite 85-88
- [ALTM00] ALTMAYER, S.; EICKENBUSCH, H.: *Innovation durch Femtosekunden-Laser*. Physikalische Blätter 56, Nr.6 (2000), Seite 59-62
- [ALVE91] ALVENSLEBEN V., F.; DICKMANN, K.: *Nd-YAG-Laser setzen sich im Mikrobereich durch*. Technische Rundschau. Heft 37 (1991), Seite 68-72
- [ALVE94] ALVENSLEBEN V.,F.: *Herstellung von Mikrobohrungen mit dem Nd:YAG-Laser*. Dr.-Ing. Diss. Fortschritt- Berichte VDI, Düsseldorf, VDI-Verl., Reihe 2, Nr. 309. (1994), ISBN 3-18-330902-5
- [AMEE98] AMEER-BEG, S.; PERRIE, W.: *Femtosecond laser microstructuring of materials*. Applied Surface Science 127 – 129 (1998), Seite 875–880
- [ANIS74] ANISIMOV, S. I.; KAPELIOVICH, B. L.; PEREL'MAN, T. L.: *Electron emission from metal surface exposed to ultrashort laser pulses*. Sov. Phys. LETP 39, 375 (1974)
- [ANIS92] ANISIMOV, S. I.; BARSUKOV, A. V.; MAKSHANTSEV, B. I.: *Numerical solution of picosecond laser pulse action with metal*. Scientific Association IVTAN, Russian Academy of Sciences, Moskau, Preprint Nr. 5-339 (1992)

- [ARNA71] ARNAUD, J. A.: *Technique for fast measurement of gaussian laser beam parameters*. Applied Optics, Vol. 10 (1971)
- [ASHK98] ASHKENASI, D.; VAREL, H.: *Application of self-focusing of ps laser pulses for three-dimensional microstructuring of transparent materials*. Applied Physics Letters, Vol. 72, Nr. 12 (März 1998), Seite 1442-1444
- [BANK00] BANKS, P. S.: *Femtosecond Laser Materials Processing*. Proceedings of SPIE Vol. 3934 (2000), Seite 14-21
- [BATT99] BATTEH, J.; CHEN, M. M.; MAZUMDER, J.: *Integral Analysis of Heat and Momentum Transfer in Laser Drilling*. Proceedings of ICALEO'99, San Diego (1999)
- [BAUM02] BAUMGARTEN, P.; STEIGER, T.: *Elektrochemisches Bohren metallischer Werkstoffe*. Technik-Report 74 (2002), Seite 30-32
- [BECK00] BECK, T.; MOTZKUS, R.; SEIDEL, S.; RICHTER, K.: *Präzisionsbohren mit aktiv gütegeschalteten Festkörperlasern hoher mittlerer Leistung*. Verbundprojekt PRABO, Laser in der Materialbearbeitung, Band 12, VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf (2000), Seite 15-26
- [BECK99] BECK, TH.; SEIDEL, S.; WEBER, H.: *High Aspect Ratio Laser Beam Drillings in Novel Materials of Turbine Components*. Proceedings of ICALEO'99, San Diego (1999)
- [BELF91] BELFORTE, D. A.: *Bohren in Turbinenschaufeln*. Laser, (Juni 1991), Seite 194-196
- [BERG93] BERGMANN; SCHAEFER; *Optik*. 9. Aufl. Berlin: de Gruyter, (1993), ISBN 3-11-012973-6
- [BLUM99] BLUMENFELD, L.; CHEN, M. M.: *Plasma and Fresnel Absorption for a Focused Laser Beam in a Deep Keyhole*. Proceedings of ICALEO'99, San Diego (1999)
- [BOLI84] BOLIN, S. R.: *Drilling with Lasers*. Machine and Tool Blue Book (März 1984), Seite 44-46

- [BREI84] BREIDENBACH, G.: *Feinbohren im Flugtriebwerksbau*. Industrie-Anzeiger 106 (1984), Seite 39-43
- [BUSC89] BUSCHER, H.: *Erhöhte Standzeiten bei Stanzwerkzeugen*. Metall 36 (1989), Seite 42-48
- [CALL00] CALLIES, G.; WAWRA, T.: *Verfahrenstrategien zur effizienten Erzeugung von Durchbrüchen und Bohrungen hoher Präzision für die Mengenfertigung*. Laser in der Materialbearbeitung, Band 12, VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf (2000), Seite 40-52
- [CARU69] CARUSO, A.; GRATTON, R.: *Interaction of short laser pulses with solid materials*. Plasma Phys. 1, 839 (1969)
- [CHIC96] CHICHKOV, B. N.; MOMMA, C.; NOLTE, S.; VON ALVENSLEBEN, F.: *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*. Appl. Phys. A 63, 109 (1996)
- [CING82] CINGOLANI, A.; FERRARA, M.; LUGARA, M.: *Metall drilling investigation by means of different high power laser radiation*. Applied Physics Communications, 2 (1&2), (1982), Seite 9-16
- [CORF83] CORFE, A. G.: *Laser drilling of aero engine components*. Proceedings of the 1st International Conference on Lasers in Manufacturing, Brighton, Uk (1-3 November 1983), Seite 31-40
- [CRON61] CRONJÄGER, L.: *Einsenken unter Ultraschalleinwirkung*. Hannover Univ. Diss (1961)
- [DAUS00] DAUSINGER, F.: *Laserverfahren für Mikrobohrungen*. Stuttgarter Impulse – Technologien für die Zukunft, Springer (2000), ISBN 3-540-67984-7, Seite 183-197
- [DAUS01] DAUSINGER, F.: *Drilling of high quality micro-holes*. The Industrial Laser User, Issue 22 (März 2001), Seite 25-27
- [DAUS03] DAUSINGER, F.: *Femtosecond technology for precise manufacturing: Fundamental aspects and technical aspects*. RIKEN Rev. Nr. 50 (Januar 2003), Seite 77-82

- [DAUS99] DAUSINGER, F.; ABELN, T.: *Bohren keramischer Werkstoffe mit Kurzpuls-Festkörperlasern*. Laseropto 31, Vol. 3 (1999), Seite 78-85
- [DE197] PATENTSCHRIFT DE 197 45 280 A1, Daimler Chrysler AG, 70567 Stuttgart, Priorität 15.10.1997
- [DE199] PATENTSCHRIFT DE 199 05 571 C1, Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, Priorität 11.02.1999
- [DE331] PATENTSCHRIFT DE 33 17 022 C2, Heraeus Industrielaser GmbH, 6450 Hanau, Priorität 10.05.1983
- [DEGN90] DEGNER, W.: *Fertigungsverfahren. Band 3: Abtragen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, (1990)
- [DICK94] DICKMANN, K.; DIK, E.: *Feinbohren mit Laserstrahlung*. Technica. Band 43, Heft 10 (1994), Seite 25-28
- [DICK98] DICKMANN, K.: *REPLIKA-Technik: Präzisions-Abformverfahren in der Laser-Mikrobearbeitung*. Laser Magazin 2 (1998), Seite 24–27
- [DIN 1899] NORM DIN 1899: *Kleinstbohrer*. (Februar 1990)
- [DIN 8580] NORM DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. (Juli 1978)
- [DIN 8588] NORM DIN 8588: *Fertigungsverfahren Zerteilen*. (Juni 1978)
- [DIN 8589] NORM DIN 8589 T2: *Fertigungsverfahren Spanen, Bohren, Senken, Reiben*. (August 1982)
- [DIN 8590] NORM DIN 8590: *Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. (Juni 1978)
- [DIN ISO 4291] NORM DIN ISO 4291: *Verfahren für die Ermittlung von Rundheitsabweichungen*. (September 1987)
- [DIN ISO 6318] NORM DIN ISO 6318: *Rundheitsmessung: Begriffe und Kenngrößen für die Rundheit*. (September 1987)

- [DOBE72] DOBENECK V., D.: *Abtragende Bearbeitungsverfahren mit dem Elektronenstrahl*. Fertigung 4 (1972), Seite 113-117
- [DOBE98] DOBENECK V., D.: *Elektronenstrahlbohren – Fertigungstechniken zur Herstellung kleiner Bohrungen*. VDI-Verlag, Böblingen (1998), Seite 47-57
- [FART01] FARTMANN, P.: *Hochgeschwindigkeits- Stanzwerkzeuge*. Metall 57 (2001), Seite 22-26
- [FEUE88] FEUER, M.: *Elektroerosive Metallbearbeitung – Materialabtrag durch Funkenerosion*. Vogel-Buchverlag Würzburg (1983)
- [FROM99] FROMENTO, A.: *Ultrasonic machining – overview*. Materials and Manufacturing Processes 12 (1999), Seite 375-373
- [GIER99] GIERING, A.; BECK, M.; BAHNMÜLLER, J.: *Laser Drilling of Aerospace and Automotive Components*. Proceedings of ICALEO'99, San Diego (1999)
- [HAAS98] HAAS, R.: *Ultraschallerosion - in vielen Fällen die Lösung*. VDI-Fachtagung: Kleine Löcher aber wie?, Böblingen (1998)
- [HAFE99] HAFERKAMP, H.; KAMLAGE, G.; PASCHKO, S.: *Intelligent und anpassungsfähig – Formgedächtnislegierungen*. Technik und Leben (April 1999), Seite 14-15
- [HEIS02] HEISTERKAMP, A.: *Einsatz ultrakurzer Laserpulse in der refraktiver Laserchirurgie*. Hannover Univ. Diss. (2002)
- [HEIT98] HEITMANN, D.: *Stechen- Bohren- Erodieren, Kapillaren in Spinddüsen*. VDI-Fachtagung: Kleine Löcher aber wie?, Böblingen (1998)
- [HERT01] HERTEL, I. V.; STOIAN, R.; ASHKENASI, D.: *On the physics of material processing with femtosecond lasers*. RIKEN Review, Nr. 12 (Januar 2001), Seite 23-30
- [HÖSC98] HÖSCHMANN, K.: *Bohren mit Hartmetall-Bohrern*. VDI-Fachtagung: Kleine Löcher aber wie? Böblingen (1998)

- [HOFE91] HOFER, M.; FERMANN, M. E.: *Modelocking with cross-phase and self-phase modulation*. Optics Letters, Vol. 16 (1991), Seite 502-504
- [HÜGE92] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser*. Stuttgart, Teubner (1992), ISBN 3-519-06134-1
- [HUND00] HUNDERTMARK, H.: *Passiv modengekoppelter fs-Erbium-Faserlaser*. Diplomarbeit, Universität Hannover (Oktober 2000)
- [IHLE95] IHLEMANN, J.; SCHOLL, A.; SCHMIDT, H.; WOLFF-ROTTKE, B.: *Nanosecond and femtosecond excimer-laser ablation of oxide ceramics*. Applied Physics A – Material Science & Processing, Band 60 (1995), Seite 411-417
- [ISEM02] ISEMAN, A.: *Ultrakurzpuls- und –Verstärkersysteme auf Colquiriite-Basis*. Hannover Univ. Diss., Cuvillier-Verlag Göttingen (2002)
- [ITO99] ITO, Y.; SHIMIZU, T.; OGURO, I.; KIJAMI, S.: *Jet-like formation in Laser Ablation of metals observed by nanosecond imaging technique in gases*. ICALEO'99, San Diego (1999)
- [KAUT94] KAUTEK, W.; KRÜGER, J.: *Femtosecond pulse laser ablation of metallic, semiconducting, ceramic and biological materials*. Laser materials processing: industrial and microelectronics applications, Vol. 2207 (5.-8. April 1994)
- [KAUT96] KAUTEK, W.; KRÜGER, J.; LENZNER, M.; SARTINA, S.; SPIELMANN, C.; KRAUSZ, F.: *Laser ablation of dielectrics with pulse duration between 20fs and 3ps*. Applied Physics Letters, Band 69 , Heft 21 (1996), Seite 3146-3148
- [KNOW01] KNOWLES, M.; BELL, A.: *CVL Laser drilling of fuel injection components*. The Industrial Laser User, Issue 22 (März 2001), Seite 28-29

- [KOCH00] KOCH, J.; WOLF, M.; SEPOLD, G.: *Laserpräzisionsbohren zur Herstellung von Multilochblenden*. Verbundprojekt PRABO, Laser in der Materialbearbeitung, Band 12, VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf (2000), Seite 53-66
- [KÖNI90a] KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren Band 5: Drehen Fräsen Bohren*. VDI-Verlag, Düsseldorf (1990)
- [KÖNI90b] KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren Band 3: Abtragen*. VDI-Verlag, Düsseldorf (1990)
- [KONO97] KONONENKO, T. V.; GARNOV, S. V.; KLIMENTOV, S. M.; KONOVA, V. I.; LOUBNIN, E. N.; DAUSINGER, F.; RAIBER, A.; TAUT, C.: *Laser Ablation of Metals and Ceramics in Picosecond-Nanosecond Pulsewidth in the Presence of different Ambient Atmospheres*. Applied Surface Science, Band 109/110 (1997), Seite 48-51
- [KÖRB02] KÖRBER, K.: *Lokale Metallisierung von AlN-Keramik mittels Laserstrahlung*. Dr.-Ing. Diss. Fortschritt- Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 618. Düsseldorf, VDI-Verl. (2002), ISBN 3-18-361802-8
- [KORD83] KORDAS, L.; PSIUK, J.: *Application of Electron Beam with Multiple Symmetry to Drilling*. 3rd International Colloquium on Welding and Melting by Electrons and Laser Beam, Lyon (5-9 Sep. 1983), Seite 343-350
- [KORT99] KORTE, F.; NOLTE, S.; CHICHKOV, B.N.; BAUER, T.; WAGNER, T.; FALLNICH, C.; WELLING, H.: *Far-field and near-field material processing with femtosecond laser pulses*. COLA'99 – 5th International Conference on Laser Ablation, Göttingen (1999)
- [KRÜG96] KRÜGER, J.; KAUTEK, W.: *Femtosecond-pulse visible laser processing of transparent materials*. Applied Surface Science. Band 96-98 (1996), Seite 403-438
- [KRÜG99] KRÜGER, J.; KAUTEK, W.: *The Femtosecond Pulse Laser: A new Tool for Microstructuring*. Laser Physics, 9 (1999) 1, Seite 33–40

- [LENZ98] LENZNER, M.; KRÜGER, J.; SARTINA, S.; CHENG, Z.; SPIELMANN, C.; MOUROU, G.; KAUTEK, W.; KRAUSZ, F.: *Femtosecond Optical Breakdown in Dielectrics*. Physical Review Letters. Band 80, Heft 18 (1998), Seite 4076-4079
- [LIND97] VON DER LINDE, D.; SOKOLOWSKI-TINTEN, K.; BALKOWSKI, J.: *Laser-solid interaction in the femtosecond time regime*. Applied Surface Science 109/110 (1997), Seite 1-10
- [LOH93] LOH, W. H.; ATKINSON, D.: *Passively mode-locked Er fiber laser using a semiconductor nonlinear mirror*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 5 (1993), Seite 35-37
- [LOW99] LOW, D. K. Y.; LI, L.; CORFE, A. G.; BYRD, P. J.: *Taper Control during Laser Precision Drilling of NIMONIC Alloy using Sequential Pulse Delivery Pattern Control (SPDPC)*. Proceedings of ICALEO'99, San Diego (1999)
- [LUBA03] LUBATSCHOWSKI, H.; HEISTERKAMP, A.; WILL, F.: *Medical applications for ultrafast laser pulses*. RIKEN Review Nr. 50, (Januar 2003), Seite 113-118
- [MEIS01] MEISNER, G.: *Möglichkeiten des funkenerosiven Bohrens*. Technik-Report 26 (2001), Seite 35-36
- [MOMM96] MOMMA, C.; CHICHKOV, B.N.; NOLTE, S.; VON ALVENSLEBEN, F.; Tünnermann, A.; Welling, H.; Wellegehausen, B.: *Short-pulse laser ablation of solid targets*. Opt. Commun. 82, 94 (1996)
- [MOMM97a] MOMMA, C.; NOLTE, S.; CHICHKOV, B. N.: *Präzise Mikro-Bearbeitung mit Femtosekunden-Laserpulsen*. Laser und Optoelektronik 29 (1997) 3, Seite 82-89
- [MOMM97b] MOMMA, C.; NOLTE, S.; CHICHKOV, B.N.; VON ALVENSLEBEN, F.; TÜNNERMANN, A.: *Precise laser ablation with ultrashort pulses*. Appl. Surf. Sci. 109/110 (1997)
- [MOMM98] MOMMA, C.; NOLTE, S.; KAMLAGE, G.: *Beam delivery of femtosecond laser radiation by diffractive optical elements*. Applied Physics A 67 (1998), Seite 517-520

- [MOMM99] MOMMA, C.; KNOP, U.; NOLTE, S.: *Laser cutting of slotted tube coronary stents – state-of-the-art and future developments*. Progr. Biomed. Res., 39 (Feb. 1999)
- [MOUR97] MOUROU, G.; LIU, X.; DU D.: *Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses*. IEEE Journal of Quantum Electronics Vol. 33, Nr. 10 (1997), Seite 1706-1716
- [NN00] N.N.: *Präzisionsabtragen mit Lasern*. Laser in der Materialbearbeitung, VDI-TZ, Band 12, (2000)
- [NN90] N.N.: *Elektronenstrahlbohren - Unkonventionelle Spitzentechnologie*. Informationsschrift der Fa. Messer Griesheim GmbH (1990)
- [NOLT99a] NOLTE, S.: *Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen*. Hannover Univ. Diss., Cuvillier-Verlag Göttingen (1999), ISBN 3-89712-682-6
- [NOLT99b] NOLTE, S.; KAMLAGE, G.; BAUER, T.; KORTE, F.; FALLNICH, C.; OSTENDORF, A.; VON ALVENSLEBEN, F.: *Mikrostrukturierung mit Femtosekundenlasern*. LaserOpto, Band 31, Heft 3 (1999), Seite 72-76
- [NOLT99c] NOLTE, S.; MOMMA, C.; KAMLAGE, G.; OSTENDORF, A.; FALLNICH, C.; VON ALVENSLEBEN, F.; WELLING, H.: *Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling*. Applied Physics A – Material Science & Processing – Springer Verlag (März 1999), Seite 563-567
- [NOLT99d] NOLTE, S.; MOMMA, C.; CHICHKOV, B. N.; WELLING, H.: *Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen*. Physikalische Blätter 55, Nr.6 (1999), Seite 41-44
- [OSTE00a] OSTENDORF, A.: *Untersuchungen zum Präzisionsabtrag mit VUV-Laserstrahlung und ultrakurzen Laserpulsen*. Dr.-Ing. Diss. Fortschritt- Berichte VDI, Düsseldorf, VDI-Verl.Reihe 2, Nr. 542 (2000), ISBN 3-18-354202-1

- [OSTE00b] OSTENDORF, A.; KAMLAGE, G.; NOLTE, S.: *Präzisionsbohren mit Kurzpulslasern*. Verbundprojekt PRABO, Laser in der Materialbearbeitung, Band 12, VDI- Technologiezentrum, Düsseldorf (2000), Seite 27-39
- [OSTE00c] OSTENDORF, A.: *Short laser pulses for material processing*. The Industrial User, Issue 20 (August 2000), Seite 26-29
- [PERR99] PERRY, M. D.; STUART, B. C.; BANKS, P. S.; FEIT, M. D.; YANOVSKY, V.; RUBENCHIK, A. M.: *Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials*. Journal of Applied Physics, Band 85, Heft 9 (1999), Seite 6803-6810
- [PROP01] POPRAWA, R.: *Laseranwendungen in der Mikrotechnik*. Leitartikel, Inno Nr. 18 (Februar 2001)
- [REBE94] V. REBENSTOCK, H.: *Erzeugung und Anwendung hochfokussierter Nd:YAG-Laserstrahlung zur Charakterisierung von Faserendflächen*. Diplomarbeit, Universität Hannover (Dezember 1994)
- [SALI87] SALIN, F.; GEORGES, P.; ROGER, G.; BRUN, A.: *Single-shot-measurement of 52-fs pulse*. Appl. Optics Letters 26 (1987), Seite 4528-4531
- [SAM97] SAMUEL, D.: *Ultrasonic material processing*. Materials Science and Engineering. A 215 (1997), Seite 206-212
- [SCHR98] SCHREIBER, O.: *Maschinen und Einrichtungen für das funkenerosive Bohren*. VDI-Fachtagung: Kleine Löcher aber wie?, Böblingen (1998), Seite 1-16
- [SCHU92] SCHULER, A.: *Materialbearbeitung mit Elektronenstrahl*. Technik-Report 11 (1992), Seite 25-27
- [SERB03] SERBIN, J.; EGBERT, A.; OSTENDORF, A.; CHICHKOV, B.N.: *Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics*. Optics Letters, Vol, 28, 5 (März 2003), Seite 301-303

- [SHIR98] SHIRK, M. D.; MOLIAN, P. A.: *A Review of ultrashort pulsed laser ablation of materials*. Journal of Laser Applications. Band 10 (1998), Heft 1, Seite 18-28
- [SIMO96] SIMON, P.; IHLEMANN, J.: *Machining of submicron structures on metals and semiconductors by ultrashort UV-laser pulses*. Applied Physics A 63 (1996), Seite 505-508
- [SIMO97] SIMON, P.; IHLEMANN, J.: *Ablation of Submicron Structures on Metals and Semiconductors by Femtosecond UV-Laser Pulses*. Applied Surface Science. Band 109/110 (1997), Seite 25-29
- [STRI85] STRICKLAND, D.; MOUROU, G.: *Compression of amplified chirped optical pulses*. Opt. Commun. 56, 219 (1985)
- [STUA96] STUART, B. C.; FEIT, M. D.; HERMAN, S.; RUBENCHIK, A. M.; SHORE, B. W.; PERRY, M. D.: *Optical ablation by high-power short-pulse lasers*. J. Opt. Soc. Am B 13, 459 (1996)
- [TÖNS03] TÖNSHOFF, H.K.; OSTENDORF, A.; KÖRBER, K.; BÄRSCH, N.: *Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses*. Appl. Phys. A, 237-242 (2003)
- [TÖNS98] TÖNSHOFF, H. K.; KAMLAGE, G.; MOMMA, C.; NOLTE, S.; OSTENDORF, A.: *Microdrilling of Metals with ultrashort Laser Pulses*. Proceedings of ICALEO'98 (1998), Seite 72-80
- [TÖNS99a] TÖNSHOFF, H. K.; OSTENDORF, A.: *Kurze Pulse für die Materialbearbeitung - Nischendasein oder Schlüsseltechnologie?* LaserOpto. Band 31, Heft 3 (1999), Seite 68-71
- [TÖNS99b] TÖNSHOFF, H. K.; VON ALVENSLEBEN, F.; OSTENDORF, A.; KAMLAGE, G.; NOLTE, S.: *Micromachining of Metals using ultrashort Laser Pulses*. IJEM Review – International Journal of Electrical Machining. Band 4 (Januar 1999), Seite 1-6

- [US473] PATENTSCHRIFT US 4737613, United Technologie Corporation, Hartford, Connecticut, USA, Priorität 24.08.1984
- [VARE97] VAREL, H.; ASHKENASI, D.: *Micromachining of quartz with ultrashort laser pulses*. Applied Physics A, 65 (1997), Seite 367-373
- [VDI/VDE 2631] NORM VDI/VDE-Richtlinien 2631: *Verfahren für die Ermittlung von Rundheitsabweichungen*, (Dezember 1997)
- [WAGN02] WAGNER, T.: *Abtragen von Silizium mit ultrakurzen Laserpulsen*. Dr.-Ing. Diss. Fortschritt- Berichte VDI, Düsseldorf, VDI-Verl, Reihe 2, Nr. 609 (2002), ISBN 3-18-360902-9
- [WILL01] WILLMANN, C.: *Span um Span - Mikrobohren mit Spiralbohrern*. Metall 57 (2001), Seite 61-67
- [WILL02] WILL, M.; NOLTE, S.; CHICHKOV, B.N.; TÜNNERMANN, A.: *Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses*. Appl. Opt., Vol. 41, 21 (Juli 2002)
- [WINK02] WINKLER, R.; BURMANN, A.: *Electron beam drilling*. Journal of Material Processing Technology 74 (2002), Seite 26-28
- [YILB97] YILBAS, B. S.: *Parametric study to improve laser hole drilling process*. Journal of Material Processing Technology 70 (1997), Seite 264-273
- [ZIRN91] ZIRNGIBL, M.; STULZ, L. W.: *1,2 ps pulses from passively mode-locked laser diode pumped Er-doped fibre laser*. Electronics Letters, Vol. 27 (1991), Seite 1734-1735

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Günter Kamlage
Geburtsdatum: 13.02.1969
Geburtsort: Werlte
Familienstand: verheiratet

Schulbildung

1977 – 1979 Grundschule Spahnharrenstätte
1979 – 1981 Orientierungsstufe Sögel
1981 – 1988 Hümmling Gymnasium Sögel

Wehrdienst

10/1988 – 09/1989 Hindenburg-Kaserne, Oldenburg

Studium

10/1989 – 03/1996 Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau

04/1994 – 10/1994 University of Ulster, Belfast
Dept. of Mechanical and Industrial Engineering

Berufspraxis

02/1997 – 03/2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Laser Zentrum Hannover e.V.

seit 11/2003 Geschäftsführer der Micreon GmbH