

Laserstrahl-Bohren ist ein etabliertes Verfahren zur Fertigung von Kühlluftbohrungen in Turbomaschinenkomponenten wie z.B. Turbinenschaufeln in den Bereichen Energieerzeugung sowie Luftfahrt. Aufgrund der heute konventionell verwendeten blitzlampen-gepumpten Nd:YAG Laserstrahlung mit großen Pulsenergien bis zu 80 J entstehen Defekte an den Bohrungswänden wie Schmelzschichten oder Mikrorisse. Die Lebensdauer der Komponenten wird aufgrund der Defekte bis zu einem Faktor von 9 reduziert.

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung des Bohrprozesses, um die metallurgische Qualität von Kühlluftbohrungen bei gleichbleibender Produktivität zu vergrößern. Die Vorgehensweise ist in drei Schritte unterteilt: Zunächst wird gepulste Faserlaserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich von einigen hundert Mikrosekunden verwendet. Durch den vorwiegend schmelzdominierten Abtrag wird eine große Produktivität erzielt. Da die Puls-zu-Puls Stabilität sowie mögliche Repetitionsraten größer sind als bei blitzlampen-gepumpter Nd:YAG Laserstrahlung, können Bohrungen mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  in 5 mm dicken Edelstahl in 1 s mit Schmelzschichtdicken von ca. 50  $\mu\text{m}$  erzielt werden.

Im zweiten Schritt wird erstmals ultrakurzgepulste Laserstrahlung für die Herstellung von Kühlluftbohrungen verwendet. Aufgrund des verdampfungsdominierten Abtrags können bei geeigneter Wahl der Laserparameter Repetitionsrate und Leistung, der Abtragstrategie sowie der Prozessgasart nahezu defektfreie Bohrungen erzielt werden. Die Bearbeitungsdauer beträgt ca. 150 s.

Um die Vorteile beider Bohrprozesse zu kombinieren, wird im dritten Schritt ein hybrider Bohrprozess entwickelt. Zunächst wird eine Vorbohrung mittels Faserlaserstrahlung erzeugt. In einem zweiten Schritt wird mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung das thermisch beeinflusste Material an der Bohrungswand abgetragen. Somit können nahezu defektfreie Bohrungen in 15 s erzielt werden.

ISBN 978-3-86359-428-2



9 783863 594282



Hermann Uchtmann

## Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren

Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren

Hermann Uchtmann



ILT

# Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren

## Modular hybrid laser drilling

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Hermann Uchtmann

### **Berichter:**

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser

Tag der mündlichen Prüfung: 15. April 2016

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.



ERGEBNISSE AUS DER LASERTECHNIK

**Hermann Uchtmann**

Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Hermann Uchtmann:

Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2016  
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen  
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen  
Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

Titelfoto © thomas ernsting fotografie

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-428-2

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

# Inhalt

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>3</b>
<b>3 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>7</b>
3.1 Fertigung von Kühlluftbohrungen	7
3.2 Lebensdauerbeeinflussende Defekte von Kühlluftbohrungen	9
3.3 Bohren mit Faserlaserstrahlung	11
3.3.1 Grundlagen	11
3.3.2 Faserlaserstrahlquellen	12
3.3.3 Materialbearbeitung mit Faserlaserstrahlung	13
3.4 Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung	14
3.4.1 Grundlagen	14
3.4.2 Ultrakurzgepulste Laserstrahlquellen	18
3.4.3 Materialbearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung	20
<b>4 Verwendete Anlagen- und Systemtechnik sowie Analyseverfahren</b>	<b>21</b>
4.1 Laserstrahlquellen, Strahlführung und -formung	21
4.1.1 Faserlaserstrahlung	21
4.1.2 Ultrakurzgepulste Laserstrahlung	25
4.2 Metallographische Analyse von Bohrungen	29
<b>5 Verfahrensentwicklung</b>	<b>31</b>
5.1 Schritt 1: Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Perkussionsbohren mit Faserlaserstrahlung	31
5.1.1 Einfluss der Strahlführung und -formung	32
5.1.2 Einfluss der Verfahrensparameter	44
5.1.3 Einfluss der dynamischen Prozessführung	52
5.2 Schritt 2: Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Bohren mit ultrakurzgepulster Festkörperlaserstrahlung	58
5.2.1 Einfluss der Repetitionsrate und Laserleistung	61

5.2.2	Einfluss der Prozessgasart und des Prozessgasdrucks	67
5.2.3	Einfluss der Abtragstrategie	73
5.3	Schritt 3: Hybrider Bohrprozess	88
5.3.1	Vorbohren mit Faserlaserstrahlung	89
5.3.2	Abtrag der defektbehafteten Schmelzschichten	91
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>Quellen und weiterführende Literatur</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>121</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>123</b>
<b>11</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>129</b>
<b>12</b>	<b>Danksagung</b>	<b>131</b>

## Kurzfassung

Laserstrahl-Bohren ist ein etabliertes Verfahren zur Fertigung von Kühlluftbohrungen in Turbomaschinenkomponenten wie z.B. Turbinenschaufeln in den Bereichen Energieerzeugung sowie Luftfahrt. Aufgrund der heute konventionell verwendeten blitzlampen-gepumpten Nd:YAG Laserstrahlung mit großen Pulsenergien bis zu 80 J entstehen Defekte an den Bohrungswänden wie Schmelzschichten oder Mikrorisse. Die Lebensdauer der Komponenten wird aufgrund der Defekte bis zu einem Faktor von neun reduziert.

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung des Bohrprozesses, um die metallurgische Qualität von Kühlluftbohrungen bei gleichbleibender Produktivität zu vergrößern. Die Vorgehensweise ist in drei Schritte unterteilt: Zunächst wird gepulste Faserlaserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich von einigen hundert Mikrosekunden verwendet. Durch den vorwiegend schmelzdominierten Abtrag wird eine große Produktivität erzielt. Da die Puls-zu-Puls Stabilität sowie mögliche Repetitionsraten größer sind als bei blitzlampen-gepumpter Nd:YAG Laserstrahlung, können Bohrungen mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  in 5 mm dicken Edelstahl in 1 s mit Schmelzschichtdicken von ca. 50  $\mu\text{m}$  erzielt werden.

Im zweiten Schritt wird erstmals ultrakurzgepulste Laserstrahlung für die Herstellung von Kühlluftbohrungen verwendet. Aufgrund des verdampfungsdominierten Abtrags können bei geeigneter Wahl der Laserparameter Repetitionsrate und Leistung, der Abtragstrategie sowie der Prozessgasart nahezu defektfreie Bohrungen erzielt werden. Die Bearbeitungsdauer beträgt ca. 150 s.

Um die Vorteile beider Bohrprozesse zu kombinieren, wird im dritten Schritt ein hybrider Bohrprozess entwickelt. Zunächst wird eine Vorbohrung mittels Faserlaserstrahlung erzeugt. In einem zweiten Schritt wird mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung das thermisch beeinflusste Material an der Bohrungswand abgetragen. Somit können nahezu defektfreie Bohrungen in 15 s erzielt werden.

## Abstract

Laser drilling is an established manufacturing process for the production of cooling air holes in turbomachinery components, such as turbine blades in power generation and aviation. Due to conventionally used flashlamp-pumped Nd:YAG laser radiation with large pulse energies up to 80 J, defects occur at the hole walls such as recast layers or micro cracks. The lifespan of the components is reduced due to the defects up to a factor of nine.

The aim of this work is the further development of the drilling process to increase the metallurgical quality of cooling air holes with remaining constant productivity. The procedure is divided into three steps: First, pulsed fiber laser radiation is used with pulse durations in the range of a few hundred microseconds. Due to the melt dominated ablation of material, a high productivity is achieved. Since the pulse-to-pulse stability and possible repetition rates are higher than by using flashlamp-pumped Nd:YAG laser radiation, holes with a diameter of 500 microns in 5 mm thick stainless steel can be achieved in 1 s with melt layer thicknesses of approximately 50 microns.

In the second step ultrashort pulsed laser radiation is used for the first time for drilling of cooling air holes. The ablation of material is evaporation dominated. By determining suitable laser parameters such as repetition rate and average power, a suitable strategy of laser beam deflection as well as a suitable combination of kind and pressure of process gas, nearly defect-free holes can be obtained. The processing time is approximately 150 s.

In order to combine the advantages of both drilling processes, in the third step, a hybrid drilling process is developed. First, a pilot hole is drilled by fiber laser radiation. In a second step, the thermally affected material at the hole wall is removed by using ultrashort pulsed laser radiation. Thus, nearly defect-free holes can be drilled in 15 s.

# 1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende in Deutschland wird der Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung zur Planerfüllung des Energiekonzepts der Bundesregierung weiter ansteigen. Im Energiekonzept vom September 2010 wird eine Zielgröße von 35 % erneuerbarem Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2020 sowie 80 % bis 2050 genannt [Bun10]. Daraus folgt die Anforderung an konventionelle Kraftwerke, künftig flexiblere Fahrweisen im Mittel- und Spitzenlastbetrieb zu realisieren, da die Einspeisung großer Anteile von Photovoltaik- und Windstrom aufgrund der schwankenden Verfügbarkeit fluktuierend ist [Lad09]; [Sch15]. Aus diesen schnellen und häufigen Lastwechseln resultiert eine Zunahme der Betriebszyklen, durch die die Lebensdauer thermisch hoch beanspruchter Komponenten von stationären Gasturbinen, wie z.B. Turbinenschaufeln oder Brennkammern, reduziert wird. Bei diesen Komponenten sind sowohl die Nutzung beschichteter, hoch warmfester Werkstoffe mit Korrosionsschutz- und Wärmedämmschichten, als auch der Einsatz von Kühltechnologien erforderlich [CBL98]; [WH96]. Insbesondere die Filmkühlung, bei der Kühlluft durch Bohrungen aus den beschichteten Hochtemperaturkomponenten strömt, ist zur Vergrößerung der maximalen Einsatztemperatur unverzichtbar [Sau05]. Diese Kühlluftbohrungen werden bei beschichteten Komponenten aufgrund der großen Härte der keramischen Wärmedämmschicht von ca. 1400 Vickers konventionell mittels Laserstrahl-Bohren hergestellt.

Bei den Gasturbinenherstellern wird heute hauptsächlich blitzlampen-gepumpte Nd:YAG-Festkörperlaserstrahlung zur Fertigung von Kühlluftbohrungen in Turbinenkomponenten eingesetzt. Aufgrund der verwendeten Verfahrensparameter mit großen Pulsenergien bis zu 80 J der Laserstrahlung entstehen im Bereich der Bohrungswand signifikante Gefügeänderungen und Defekte wie Schmelzschichten, Risse oder Schichtdelaminationen. Durch diese verfahrensbedingt eingebrachten Defekte wird eine Verkleinerung der Lastspielzahl bis zum Bauteilversagen um ca. Faktor 9 verursacht. Dazu wurden Dehnungswöhlerkurven von ungebohrten und nach dem Stand der Technik mittels blitzlampen-gepumpter Nd:YAG Laserstrahlung gebohrten Proben der einkristallinen Nickelbasis-Gusslegierung CMSX-4 im Rahmen des DFG SFB561 ermittelt, Bild 1. [Kla02]

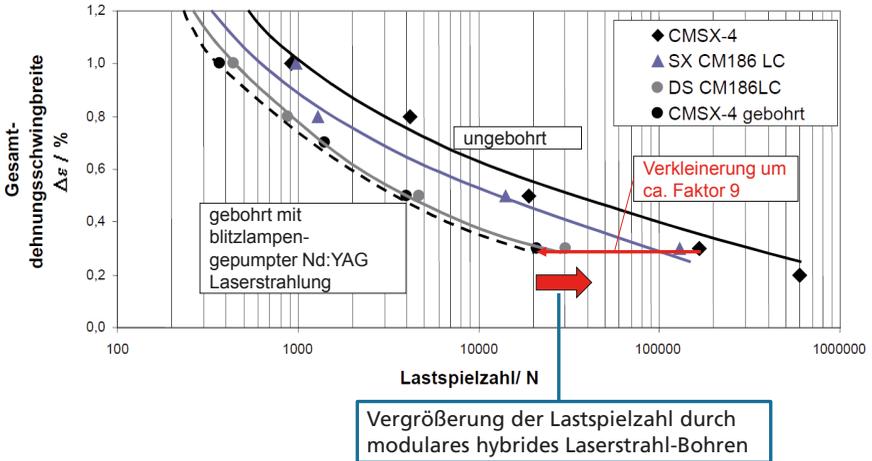


Bild 1: Anzahl der Lastwechsel aufgetragen über der Änderung der Dehnung mit markierter Verkleinerung der Lastspielzahl bis zum Versagen von gebohrten im Vergleich zu ungebohrten CMSX-4 Proben [Kla02]

Die signifikante Verkleinerung der Lastspielzahl geht mit einer Verkleinerung der Bauteillebensdauer mit nahezu gleichem Faktor einher. Durch eine Vergrößerung der Lastspielzahl und somit der Bauteillebensdauer können einerseits größere Wartungszyklen der Bauteile realisiert werden. Andererseits kann die Arbeitstemperatur der Turbine vergrößert werden, was in einem größeren Gesamtwirkungsgrad resultiert.

## 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

### Forschungsfrage

Um die Lebensdauer von laserstrahl-gebohrten Turbomaschinenkomponenten zu vergrößern, wird für diese Dissertation folgende Forschungsfrage formuliert:

*„Wie kann die metallurgische Qualität von Kühlluftbohrungen bei nahezu gleichbleibender Produktivität vergrößert werden, so dass die lebensdauersenkenden Defekte an Kühlluftbohrungen reduziert oder gänzlich vermieden werden?“*

### Forschungshypothese

Zur Verkleinerung der lebensdauersenkenden Defekte an Kühlluftbohrungen wird in dieser Arbeit ein hybrider Laserstrahl-Bohrprozess bestehend aus zwei Prozessschritten mit dem Ziel der Vergrößerung der metallurgischen Qualität entwickelt und erstmals angewandt:

1. Einbringen einer Bohrung in das Werkstück mit großer Volumenabtragrate bis zu  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$  mittels *gepulster Faserlaserstrahlung* (vgl. „Schruppen“ bei spanender Bearbeitung, große Produktivität)
2. Abtragen des thermisch beeinflussten Materials an der Bohrungswand mit kleiner Volumenabtragrate von ca.  $0,02 \text{ mm}^3/\text{s}$  mittels *ultrakurzgepulster Laserstrahlung* (vgl. „Schlichten“ bei spanender Bearbeitung, große Qualität)

Im Vergleich zum Stand der Technik bei Gasturbinenherstellern wird im ersten Schritt ein Bohrprozess mit langgepulster Faserlaserstrahlung ( $\mu\text{s}$ -ms) statt blitzlampen-gepumpter Festkörperlaserstrahlung entwickelt. Faserlaserstrahlung weist eine größere Strahlqualität ( $M^2 \sim 6$ )<sup>1</sup> sowie eine größere Laserpuls-zu-Laserpuls-Stabilität auf. Weiterhin ergeben sich ökonomische Vorteile aufgrund kleinerer Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten im Vergleich zu blitzlampen-gepumpten Strahlquellen. Beim zweiten Prozessschritt wird erstmalig ein Bohrprozess mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung (fs-ps) in Materialien entwickelt und angewandt, die dicker als  $500 \mu\text{m}$  sind.

<sup>1</sup> Die Beugungsmaßzahl  $M^2$  ist vom Kerndurchmesser der Strahlführungsfaser abhängig. Bei Verwendung einer Strahlführungsfaser mit einem Kerndurchmesser von  $50 \mu\text{m}$  beträgt  $M^2$  ca. 6.

## Überprüfung der Forschungshypothese

Für die Spezifikation der Bohrungen wird eine Geometrie gewählt, die typischen Kühlluftbohrungen in Turbinenkomponenten, wie z.B. Schaufeln, entspricht. Dies sind Bohrungsdurchmesser von ca. 0,5 mm sowie Bohrungstiefen bis zu 5 mm. Zur Ermittlung geeigneter Prozessfenster wird im Rahmen dieser Arbeit Edelstahl 1.4301<sup>2</sup> als Probenmaterial verwendet. Die in drei Schritte unterteilte Vorgehensweise ist in Bild 2 dargestellt. Parallel zu allen drei Schritten werden metallographische Analysen durchgeführt, um die Geometrie der Bohrungen bzgl. Zylindrizität, Konizität und Durchmesser sowie die metallurgische Qualität bzgl. Defekten wie Rissen, Schmelzschichten oder Gefügeänderungen zu untersuchen.

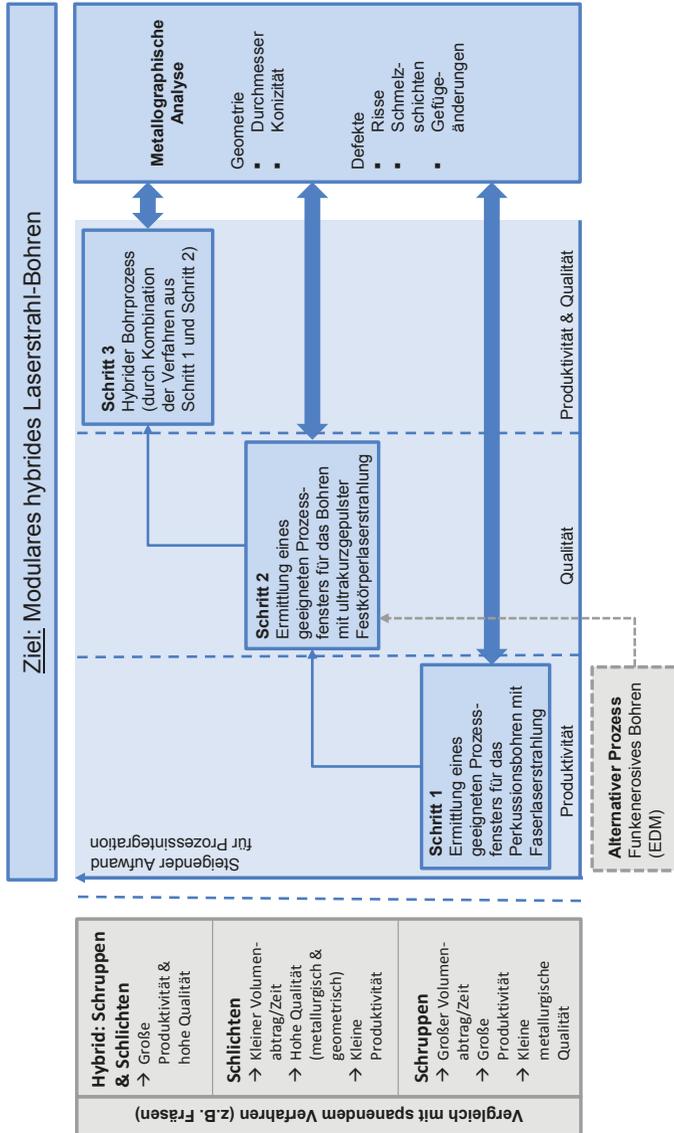
Schritt 1: Im ersten Schritt wird ein geeignetes Prozessfenster für das Perkussionsbohren mit Faserlaserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich von  $\mu\text{s}$  bis ms ermittelt. Dies wird durch Anpassung der Strahlführung und -formung sowie der systematischen Variation der Verfahrensparameter erreicht. Weiterhin wird der Einfluss einer dynamischen Anpassung der zeitlichen Intensitätsverteilung während des Bohrprozesses untersucht, um Aufweitungen am Bohrungseintritt zu vermeiden. Aufgrund der Pulsdauern im Bereich von  $\mu\text{s}$ -ms erfolgt der Materialaustrieb größtenteils schmelzdominiert.

Ziel von Schritt 1 ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Prozessfensters für das Perkussionsbohren mit Faserlaserstrahlung zur Erreichung der geforderten Bohrungsgeometrie. Dabei soll die Produktivität des Bohrprozesses möglichst groß sein. Aufgrund des schmelzdominierten Materialaustriebs sind Schmelzschichten und Risse an der Bohrungswand zu erwarten.

---

<sup>2</sup> Der Eisenbasiswerkstoff 1.4301 hat eine vergleichbare Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität wie Nickel (Basiswerkstoff von Mehrschichtsystemen), so dass dieser für die grundlegenden Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

Bild 2:  
Flussdiagramm zur  
Zielsetzung und  
Vorgehensweise



Schritt 2: In Schritt 2 erfolgt die Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Bohren mit ultrakurzgepulster Festkörperlaserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich von fs bis ps. Aufgrund der ultrakurzen Pulse erfolgt der Materialabtrag verdampfungsdominiert. Zur Erreichung der Verdampfungsenthalpie sind große Pulsspitzenleistungen im GW-Bereich erforderlich. Eine örtliche Trennung der Pulse ist zwingend erforderlich, so dass das verdampfte Material entweichen kann und nicht durch nachfolgende Pulse Schmelze erzeugt wird. Dazu werden einerseits die Verfahrensparameter Pulsenergie und Repetitionsrate systematisch variiert, andererseits wird der Einfluss der Abtragstrategie (Kreis- und Spiralbewegungen, Variation der Fokuslage) auf das Bearbeitungsergebnis untersucht. Weiterhin wird der Einfluss der Prozessgasart und des -drucks analysiert, um mögliche thermische Beeinflussungen aufgrund des Prozessgases zu vermeiden.

Ziel von Schritt 2 ist die Vergrößerung der metallurgischen Qualität von Bohrungen bzgl. der Verkleinerung bzw. Vermeidung von Defekten wie Gefügeänderungen, Schmelzschichten und Rissen.

Schritt 3: In Schritt 3 wird ein zweistufiger Bohrprozess mit Kombination beider Bohrprozesse aus Schritt 1 und Schritt 2 entwickelt und umgesetzt. Dazu wird zunächst eine Vorbohrung durch Perkussionsbohren mit Faserlaserstrahlung eingebracht. In einem zweiten Prozessschritt wird die teilweise rissbehaftete Schmelzschicht mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung abgetragen. Somit sollen die Vorteile beider Bohrprozesse, große Produktivität sowie große metallurgische und geometrische Qualität, genutzt werden. Dieser Arbeitsschritt kann im Rahmen eines Verfahrensvergleichs mit der spanenden Bearbeitung wie z.B. dem Fräsen als „Schruppen“ und „Schlichten“ bezeichnet werden. Alternativ kann der erste Prozessschritt auch z.B. mittels funkenerosivem Bohren (EDM<sup>3</sup>) erfolgen. Die entwickelte Prozesskette zum hybriden Laserstrahl-Bohren ist somit modular.

Ziel von Schritt 3 ist, Bohrungen mit möglichst kleinen Defekten wie Schmelzschichten, Rissen oder Gefügeänderungen in möglichst kleiner Bearbeitungszeit zu erzielen.

---

<sup>3</sup> EDM steht für Electric Discharge Machining.

## 3 Stand der Forschung und Technik

### 3.1 Fertigung von Kühlluftbohrungen

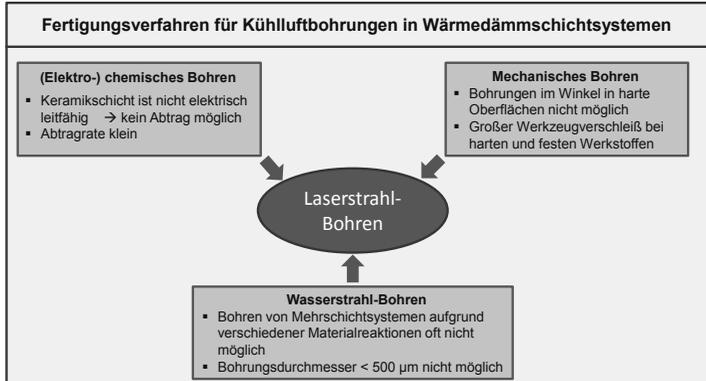
Turbinenschaufeln moderner Gasturbinen weisen Wärmedämmschichtsysteme auf, um im Heißgasstrom gegen hohe Temperaturen bis zu 1700 °C, Oxidation und Korrosion geschützt zu werden. Dies sind Mehrschichtsysteme bestehend aus einem Grundwerkstoff (z.B. Nickelbasis), einer MCrAlY<sup>4</sup> Haftvermittlerschicht und einer keramischen ZrO<sub>2</sub><sup>5</sup> Wärmedämmschicht. Zusätzlich ist eine Kühlung aufgrund der hohen Temperaturen erforderlich. Zum Einsatz kommt häufig die Filmkühlung, bei der ein Sekundärluftstrom durch Kühlluftbohrungen in der Schaufeloberfläche auf diese geleitet wird. Dabei wird die Temperatur der Turbinenschaufeln einerseits von innen durch den Sekundärluftstrom und andererseits von außen durch den auf der Schaufeloberfläche entstehenden Kühlfilm verkleinert. Ohne Kühlung wären plastische Verformungsvorgänge wie Kriechen nicht zu vermeiden. [CBL98]; [WH96]; [Sau05]

In stationären Gasturbinen werden einige 10.000 Kühlluftbohrungen je Turbine mit Durchmessern von 500 – 1000 µm in Werkstoffdicken von 5 bis 20 mm eingebracht [Lec03]; [Brä04]. Bei Flugtriebwerken werden je Flugtriebwerk ca. 100.000 Kühlluftbohrungen mit Durchmessern von 300 – 500 µm in Werkstoffdicken von 1 - 3 mm gefertigt [FNW03]; [CSS02]; [NL00]; [FHP98]. Diese Kühlluftbohrungen können mittels mechanischem Bohren, (elektro)-chemischem Bohren, Wasserstrahl-Bohren oder Laserstrahl-Bohren in Turbinenschaufeln eingebracht werden. Aufgrund der in Bild 3 dargestellten Kriterien ist der thermische Abtrag mittels Laserstrahl-Bohren bei der Herstellung von Kühlluftbohrungen in Wärmedämmschichtsystemen oft das einzig geeignete Fertigungsverfahren. [HW93]; [HL93]; [FNW03]; [BMA02]; [Phi03]

<sup>4</sup> „M“ steht für den metallischen Basiswerkstoff Nickel oder Kobalt bzw. eine Legierung hieraus. Weitere Legierungselemente sind Chrom, Aluminium und Ytterbium. [Lug06]

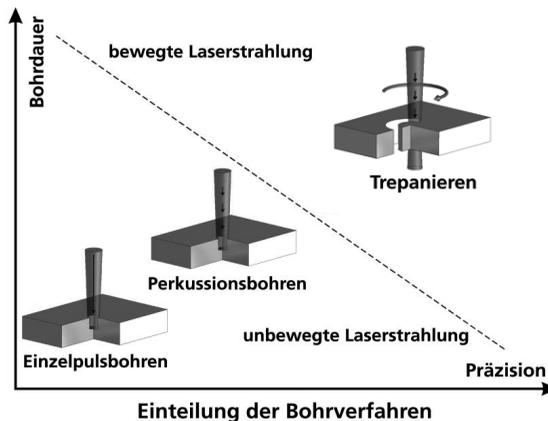
<sup>5</sup> ZrO<sub>2</sub> steht für Zirkonoxid

Bild 3: Kriterien für den Einsatz von Laserstrahl-Bohren bei der Herstellung von Kühlluftbohrungen in Wärmedämmschichtsystemen



In der industriellen Fertigung wird zur Herstellung von Kühlluftbohrungen überwiegend langgepulste Festkörperlaserstrahlung verwendet [FNW03]. Aus den langen Pulsdauern ( $\mu\text{s}$  bis  $\text{ms}$ ) resultiert ein schmelzdominierter Bohrprozess, der durch drei Bohrverfahren realisiert werden kann. Dies sind das Einzelpuls- und Perkussionsbohren mit unbewegter Laserstrahlung sowie das Trepanieren, bei dem eine Relativbewegung zwischen Laserstrahlung und Werkstück erfolgt [Pop05]. In Bild 4 sind die Bohrverfahren qualitativ bzgl. Bohrdauer und erreichbarer Präzision schematisch dargestellt.

Bild 4: Einteilung der Bohrverfahren beim schmelzdominierten Bohrprozess nach erforderlicher Bohrdauer und erzielbarer Präzision [Pop05]



### 3.2 Lebensdauerbeeinflussende Defekte von Kühlluftbohrungen

Das mechanische Verhalten laserstrahlgebohrter Komponenten, bestehend aus Mehrschichtsystemen, wird durch drei Einflüsse negativ beeinträchtigt:

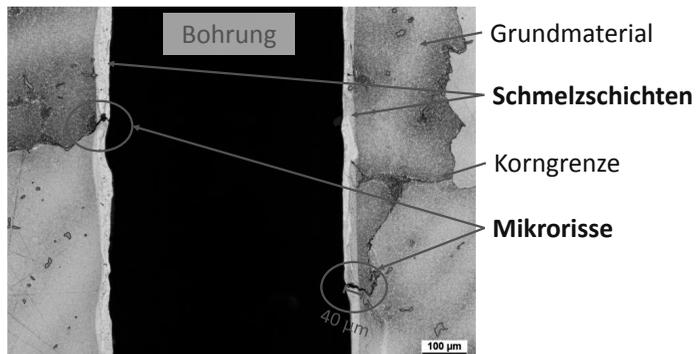
#### 1. Geometrische Kerbwirkung

Durch die Spannungsüberhöhung im Kerbgrund wird in der Regel eine Abnahme der Ermüdungsfestigkeit im Bereich großer Lastspielzahlen (High-Cycle-Fatigue – HCF) hervorgerufen. Bei hinreichend duktilen Werkstoffen kann eine tendenzielle Zunahme der Lebensdauer bei großen Beanspruchungen im Low-Cycle-Fatigue (LCF) Bereich durch Fließbehinderung aufgrund des mehrachsigen Spannungszustandes in Kerbnähe auftreten. [RWT03] Die geometrische Kerbwirkung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

#### 2. Rissbehaftete Schmelzsichten

Für die Fertigung von Kühlluftbohrungen wird heute überwiegend Laserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich von einigen 100  $\mu\text{s}$  bis zu wenigen ms verwendet. Bei diesem schmelzdominierten Bohrprozess werden Intensitäten bis zu einigen  $10^8 \text{ W/cm}^2$  sowie Pulsenergien bis zu 80 J verwendet. Dies führt zu Schmelzsichten mit Dicken bis zu 100  $\mu\text{m}$  an den Bohrungswänden. Innerhalb der Schmelzsichten können Mikrorisse vor allem an Korngrenzen des Grundmaterials auftreten (Bild 5). Diese Mikrorisse können während des Betriebs und der damit einhergehenden dynamischen Belastung der gebohrten Komponenten zu Makrorissen wachsen. Dies führt zu einer kleineren Ermüdungsfestigkeit und somit zu einer kleineren Lebensdauer der Bauteile. [CSS02]; [LBM05]; [SLS06]

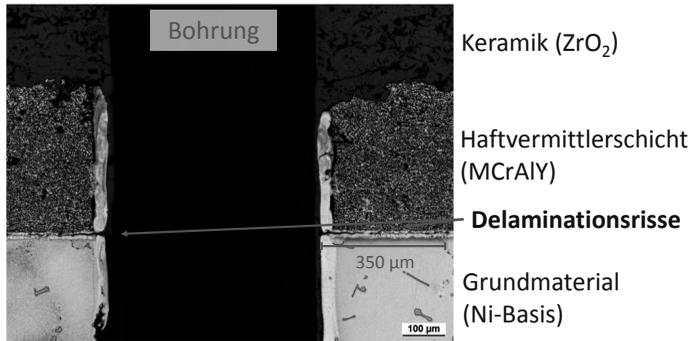
Bild 5: Geätzter Längsschliff einer Bohrung in Ni-Basis Grundmaterial mit markierten Schmelzsichten und Mikrorissen, die an Korngrenzen des Grundmaterials auftreten



### 3. Delaminationsrisse

Beim Laserstrahl-Bohren von Mehrschichtsystemen, bestehend aus Grundmaterial, Haftvermittlerschicht sowie keramischer Schutzschicht, können Delaminationsrisse zwischen den Schichten auftreten (Bild 6). Diese Schichtsysteme werden auch als Wärmedämmschichtsysteme bezeichnet.

Bild 6: Geätzter Längsschliff des Schichtsystems bestehend aus Ni-Basis Grundmaterial, MCrAlY Haftvermittlerschicht und  $ZrO_2$  Wärmedämmschicht einer Bohrung mit markierten Delaminationsrissen zwischen den Schichten



In mehreren Arbeiten [KBP02]; [CSS02]; [SLS06] wird gezeigt, dass in plasmagespritzten Wärmedämmschichtsystemen bei Bohrungen im Winkel zur Oberfläche thermisch induzierte Delaminationen bis zu 2 mm Länge zwischen Haftvermittlerschicht und Grundwerkstoff auftreten. Die Ablösungen zwischen Wärmedämmschicht und Haftvermittlerschicht sind etwas kürzer.

In [VC04] wird die Auswirkung des Laserstrahl-Bohrens auf das Ausbreitungsverhalten von Delaminationsrissen in Wärmedämmschichtsystemen bei quasistatischen mechanischen Beanspruchungen untersucht. Dabei wird gezeigt, dass durch Eindringen erstarrter Schmelze der oberen Schichten in die delaminierten Bereiche zwischen Haftvermittlerschicht und keramischer Schutzschicht bzw. Grundwerkstoff der Risswiderstand trotz lokaler Delaminationen am Bohrungsrand tendenziell sogar vergrößert wird.

Das Laserstrahl-Bohren von mittels EB-PVD<sup>6</sup> hergestellten Schichten auf Ni-Basis-Grundmaterial wurde im SFB 561 untersucht. Hier zeigten [RWT03], dass diese Schichten mit  $\mu s$  gepulster Laserstrahlung im  $90^\circ$  Winkel zur Werkstückoberfläche ohne signifikante Delamination trepaniergebohrt werden können. Bei Bohrungen mit Winkeln von z.B.  $30^\circ$  zur

<sup>6</sup> EB-PVD: Elektronenstrahl aufgedampfte Schichten (Electron beam physical vapor deposition)

Bauteiloberfläche entsteht jedoch Rissbildung ausgehend von den durch die Bohrung hinterschnittenen Bereichen des Schichtsystems.

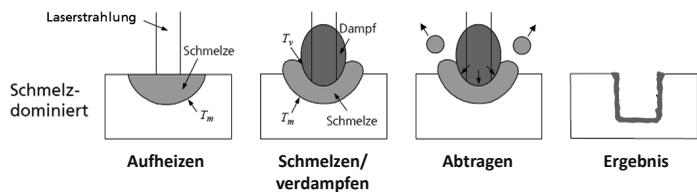
### 3.3 Bohren mit Faserlaserstrahlung

#### 3.3.1 Grundlagen

Bei hinreichend dicken Metallproben wird die auf die Metallprobe treffende Laserstrahlung bis auf den reflektierten Anteil komplett absorbiert. Die Absorption der Laserstrahlung erfolgt in Metallen von den freien Elektronen nach dem Prinzip der inversen Bremsstrahlung. Durch Elektron-Elektron-Stöße thermalisiert das Elektronensystem innerhalb einiger 100 fs. Die Elektronen transferieren die Energie durch Elektron-Phonon-Wechselwirkung an das Metallgitter. Die Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit  $\tau_{ep}$  liegt dabei in der Größenordnung von einigen Pikosekunden [HR96]. Die Folge des Energieübertrags an das Metallgitter kann ein Materialabtrag sein, der unter anderem zum Bohren verwendet werden kann. Der Abtragprozess ist dabei abhängig von der Pulsdauer der verwendeten Laserstrahlung. [Pop05]

Von gepulsten Faserlaserstrahlquellen wird Laserstrahlung mit Intensitäten von bis zu einigen  $10^8 \text{ W/cm}^2$  und einer Pulsdauer im Bereich von wenigen 100  $\mu\text{s}$  bis einigen ms emittiert. In diesem Pulsdauer- und Intensitätsbereich ist der Abtragprozess schmelzdominiert (Bild 7).

Bild 7: Schematische Darstellung der Prozessschritte beim schmelzdominierten Abtrag [Pop05]



Die Laserpulsdauer  $\tau_L$  ist einige Größenordnungen größer als die Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit  $\tau_{ep} \ll \tau_L$ , so dass der Energieübertrag von den Elektronen auf das Metallgitter während des Laserpulses stattfindet. Das Material wird aufgeschmolzen und teilweise verdampft. Durch den Rückstoß beim Verdampfungsprozess wird die flüssige Schmelze vergleichbar wie in einem Kolben an den Bohrungswänden Richtung Bohrungseintritt ausgetrieben [All76]. Bohrungswände mit einer Schmelzschicht sind die Folge [CSS02]; [SLS06].

Durch Wärmeleitung wird das umgebende Probenvolumen thermisch beeinflusst. Bei einem schmelzdominierten Abtrag ist die thermische Eindringtiefe

3.1  
[Pop11]

$$\delta_{th} = \sqrt{4\kappa\tau_L}$$

ein Maß für die thermische Beeinflussung innerhalb des Materials. Dabei ist  $\kappa$  die materialspezifische Temperaturleitfähigkeit und  $\tau_L$  die Laserpulsdauer. [Pop11] Für Edelstahl als Probenmaterial mit einer Temperaturleitfähigkeit  $\kappa = 0,04 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  [Bäu11] und einer Pulsdauer von 0,5 ms ergibt sich eine thermische Eindringtiefe von  $\delta_{th} \approx 89 \mu\text{m}$ .

Bei den Bohrungen, die in Schritt 1 dieser Arbeit mit gepulster Faserlaserstrahlung erzielt werden, sind daher Schmelzschichten an der Bohrungswand mit einer Dicke von ca. 90  $\mu\text{m}$  zu erwarten. Die Produktivität ist aufgrund des schmelzdominierten Abtrags mit einer Volumenabtragräte bis zu 2  $\text{mm}^3/\text{s}$  groß.

### 3.3.2 Faserlaserstrahlquellen

Seit 2011 sind gepulste Faserlaserstrahlquellen mit Pulsspitzenleistungen  $\geq 6 \text{ kW}$  und Pulsdauern im Bereich von 100  $\mu\text{s}$  bis zu ca. 10 ms verfügbar. Im Vergleich zu blitzlampen-gepumpten Strahlquellen ist aufgrund einer größeren Strahlqualität sowie Laserpuls-zu-Laserpuls-Stabilität die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen größer [Uch11]. Weiterhin bestehen wirtschaftliche Vorteile, da der elektrische Gesamtwirkungsgrad mit 28 % um einen Faktor 14 größer ist und die Anschaffungskosten um einen Faktor von ca. 2 kleiner sind. Der erforderliche Wartungs- und Justageaufwand ist, bedingt durch die Strahlführung mittels flexibler Glasfasern, kleiner. [Zin08]

Der prinzipielle Aufbau eines Faserlasers ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Durch mehrere Laserdioden wird Multimode-Pumpstrahlung erzeugt. Diese wird über Pumpkoppler einer Doppelkernfaser mit großer Länge zugeführt. An den Enden der aktiven Faser sind Faser-Bragg-Gitter (FBG) mittels Ultraviolettstrahlung eingeschrieben. Faser-Bragg-Gitter wirken als optische Interferenzfilter. Der Vorteil dieser Gitter ist, dass keine zusätzlichen Koppelverluste entstehen und nur die gewünschten Wellenlängen reflektiert werden. Der Auskoppelgrad bei diesen Resonatoren ist groß, so dass der Einschwingvorgang des Systems klein ist. Dies führt zu einer großen Laserpuls-zu-Laserpuls-Stabilität. Hinter dem Resonator wird die Laserstrahlung durch eine passive Glasfaser zur Bearbeitungsoptik geführt. [Zel06]; [Zin08] Aufgrund der genannten Vorteile im Vergleich zu blitzlampen-gepumpter Laserstrahlung wird für Schritt 1 dieser Arbeit Faserlaserstrahlung zum Perkussionsbohren verwendet.

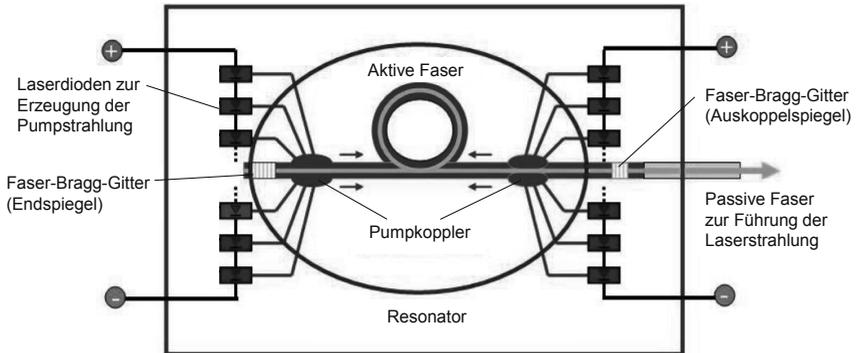


Bild 8: Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers [GW09]

### 3.3.3 Materialbearbeitung mit Faserlaserstrahlung

Die grundsätzliche Machbarkeit des Bohrens mit gepulster Faserlaserstrahlung wird im Rahmen der Dissertation von Dietrich untersucht. Als Bohrungsgeometrie werden Entlüftungsbohrungen in 5 mm dicken Edelstahlproben mit einem Durchmesser von ca. 120  $\mu\text{m}$  gewählt. Dabei werden Vorteile gegenüber der Verwendung von blitzlampen-gepumpter Festkörperlaserstrahlung bezüglich ca. 38 % kleinerer Durchmessertoleranzen und somit einer größeren Reproduzierbarkeit ermittelt. [Die12] Eine Anpassung der zeitlichen Intensitätsverteilung während des Bohrprozesses wird mit blitzlampen-gepumpter Festkörperlaserstrahlung von [LLB01]; [LL02b]; [LL02a]; [LLC99] und mit Faserlaserstrahlung teilweise von [Die12] untersucht. Dies führt zu kleineren Bohrungseintritten sowie einer Verkleinerung der Ablagerungsschicht ausgetretener Schmelze auf der Werkstückoberfläche.

Seit wenigen Jahren werden blitzlampen-gepumpte Laserstrahlquellen in der industriellen Fertigung durch Faserlaserstrahlquellen substituiert. Eine Substituierung von blitzlampen-gepumpten Laserstrahlquellen durch Faserlaserstrahlquellen ist ohne Anpassung der Strahlführung und -formung nicht möglich. Bei blitzlampen-gepumpten Laserstrahlquellen ist die Größe des Fokusedurchmessers und somit des Bohrungsdurchmessers von der Pulsspitzenleistung bzw. der Pulsenergie abhängig. Die Strahlqualität nimmt nahezu proportional zur Vergrößerung der Pulsenergie ab. Dies resultiert aufgrund kleinerer Fokussierbarkeit in einem größeren Fokusedurchmesser. Bei Faserlaserstrahlquellen hingegen ist der Fokusedurchmesser unabhängig von der Pulsenergie. Um größere Bohrungsdurchmesser fertigen zu können, muss

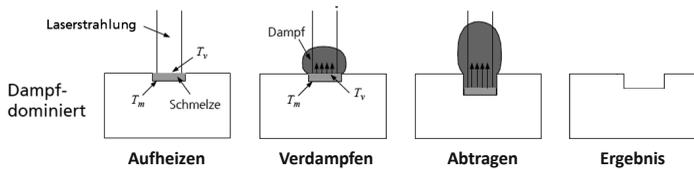
die Strahlführung und -formung angepasst werden mit dem Ziel, einen geeigneten Fokusdurchmesser zu erreichen.

### 3.4 Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung

#### 3.4.1 Grundlagen

Der Abtragprozess ist bei Verwendung von ultrakurzgepulster Laserstrahlung dampfdominiert (Bild 9). Durch einen dampfdominierten Abtrag ist die Herstellung von Bohrungen mit minimaler thermischer Beeinflussung der Bohrungswände möglich. [Pop05]; [Dau04]; [Ruf04]

Bild 9: Schematische Darstellung der Prozessschritte beim dampfdominierten Abtrag [Pop05]



Bei Laserstrahlung mit einer Pulsdauer in der Größenordnung der Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit ( $\tau_L \leq \tau_{ep}$ ) wird das Material größtenteils sublimiert, sobald die von den Elektronen absorbierte Energie an das Gitter übertragen wird. Für die Wärmebeeinflussung ist dabei die thermische Eindringtiefe vernachlässigbar klein. Für Edelstahl als Probenmaterial mit einer Temperaturleitfähigkeit  $\kappa = 0,04 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  [Bäu11] und einer Pulsdauer von 5 ps ergibt sich eine thermische Eindringtiefe von  $\delta_{th} \approx 9 \text{ nm}$  (Formel 3.1). Bei den Bohrungen, die in Schritt 2 dieser Arbeit mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung erzielt werden, sind daher keine Schmelzschichten an der Bohrungswand zu erwarten. Die Produktivität ist aufgrund des dampfdominierten Abtrags mit kleiner Volumenabtragrate von ca. 0,02 mm<sup>3</sup>/s klein.

Bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung ist im Vergleich zu langgepulster Laserstrahlung ( $\mu\text{s}$  bis  $\text{ms}$ ) eine Abhängigkeit von Abtragschwelle und Intensität nicht gegeben. Die Intensität hängt von der Pulsspitzenleistung und somit reziprok von der Pulsdauer ab. Eine Vergrößerung der Pulsdauer von 400 fs auf 4 ps (Faktor 10) hat jedoch keinen Einfluss auf die Abtragschwelle. Daher ist die Angabe einer Energiedichte, der Laserfluenz

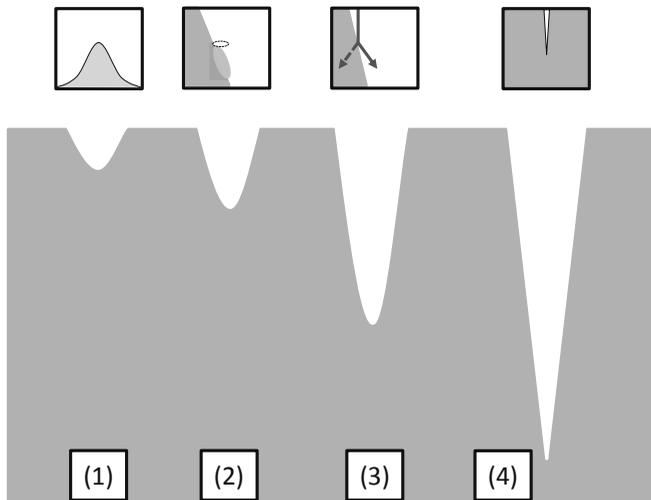
3.2  
[Rüd08]

$$\text{Laserfluenz} = \frac{2E_p}{\pi r^2}$$

geeignet. Dabei ist  $E_p$  die Pulsenergie und  $\pi r^2$  die effektive Fokusfläche. [Rüd08]

In Bild 10 sind die einzelnen Schritte des Bohrprozesses mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung schematisch dargestellt. Zu Beginn des Bohrprozesses wird eine Geometrie ähnlich des Strahlprofils abgetragen (1). Auf den Bohrungswänden wird die Laserstrahlung auf eine größere Bohrungswandfläche projiziert, wodurch die Laserfluenz verkleinert wird (2). Bei tieferen Bohrungen wird der Einfluss von Reflexionen vergrößert (3), bis schließlich die Laserfluenz kleiner als die Abtragschwellfluenz wird (4). Die Bohrungen haben die maximale Bohrungstiefe erreicht. [Fai12]

Bild 10:  
Schematische Darstellung des Bohrfortschritts:  
(1) Abtrag ähnlich der Geometrie des Strahlprofils;  
(2) Verkleinerung der Laserfluenz auf den schrägen Bohrungswänden;  
(3) Brechung oder Reflexion an den Bohrungswänden;  
(4) Laserfluenz wird kleiner als die Abtragschwellfluenz [Fai12]



Die Verdampfungsenthalpie bei Metallen ist etwa das Zwanzigfache der Schmelzenthalpie [Bäu1]. Hierdurch verkleinern sich die mit ultrakurzen Laserpulsen durchbohrbaren Probendicken im Vergleich zur Bearbeitung mit längeren Laserpulsen. Zudem vergrößert sich die Bohrdauer beim Bohrprozess mit ultrakurzen Laserpulsen.

Untersuchungen bezüglich der Bohrungsqualität in Abhängigkeit von der verwendeten Pulsdauer ergeben, dass die größte Bohrungsqualität bezüglich Bohrungsgeometrie und minimaler thermischer Beeinflussung bei einer Pulsdauer im Bereich von 5 - 10 ps erzielt wird. Bei einer kürzeren Pulsdauer verkleinert sich die Qualität der Bohrungsgeometrie aufgrund von Streueffekten, bei einer längeren Pulsdauer wird der Abtragprozess zunehmend schmelzdominiert. [Dau02]

Bei Bohrungen mit Aspektverhältnissen (Bohrungslänge geteilt durch Bohrungsdurchmesser) größer als ca. fünf wird die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und ablatiertem Material relevant. Mögliche Folgen dieser Wechselwirkung sind Abschirmeffekte und Plasmabildung. Durch die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Plasma können Schockwellen entstehen, die einen Einfluss auf den Bearbeitungsprozess haben [Kro65]; [ZR02]; [BKS72]; [PBB73]; [HJ76]; [HTS76]; [PRW78]; [Pes81]; [MYK84]; [TH86]; [Yil86]; [All76]. Für Repetitionsraten größer einigen kHz treten Abschirmeffekte aufgrund des herausströmenden Materials auf, wodurch die Effizienz reduziert wird. Ab Repetitionsraten von einigen 100 kHz werden Vorheizeffekte aufgrund von Wärmeakkumulation größer als die Abschirmeffekte, so dass tiefere Bohrungen möglich sind. [DUH13]

Ähnliche Zusammenhänge ergeben sich für die Anzahl der Laserpulse, die für das Durchbohren einer Metallprobe erforderlich ist. Bei Repetitionsraten von einigen 100 kHz ist aufgrund von Abschirmeffekten ein Maximum der benötigten Pulsanzahl zu beobachten. Für größere Repetitionsraten verkleinert sich die benötigte Pulsanzahl aufgrund einer zunehmenden Wärmeakkumulation. [ARR08]

## Wärmeakkumulation

Im Folgenden wird die Wärmeakkumulation abgeschätzt. Hierbei wird die Laserpuls-zu-Laserpuls-Wärmeakkumulation betrachtet. Die Scan-to-Scan-Wärmeakkumulation<sup>7</sup> wird vernachlässigt, da eine analytische oder numerische Berechnung nicht bekannt ist. Eine analytische Betrachtung dieser Vorheizeffekte liefert eine genäherte Gleichung für den Temperaturanstieg  $\Delta T(t)$  an der Materialoberfläche zum Zeitpunkt  $t$  nach einem Laserpuls [Bäu11],[ARR08]:

---

<sup>7</sup> Die Scan-to-Scan-Wärmeakkumulation ist die Beeinflussung der Temperatur in der Bohrung durch Wiederholung der Scanbewegung wie z.B. Kreise oder Spiralen an der gleichen Position.

**3.3**  
[Bäu11];  
[ARR08]

$$\Delta T(t) = \frac{I_a w_0^2 \tau_L}{4\sqrt{\pi} \lambda t \sqrt{\kappa t}} = \frac{\tau_L A E_P}{4\pi^{\frac{3}{2}} \lambda t^2 \sqrt{\kappa t}}$$

- $I_a = \frac{A E_P}{t w_0^2 \pi}$  absorbierte Laserintensität
- $w_0$  Fokusradius
- $\tau_L$  Pulsdauer
- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit
- $\kappa$  Temperaturleitfähigkeit
- $A$  Absorptionsgrad
- $E_P$  Pulsenergie

Im Pulsbetrieb wird das Probenmaterial im zeitlichen Abstand von  $t = \frac{1}{f_{\text{rep}}}$  mit Laserstrahlung bestrahlt, wobei  $f_{\text{rep}}$  die Repetitionsrate der Laserstrahlquelle ist. Somit wird in dieser genäherten analytischen Betrachtung das Probenmaterial mit jedem Laserpuls um die Temperaturdifferenz  $\Delta T \left( t = \frac{1}{f_{\text{rep}}} \right)$  erwärmt. Sobald die Materialtemperatur die Schmelztemperatur  $T_M$  erreicht, treten zunehmend schmelzbasierte Abtragprozesse auf. Dadurch vergrößert sich die Abtragrata aufgrund der kleineren Schmelzenthalpie im Vergleich zur Verdampfungsenthalpie. Zudem vergrößert sich wiederum die thermische Beeinflussung des Materials, wodurch eine Vergrößerung der Schmelzschichten an den Bohrungswänden erwartet wird. Somit sollte bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung das Erreichen der Schmelztemperatur  $T_M$  vermieden werden. Ohne Verfahrensbewegung des Laserfokus auf der Probenoberfläche kann die Anzahl der Laserpulse bis zum Erreichen der Schmelztemperatur  $NP_{\text{Schmelz}}$  mittels Formel **3.4** berechnet werden, wobei  $T_0$  die Umgebungstemperatur<sup>8</sup> ist.

**3.4**

$$NP_{\text{Schmelz}} = \frac{T_M - T_0}{\Delta T \left( t = \frac{1}{f_{\text{rep}}} \right)} = \frac{4\pi^{\frac{3}{2}} \lambda \sqrt{\kappa} (T_M - T_0)}{\tau_L A E_P} \cdot f_{\text{rep}}^{\frac{5}{2}}$$

Bei einer Verfahrensbewegung des Laserfokus auf der Probenoberfläche mittels einer Scanner-Optik kann die Anzahl der Pulse, die aufgrund des Pulsüberlapps auf dieselbe Probenstelle trifft, mithilfe der Formel

<sup>8</sup> Bei einer Betrachtung inklusive der Scan-to-Scan-Wärmeakkumulation vergrößert sich die Temperatur  $T_0$  bei jeder Scan-Abfahrt. Dadurch verkleinert sich mit steigender Bohrdauer die Temperaturdifferenz  $T_M - T_0$ , wodurch die Anzahl der Laserpulse  $NP_{\text{Schmelz}}$  verkleinert wird.

3.5  
[Wei05]

$$NP_{\text{Pulsüberlapp}} = \frac{2W_0 f_{\text{rep}}}{v_{\text{Scanner}}}$$

und der Verfahrensgeschwindigkeit  $v_{\text{Scanner}}$  berechnet werden. Gleichsetzen der Formeln **3.4** und **3.5** und Umformen nach der Repetitionsrate liefern eine Abschätzung der Repetitionsrate, ab der die thermische Beeinflussung aufgrund eines Aufschmelzens des Probenmaterials relevant wird:

3.6

$$f_{\text{rep}} = \left( \frac{4\pi^{\frac{3}{2}} \lambda \sqrt{\kappa} (T_M - T_0) v_{\text{Scanner}}}{\tau_L A E_P 2W_0} \right)^{\frac{2}{7}}$$

Diese theoretische Grenzrepetitionsrate wird im Rahmen der Verfahrensentwicklung (Seite 66) mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

### 3.4.2 Ultrakurzgepulste Laserstrahlquellen

Bereits drei Jahre nach der ersten Realisierung eines Lasersystems 1960 durch Theodore H. Maiman wurde das Prinzip der Modenkopplung entwickelt, mit dem ultrakurze Laserpulse erzeugt werden können. Bei der Modenkopplung werden longitudinale Lasermoden in Phase gekoppelt, wodurch eine konstruktive Überlagerung der longitudinalen Lasermoden realisiert wird. Die Pulsdauer ergibt sich dabei als Fouriertransformierte der Bandbreite des Emissionsspektrums des aktiven Lasermediums  $\Delta\nu$ . Die erzielbare Pulsdauer  $\tau_L$  ist mit der Bandbreite des Emissionsspektrums  $\Delta\nu$  des aktiven Lasermediums über das Pulsdauer-Bandbreite-Produkt

3.7  
[DR06]

$$\tau_L \cdot \Delta\nu \geq c_B$$

verknüpft, wobei  $c_B$  eine von der spektralen Intensitätsverteilung abhängige Konstante ist. Für eine gaußförmige spektrale Intensitätsverteilung ist  $c_B = 0,441$ . [DR06]

Von ultrakurzgepulsten Laserstrahlquellen werden Laserpulse mit einer Pulsdauer kürzer als 10 ps emittiert, so dass als aktives Lasermedium Materialien mit Bandbreiten des Emissionsspektrums im nm-Bereich verwendet werden. Die Laserstrahlung ist somit nicht monochromatisch, wodurch bei Reflexion und Brechung ein dispersives Verhalten auftritt. Als

aktives Lasermedium werden zum Beispiel Ti:Saphir, Yb:YAG oder Nd:YVO4 verwendet.

Von den ersten ultrakurzgepulsten Laserstrahlquellen konnten aufgrund der kurzen Pulsdauer im Bereich von einigen 100 fs nur Laserpulse mit kleinen Pulsenergien erzeugt werden. Die Folge waren ultrakurzgepulste Laserstrahlquellen mit kleinen mittleren Leistungen von einigen 100 mW. Zur Vergrößerung der mittleren Leistung wird seit einigen Jahrzehnten das MOPA-Prinzip (Master Oscillator Power Amplifier) verwendet. Dabei ist der eine Teil der Laserstrahlquelle ein Master Oscillator, in dem die Laserpulse mit erforderlicher Strahlqualität ( $M^2 < 1,1$ ) und Pulsdauer (z.B. 500 fs) erzeugt werden. Im anschließenden Power Amplifier werden diese leistungsschwachen Laserpulse von wenigen mW verstärkt, wodurch ultrakurze Laserpulse mit großer Strahlqualität ( $M^2 < 1,1$ ) und mittleren Leistungen von mehreren W erzeugt werden. [KKW04]; [MGP04]

Zur Verstärkung der Laserpulse ist vor allem die CPA-Technologie (Chirped Pulse Amplification) etabliert. Bei dieser Technologie wird der Laserpuls vor dem Verstärken mithilfe des dispersiven Verhaltens der Laserstrahlung an einem Gitter zeitlich aufgeweitet, wodurch Schäden des Verstärkermediums aufgrund der großen Intensitäten bei ultrakurzen Pulsen vermieden werden. Nach dem Verstärken wird der Laserpuls wieder zeitlich komprimiert, wodurch ein ultrakurzer Laserpuls mit großer Pulsenergie resultiert. Mit dieser CPA-Technologie sind heute Laserstrahlquellen mit einer mittleren Leistung von einigen 10 W verfügbar. [KRS05]; [IFN98]

Eine alternative Verstärkermethode ist die InnoSlab-Technologie. Dabei wird die Laserstrahlung räumlich aufgeweitet statt zeitlich gestreckt und nach dem Verstärken wieder gebündelt. Auf diese Weise sind mittlere Leistungen von einigen hundert Watt realisierbar. [SRW11]; [RMR09] In dieser Arbeit wird eine ultrakurzgepulste Laserstrahlquelle mit der InnoSlab-Technologie mit mittlerer Leistung bis zu 400 W verwendet.

### 3.4.3 Materialbearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung

Aufgrund der bisher kleinen mittleren Leistungen von wenigen Watt der ultrakurzgepulsten Laserstrahlquellen wird ultrakurzgepulste Laserstrahlung vor allem bei Anwendungen eingesetzt, bei denen kleine Materialvolumina von wenigen  $\mu\text{m}^3$  bearbeitet werden sollen. Dies ist hauptsächlich in der Mikromaterialbearbeitung der Fall, in der ein präziser Materialabtrag mit minimaler thermischer Beeinflussung erforderlich ist. Thermisch beeinflusste Bereiche sind dabei teilweise in der Größenordnung weniger nm. Außerdem können durch die großen Pulsspitzenleistungen von mehreren GW nicht-lineare Effekte wie zum Beispiel die Multiphotonen-Absorption in Glas zur Materialbearbeitung verwendet werden.

Beispiele für solche Anwendungen sind der Abtrag und die Deposition von ultradünnen Graphit-Schichten [RWF12], der Abtrag dünner Schichten von Metallen [PGH08]; [WRF11], die Bearbeitung von dünnen Folien in der Photovoltaik [KLS13]; [LAB13], Mikrostrukturierungen in Glas mittels Selective Laser Etching [GHO12], die Reparatur und Herstellung von Masken in der Photolithographie [HHL98]; [Kor03], der Materialabtrag in Dieselsylindern in der Automobilindustrie [MPO5] oder die Materialbearbeitung von carbonfaserverstärktem Kunststoffen (CFK) für die Automobil- und Luftfahrtindustrie [WHM11]; [JFK15].

## 4 Verwendete Anlagen- und Systemtechnik sowie Analyseverfahren

### 4.1 Laserstrahlquellen, Strahlführung und -formung

#### 4.1.1 Faserlaserstrahlung

In Bild 11 ist der Versuchsaufbau zum Bohren mit Faserlaserstrahlung bestehend aus Laserstrahlquelle mit Strahlführungsfaser, Faserkoppler, Prozessfaser sowie Bearbeitungsoptik schematisch dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten beschrieben.

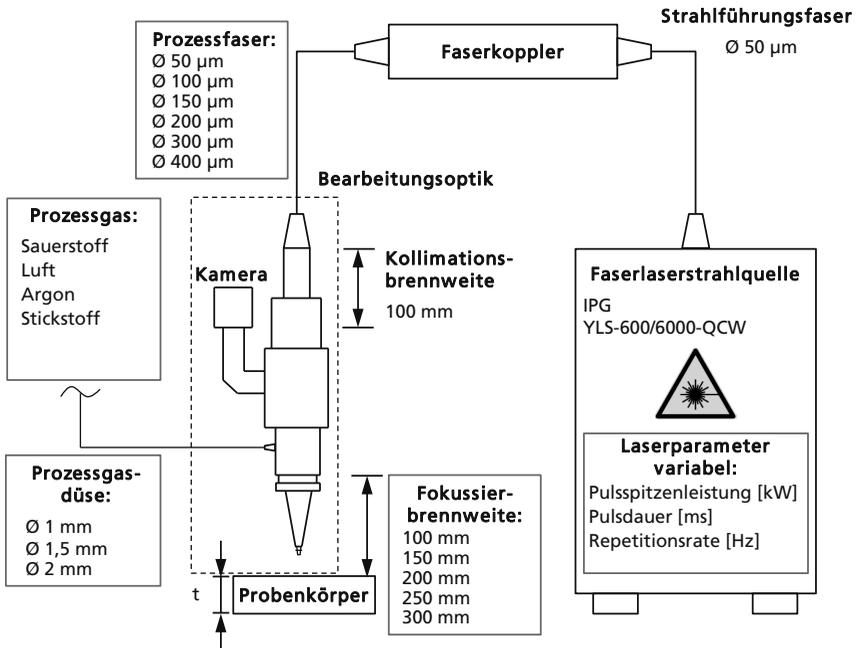


Bild 11: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Bohren mit Faserlaserstrahlung

## Laserstrahlquelle

Die Versuche mit Faserlaserstrahlung werden mit einer Laserstrahlquelle YLS-600/6000-QCW der Firma IPG Photonics durchgeführt. Die Spezifikationen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Strahlquelle wird im gepulsten Modus betrieben.

Tabelle 1:  
Spezifikationen der Faserlaserstrahlquelle IPG YLS-600/6000-QCW

Laserstrahlquelle	IPG YLS-600/6000-QCW
Emittierte Wellenlänge	1068 – 1072 nm
Pulsdauer	0,2 – 10 ms
Repetitionsrate	10 – 500 Hz
Max. Leistung im cw-Betrieb	600 W
Max. Pulsspitzenleistung	6000 W
Leistungsstabilität	± 1 %
Polarisation	statistisch
Kerndurchmesser Strahlführungsfaser	50 µm
Beugungsmaßzahl $M^2$	~ 6

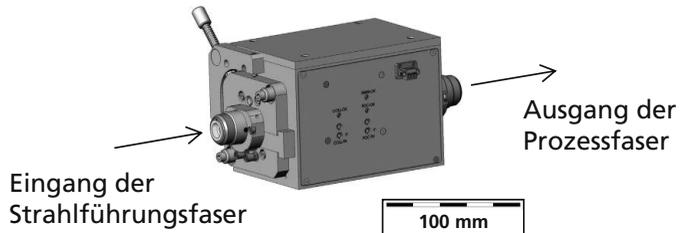
## Strahlführungs- und Prozessfasern

Zum Transport der Laserstrahlung werden flexible Glasfasern verwendet. Die fest mit der Strahlquelle verbundene Faser wird als Strahlführungsfaser bezeichnet. Mittels eines Faserkopplers kann die Laserstrahlung von der Strahlführungsfaser in Prozessfasern mit verschiedenen Kerndurchmessern eingekoppelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Fasern mit Kerndurchmessern von 50, 100, 150, 200, 300 und 400 µm der Firma IPG Photonics verwendet. Da die Strahlkaustik in Abhängigkeit von Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite variiert, sind entsprechende Messungen in Kap. 5.1.1 „Einfluss der Strahlführung und -formung“ dargestellt.

## Faserkoppler

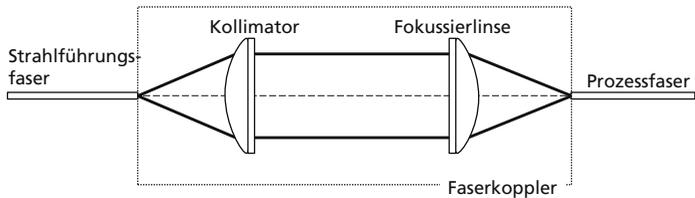
Zur Einkopplung der Laserstrahlung von Strahlführungs- in die Prozessfaser wird ein Faserkoppler „Fiber to Fiber Coupling Unit (FFC)“ der Firma Optoskand AB verwendet, Bild 12.

Bild 12:  
Schematische Darstellung des Faserkopplers [Opt12]



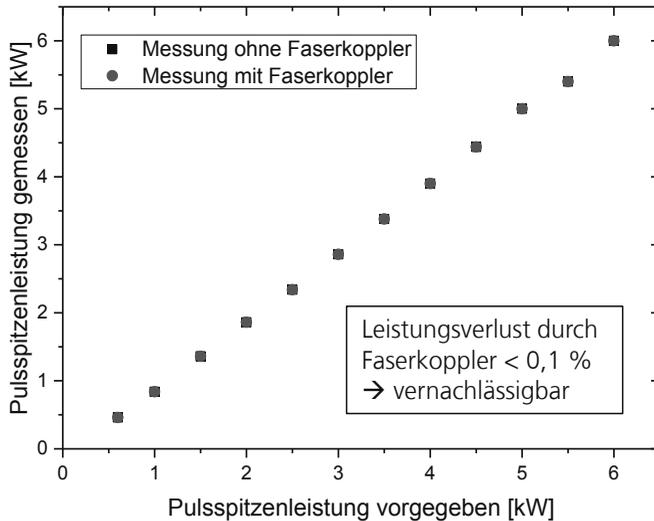
Die Laserstrahlung tritt im Faserkoppler aus der Strahlführungsfaser aus und wird kollimiert. Anschließend wird die Laserstrahlung fokussiert und in die Prozessfaser eingekoppelt, Bild 13.

Bild 13:  
Schematische Darstellung des optischen Aufbaus des Faserkopplers [Opt12]



Bei einer Eingangsleistung von 5 kW im Dauerstrichbetrieb darf der Verlust der Laserstrahlung laut Hersteller maximal 100 W betragen. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 98% [Opt12]. In Bild 14 sind Leistungsmessungen mit und ohne Faserkoppler für gepulste Faserlaserstrahlung mit einer Pulsspitzenleistung von 0,6 bis 6 kW dargestellt. Der Leistungsverlust bei Verwendung von Faserkoppler und Prozessfaser ist kleiner als 0,1 % und ist demnach vernachlässigbar.

Bild 14: Messung des Leistungsverlusts bei Verwendung von Faserkoppler und Prozessfaser

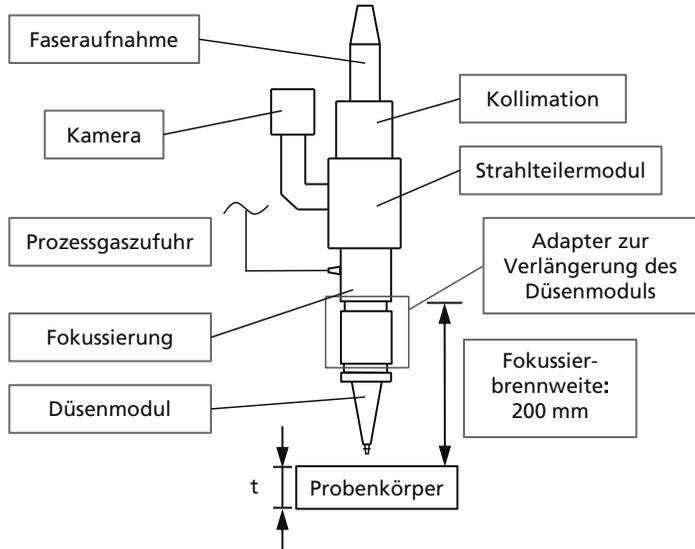


### Bearbeitungsoptiken

Für die Versuchsdurchführung werden zwei Bearbeitungsoptiken YR30 und YK52 der Firma Precitec verwendet. Diese bestehen jeweils aus Faseraufnahme, Kollimation, Strahlteilermodul zur Auskopplung der Prozessemissionen z.B. zur Prozessbeobachtung, Fokussierung und Düsenmodul, Bild 15. Die Kollimationsbrennweite beträgt jeweils 100 mm, so dass der kollimierte Strahldurchmesser ca. 12 mm groß ist. Diese Kollimationsbrennweite wird nicht variiert, da kollimierte Strahldurchmesser größer 15 mm größer als die Linsendurchmesser der Bearbeitungsoptiken sind und kleinere kollimierte Strahldurchmesser wie z.B. 5 mm zu Schädigungen an den optischen Elementen führen können.

Die Bearbeitungsoptik YR30 wird mit einer Fokussierbrennweite von 100 mm verwendet. In die Bearbeitungsoptik YK52 können Linsen mit Fokussierbrennweiten von 150 mm, 200 mm, 250 mm und 300 mm eingesetzt werden, um den Fokusedurchmesser zu variieren. Zusätzlich muss das Düsenmodul durch geeignete Adapter entsprechend der Fokussierbrennweite verlängert bzw. verkürzt werden, Bild 15. Am unteren Ende des Düsenmoduls ist eine Prozessgasdüse mit einem Durchmesser von 1,5 mm montiert.

Bild 15:  
Schematische Darstellung der Bearbeitungsoptik YK52



#### 4.1.2 Ultrakurzgepulste Laserstrahlung

In Bild 16 ist der Versuchsaufbau zum Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung bestehend aus Laserstrahlquelle, Umlenkspiegeln zur Strahlführung, Galvoscanner sowie Prozessgaszuführung dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten beschrieben.

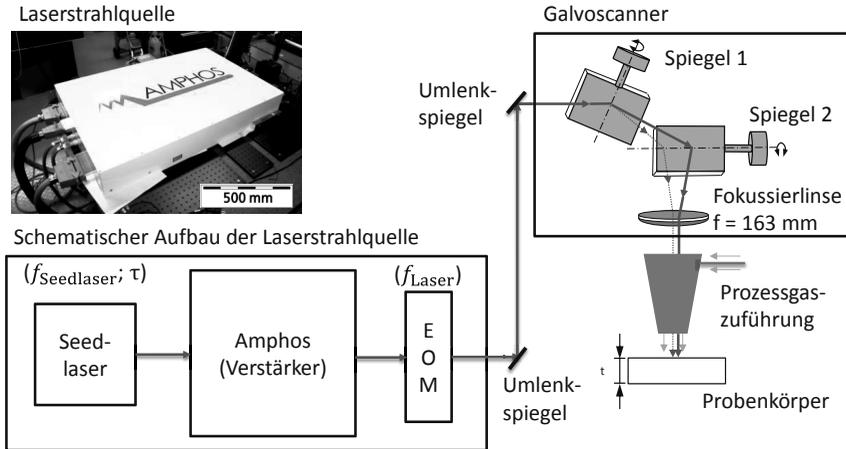


Bild 16: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung

## Laserstrahlquelle

Für die Versuche mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung wird eine Strahlquelle der Firma Amphos verwendet. Diese Strahlquelle besteht (vereinfacht) aus drei Elementen: einem Seedlaser, einem elektrooptischen Modulator (EOM) und einem Verstärker. Von dem Seedlaser, dem Master Oscillator, wird Laserstrahlung mit einer Pulsdauer im Bereich von 0,70 bis 7,65 ps und einer Repetitionsrate von 1,43 bis 56,8 MHz bei kleinen Pulsenergien von ca. 90 nJ emittiert. Die Wellenlänge der Laserstrahlung beträgt aufgrund der Verwendung von Ytterbium als aktivem Medium 1030 nm. Mittels des elektrisch optischen Modulators (EOM) kann die Repetitionsrate der aus dem Seedlaser emittierten Laserstrahlung durch Puls Picking reduziert werden, indem der EOM nur für einen Teil der im Seedlaser erzeugten Laserpulse transmissiv ist. Hierdurch reduziert sich die maximale mittlere Leistung der Laserstrahlung, nicht jedoch die maximalen Pulsenergien und Laserfluenzen. Zudem kann durch Schließen des EOM der Austritt von Laserstrahlung verhindert werden. Im anschließenden Power Amplifier, einem Innoslab-Verstärker, werden die Laserpulse verstärkt, wodurch für Repetitionsraten  $\geq 1,43 \text{ MHz}$  mittlere Leistungen bis zu 400 W und Pulsenergien bis zu 285  $\mu\text{J}$  erreicht werden können. Die Spezifikationen der Laserstrahlquelle sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2:  
Spezifikationen der  
Laserstrahlquelle  
AMPHOS 400

Laserstrahlquelle	AMPHOS 400
Emittierte Wellenlänge	1030 nm
Pulsdauer	0,69 - 7,65 ps
Repetitionsrate Seedlaser	1,43 MHz - 56,8 MHz
Repetitionsrate durch Puls Picking	100 kHz – 1000 kHz
Max. mittlere Leistung	400 W
Pulsenergie	≤ 285 μJ
Beugungsmaßzahl M <sup>2</sup>	≤ 1,7

Die an der Laserstrahlquelle eingestellte Repetitionsrate hat Einfluss auf die Pulsdauer  $\tau_p$ . Grund hierfür ist die Limitierung der maximalen Pulsspitzenleistung  $P_{\text{Spitze}}$  im Verstärkermedium, da bei zu großen Pulsspitzenleistungen von z.B. 50 MW das aktive Medium geschädigt werden kann. Die Pulsspitzenleistung ist bei einem gaußförmigen zeitlichen Intensitätsverlauf der Laserstrahlung über den Zusammenhang

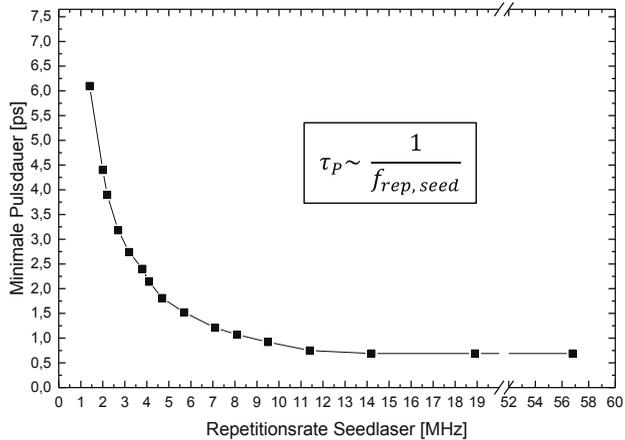
4.1  
[EE06]

$$P_{\text{Spitze}} \approx \frac{E_p}{\tau_p} = \frac{P_{\text{Mittel}}}{f_{\text{rep}} \cdot \tau_p}$$

abhängig von der Pulsenergie  $E_p$  und der Pulsdauer  $\tau_p$  bzw. von der mittleren Leistung  $P_{\text{Mittel}}$ , der Repetitionsrate  $f_{\text{rep}}$  und der Pulsdauer  $\tau_p$ .

Bei maximaler mittlerer Leistung von 400 W muss das Produkt aus Repetitionsrate  $f_{\text{rep}}$  und der Pulsdauer  $\tau_p$  also konstant sein, um die maximale Pulsspitzenleistung nicht zu überschreiten. In Bild 17 ist die minimale Pulsdauer über die eingestellte Repetitionsrate des Seedlasers aufgetragen und die erwartete Abhängigkeit  $\tau_p \sim \frac{1}{f_{\text{rep, seed}}}$  ersichtlich.

Bild 17: Minimale Pulsdauer in Abhängigkeit der eingestellten Repetitionsrate des Seedlasers



### Strahlführung und -formung

Ultrakurzgepulste Laserstrahlung kann nicht mittels Glasfasern transportiert werden, da diese aufgrund der großen Pulsspitzenleistung von mehreren 10 MW zerstört würden. Daher wird die Strahlung mittels wellenlängenspezifisch beschichteten Spiegeln zur Bearbeitungsoptik umgelenkt.

Als Bearbeitungsoptik wird ein Galvo-Scanner der Firma Aerotech verwendet. Ein Galvo-Scanner besteht aus zwei drehbaren Spiegeln. Durch elektrische Ansteuerung werden diese Spiegel so ausgerichtet, dass Verfahrbewegungen der Laserstrahlung wie Kreise oder Spiralen auf der Probenoberfläche realisiert werden können. Die Brennweite der fokussierenden Linse des Galvo-Scanners beträgt 163 mm. Das Strahlprofil besteht im Fokus vor allem aus einem Haupt- und einem funktionsbedingten Nebenmaximum (Bild 18). Der Fokusbereich des Hauptmaximums beträgt ca. 75  $\mu\text{m}$ .

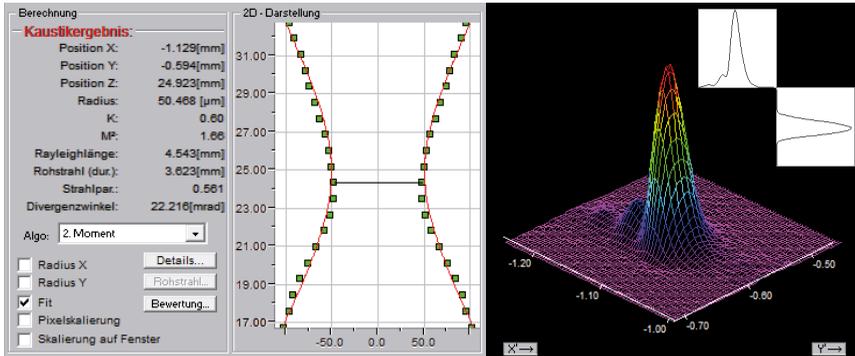


Bild 18: Strahlkaustik (links) und isometrische Darstellung des Strahlprofils (rechts) bei Verwendung des Galvo-Scanners bei einer Repetitionsrate von 1,43 MHz, einer Pulsdauer von 7,65 ps und einer mittleren Leistung von 0,3 W

## 4.2 Metallographische Analyse von Bohrungen

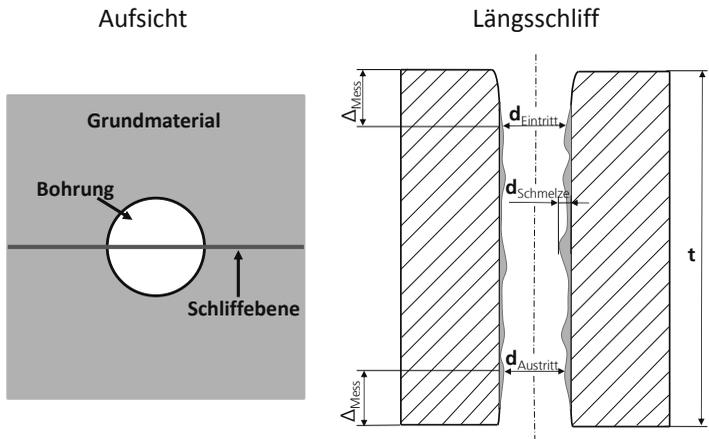
Zur metallographischen Analyse der Bohrungen werden Längsschliffe hergestellt. Ziel ist die Vermessung der Bohrungsgeometrie sowie die Analyse der metallurgischen Qualität bzgl. Defekten wie z.B. Schmelzschichten oder Rissen. Die Schliffebene wird in die Bohrungsmitte positioniert (Bild 19 links). Nach dem Polieren mit Diamantpaste mit der Körnung  $1\ \mu\text{m}$  erfolgt eine nasschemische Ätzung. Dadurch können Schmelzschichten an den Bohrungswänden detektiert werden. Die Edelstahlproben (Schritt 1-3) werden 15 Sekunden in 50-prozentig verdünntem Ätzmittel nach Adler<sup>9</sup> behandelt.

Die Analyse der präparierten Bohrungen erfolgt hauptsächlich mittels Lichtmikroskopie (LM) und teilweise Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) zur Bestimmung der chemischen Elementzusammensetzung.

Die Messung der Bohrungsdurchmesser erfolgt jeweils in einem Abstand  $\Delta_{Mess}$  von Bohrungsein- und austritt. Somit wird ein möglicher Einfluss einer Aufweitung der Durchmesser an Bohrungseintritt und -austritt verkleinert. In der Anwendung als Kühlluftbohrung ist der Querschnitt relevant, durch den tatsächlich ein Fluid strömen kann. Daher ist ein Abstand  $\Delta_{Mess}$  von 10% der Probendicke  $t$  bei der Messung sinnvoll [Wal10], Bild 19 rechts.

<sup>9</sup> Ätzmittel nach Adler besteht aus 25 ml destilliertem Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 10 g Diammoniumtetrachlorocuprat ( $\text{CICu}_4\text{H}_4\text{N}$ ), 50 ml Salzsäure 32-prozentig (HCl) und 15 g Eisen(III)-chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) [PC94].

Bild 19:  
Schematische Darstellung einer Aufsicht (links) und eines Längsschliffs (rechts) von einer Bohrung. Im Rahmen der Auswertung werden der Eintrittsdurchmesser  $d_{\text{Eintritt}}$ , der Austrittsdurchmesser  $d_{\text{Austritt}}$  und die Schmelzsichten (Schritt 1) bzw. Schmelzrückstände (Schritt 2 & 3)  $d_{\text{Schmelze}}$  gemessen



Aus den Durchmessern  $d_{\text{Eintritt}}$  und  $d_{\text{Austritt}}$  sowie der Dicke des Probenkörpers  $t$  kann mit Formel **4.2** die Konizität  $k$  in Prozent bestimmt werden.

**4.2**  
[Pop11]

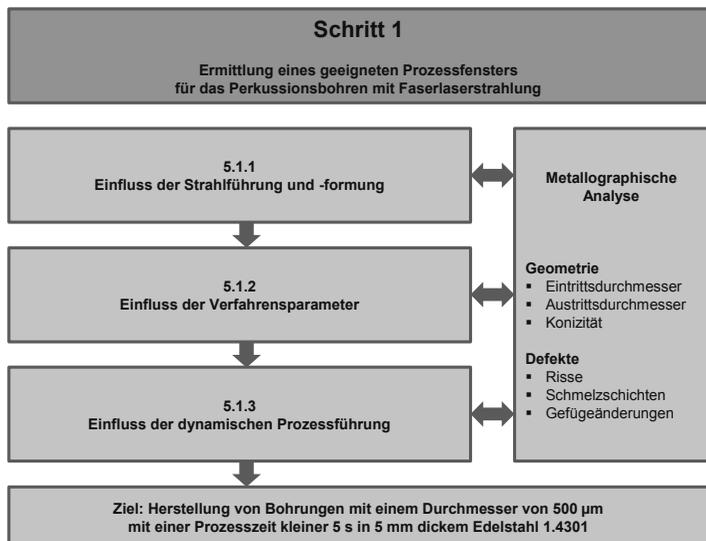
$$k = \frac{d_{\text{Eintritt}} - d_{\text{Austritt}}}{t} \times 100 [\%]$$

## 5 Verfahrensentwicklung

### 5.1 Schritt 1: Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Perkussionsbohren mit Faserlaserstrahlung

Zur möglichst produktiven Herstellung von Bohrungen wird das Bohrverfahren Perkussionsbohren verwendet. Dabei erfolgt keine Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahlung. Im Folgenden wird ein geeignetes Prozessfenster hierfür ermittelt. Die experimentelle Vorgehensweise ist in Bild 20 dargestellt. Das Ziel ist die Herstellung von möglichst zylindrischen Bohrungen mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  in 5 mm dicken Edelstahl 1.4301 bei möglichst kleiner Prozesszeit.

Bild 20:  
Flussdiagramm zur  
experimentellen  
Vorgehensweise von  
Schritt 1



Zunächst wird in Kapitel 5.1.1 der Einfluss der Strahlführung und -formung bzgl. der verwendeten Kombination aus Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite auf die Bohrungsgeometrie ermittelt. Dabei werden feste Verfahrensparameter verwendet. Im nächsten Schritt werden in Kapitel 5.1.2 die Verfahrensparameter systematisch variiert, um eine für die

Zielgeometrie geeignete Parameterkombination zu ermitteln. Im dritten Schritt wird der Einfluss einer dynamischen Prozessführung bzgl. der zeitlichen Intensitätsverteilung während des Bohrprozesses untersucht (Kapitel 5.1.3).

### 5.1.1 Einfluss der Strahlführung und -formung

Beim Perkussionsbohren ist die Größe des Probenvolumens, in welchem eine Wechselwirkung zwischen Material und Laserstrahlung stattfinden kann, vom Fokusbereich abhängig. Der Fokusbereich  $\varnothing_{foc}$  kann in Abhängigkeit der optischen Strahlführung und -formung mittels Strahlenoptik gemäß Formel 5.1 abgeschätzt werden.

5.1

$$\varnothing_{foc} \cong \varnothing_{Faser} * \frac{1}{f_{col}} * f_{foc}$$

Dabei entspricht  $\varnothing_{Faser}$  dem Kerndurchmesser der Prozessfaser,  $f_{col}$  der Kollimationsbrennweite und  $f_{foc}$  der Fokussierbrennweite der Bearbeitungsoptik. Die Kollimationsbrennweite  $f_{col}$  beträgt bei allen Versuchen 100 mm und wird nicht variiert.

Im Folgenden wird der Einfluss der Kombinationen von sechs Prozessfaserdurchmessern sowie fünf Fokussierbrennweiten gemäß Tabelle 3 auf die geometrische Bohrungsform bzgl. Ein- und Austrittsdurchmesser untersucht. Dazu werden zunächst Messungen der Strahlengrößen Fokusbereich, Rayleighlänge und Beugungsmaßzahl  $M^2$  in Abhängigkeit von Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite durchgeführt. Anschließend wird der Einfluss der Strahlführung und -formung auf die Bohrungsgeometrie untersucht.

Tabelle 3: Variierte Prozessfaserdurchmesser sowie Fokussierbrennweiten

Parameter	Varierte Werte
Prozessfaserdurchmesser	50 $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$ , 150 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$ , 400 $\mu\text{m}$
Fokussierbrennweiten der Bearbeitungsoptik	100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm

#### 5.1.1.1 Messung der Strahlengrößen

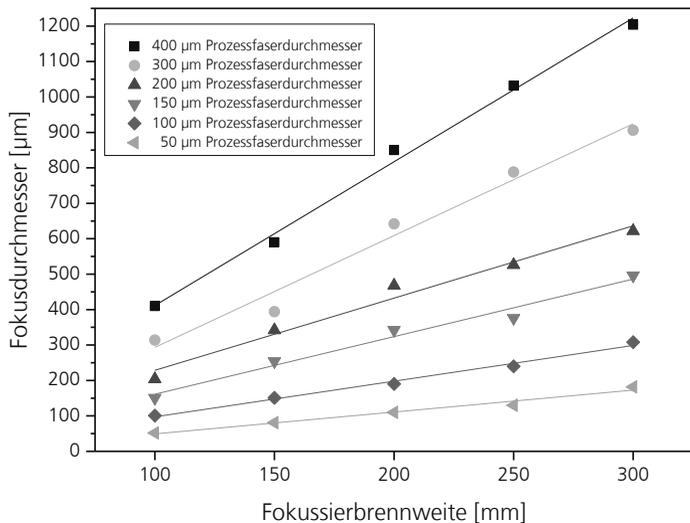
Zunächst werden die Strahlengrößen Fokusbereich, Rayleighlänge und Beugungsmaßzahl  $M^2$  für jede Kombination aus Prozessfaserdurchmesser

sowie Fokussierbrennweite mittels Strahlkaustikmessungen ermittelt. Hierfür wird ein MicroSpotMonitor<sup>10</sup> der Firma Primes verwendet.

### Fokusedurchmesser

In Bild 21 sind die gemessenen Fokusedurchmesser in Abhängigkeit von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern aufgetragen. Der Fokusedurchmesser ist von beiden Parametern linear abhängig, wie gemäß Formel 5.1 zu erwarten.

Bild 21:  
Abhängigkeit des gemessenen Fokusedurchmessers von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern



Im Vergleich zu den mittels Formel 5.1 rechnerisch abgeschätzten Fokusedurchmessern weichen die gemessenen Werte teilweise bis zu 20 % ab. Die Abweichungen entstehen durch Messungenauigkeiten bei den Strahlkaustikmessungen. Der gemessene Fokusedurchmesser wird durch die Kombination aus gewählter Laserleistung sowie optischem Filter des Messgeräts und Softwarefiltern in der Messsoftware beeinflusst. Diese Kombination muss in Abhängigkeit des zu messenden Fokusedurchmessers variiert werden. Formel 5.1 kann also zur näherungsweisen Abschätzung des Fokusedurchmessers verwendet werden.

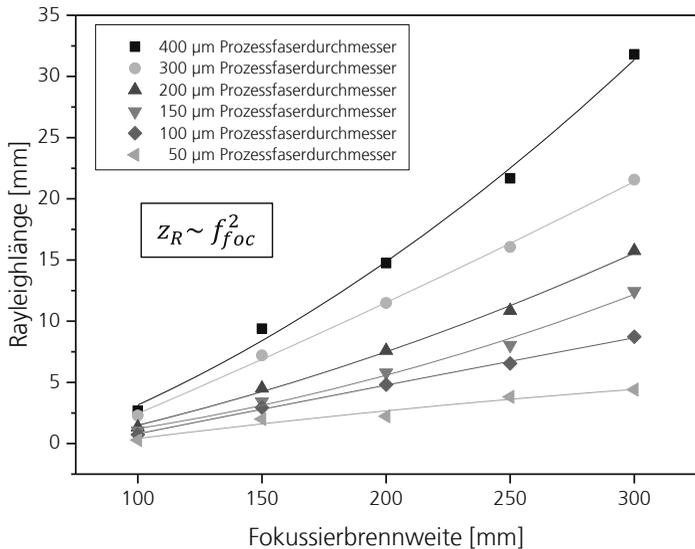
<sup>10</sup> Eine Beschreibung des Primes MicroSpotMonitor ist im Anhang 10.1 aufgeführt.

### Rayleighlänge

Die Rayleighlänge ist der Abstand vom Strahlfokus, an dem die Querschnittsfläche der Laserstrahlung um einen Faktor 2 größer ist als im Strahlfokus. D.h. der Strahlradius  $w_0$  ist im Abstand der Rayleighlänge zum Strahlfokus um einen Faktor  $\sqrt{2}$  größer. Bei Bohrprozessen sind durch die Verwendung einer großen Rayleighlänge von mehreren mm die Bohrungsdurchmesser gegenüber ungewollten Abweichungen der Fokusslage in Richtung der Laserstrahlung reproduzierbarer. Bei Rayleighlängen kleiner 1 mm hat eine Abweichung der Fokusslage z.B. um 1 mm Auswirkungen auf die Größe der Bohrungsdurchmesser um einen Faktor bis zu 2.

Die gemessenen Werte der Rayleighlänge in Abhängigkeit von Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite sind in Bild 22 dargestellt. Die Rayleighlänge wird sowohl bei Vergrößerung des Prozessfaserdurchmessers als auch bei Vergrößerung der Fokussierbrennweite größer.

Bild 22:  
Abhängigkeit der gemessenen Rayleighlänge von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern



### Beugungsmaßzahl $M^2$

Die Beugungsmaßzahl  $M^2$  ist ein Maß für die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung. Umso größer  $M^2$  ist, desto größer ist der kleinste mögliche

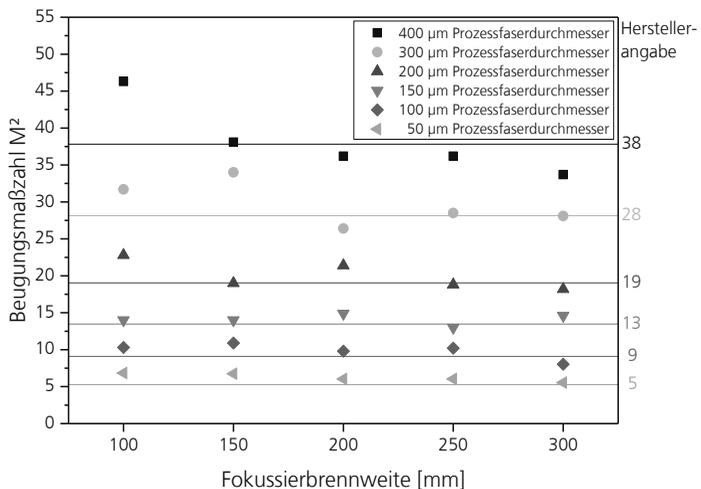
Fokussierbrennweite. Zusammen mit der Wellenlänge  $\lambda$  lässt sich mittels Formel 5.2 das Strahlparameterprodukt (SPP), ein Maß für die Strahlqualität, berechnen. Das SPP einer Prozessfaser ist durch die numerische Apertur sowie den Kerndurchmesser der Faser definiert. Somit sind sowohl das SPP als auch  $M^2$  nur vom Prozessfaserdurchmesser und nicht von der Fokussierbrennweite abhängig. Da sich bei Vergrößerung des Prozessfaserdurchmessers mehrere Lasermoden im Faserquerschnitt ausbreiten können, wird die Beugungsmaßzahl  $M^2$  größer (z.B. ca. 38 bei einem Prozessfaserdurchmesser von 400  $\mu\text{m}$ ) und somit die Fokussierbarkeit kleiner.

5.2  
[Pop11]

$$SPP = M^2 \frac{\lambda}{\pi} = \frac{\varphi d_{foc}}{2}$$

In Bild 23 sind die gemessenen Beugungsmaßzahlen  $M^2$  in Abhängigkeit zum Prozessfaserdurchmesser sowie zur Fokussierbrennweite dargestellt. Wie erwartet, ist  $M^2$  vom Prozessfaserdurchmesser abhängig. Die theoretischen Werte von  $M^2$  auf Basis der numerischen Apertur sowie des Kerndurchmessers der verwendeten Prozessfasern sind als horizontale Linien eingezeichnet. Dennoch treten vor allem bei Prozessfaserdurchmessern von 300  $\mu\text{m}$  und 400  $\mu\text{m}$  Abweichungen der Messwerte bei Variation der Fokussierbrennweite auf. Diese Abweichungen sind aufgrund der großen Rayleighlängen bis zu 32 mm bei diesen Prozessfaserdurchmessern (Bild 22) auf Messungenauigkeiten zurückzuführen.

Bild 23:  
Abhängigkeit der gemessenen Beugungsmaßzahl  $M^2$  von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern



## Intensitätsverteilung im Fokus

Durch die zuvor ermittelte Beugungsmaßzahl  $M^2$  wird die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung beeinflusst. Bei einem großen Prozessfaserdurchmesser wie z.B. 400  $\mu\text{m}$  mit großer Beugungsmaßzahl  $M^2$  (ca. 38) wird daher sowohl der resultierende Fokusedurchmesser als auch die relative Intensitätsverteilung im Strahlfokus beeinflusst. In Bild 24 sind die relativen Intensitätsverteilungen der Laserstrahlung im Fokus in Abhängigkeit vom Prozessfaserdurchmesser bei Fokussierbrennweiten von 100 mm und 300 mm dargestellt. Bei jeder Verteilung sind von außen in Richtung Mitte die Bereiche ohne messbare Intensität (lila/pink), der Randbereich (dunkelblau), die Randzone mit niedriger Intensität (grün/gelb) sowie der Bereich mit maximaler Intensität (dunkelrot) dargestellt. Die Skalierungen der dargestellten Messungen sind nicht einheitlich, da der kleinste Fokusedurchmesser ca. 60  $\mu\text{m}$  ( $\varnothing_{\text{Faser}} = 50 \mu\text{m}$ ,  $f_{\text{foc}} = 100 \text{ mm}$ ) und der größte Fokusedurchmesser ca. 1,2 mm ( $\varnothing_{\text{Faser}} = 400 \mu\text{m}$ ,  $f_{\text{foc}} = 300 \text{ mm}$ ) beträgt. Bei größeren Prozessfaserdurchmessern nimmt der Bereich maximaler Intensität eine größere Fläche des Fokus ein. Werden die Intensitätsverteilungen isometrisch dargestellt (Bild 25), wird bei kleinem Prozessfaserdurchmesser (100  $\mu\text{m}$ ) ein gauß-förmiges und bei großem Prozessfaserdurchmesser (400  $\mu\text{m}$ ) ein tophat-förmiges Intensitätsprofil festgestellt. Die Messungen der Intensitätsverteilungen im Strahlfokus für alle verwendeten Kombinationen aus Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite sind im Anhang (Bild 97) dargestellt. Vermutlich wird die Bohrungsgeometrie durch das unterschiedliche Intensitätsprofil beeinflusst, da beim tophat-förmigen Intensitätsprofil im Randbereich des Fokus mehr Intensität zur Verfügung steht als beim gauß-förmigen Intensitätsprofil. Dieser Einfluss auf die Bohrungsgeometrie wird im folgenden Kapitel untersucht.

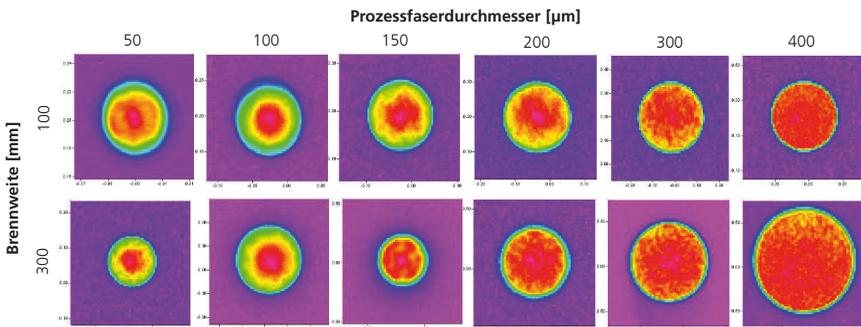
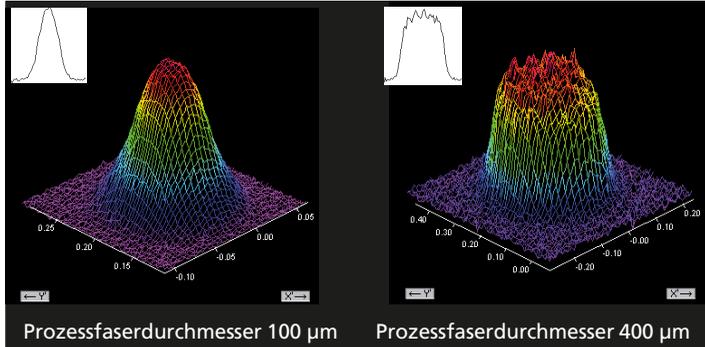


Bild 24: Relative Intensitätsverteilung im Strahlfokus in Anhängigkeit vom Prozessfaserdurchmesser bei Fokussierbrennweiten von 100 mm und 300 mm

Bild 25: Isometrische Darstellung der relativen Intensitätsverteilung im Strahlfokus für eine Brennweite von 100 mm gaußförmig bei einem Prozessfaserdurchmesser von 100 µm (links) sowie tophat-förmig bei einem Prozessfaserdurchmesser von 400 µm (rechts)



### 5.1.1.2 Einfluss auf die Bohrungsgeometrie

Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen Kombinationen aus Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite auf die Bohrungsgeometrie bzgl. Ein- und Austrittsdurchmesser untersucht. Als Probenmaterial wird Edelstahl 1.4301 mit einer Dicke von 5 mm verwendet. Die Einfallsrichtung der Laserstrahlung ist orthogonal zur Probenoberfläche, so dass Bohrungen im 90° Winkel zur Probenoberfläche entstehen. Um den Einfluss der Strahlführung und -formung zunächst unabhängig von weiteren Verfahrensparametern zu ermitteln, werden für alle Versuche konstante Verfahrensparameter verwendet (Tabelle 4). Jeweils drei Bohrungen werden mit jeder Kombination aus Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite hergestellt und analysiert. Anhand von Mittelwert und Standardabweichung kann somit die Toleranz der Ergebnisse verglichen werden.

Tabelle 4: Konstante Verfahrensparameter zur Ermittlung des Einflusses der Strahlführung und -formung auf die Bohrungsgeometrie

Verfahrensparameter	Wert
Pulsspitzenleistung	4 kW
Pulsdauer	0,5 ms
Repetitionsrate	50 Hz
Düsendurchmesser	1,5 mm
Düsenabstand zur Probenoberfläche	4 mm
Abstand der Fokusslage zur Probenoberfläche	0 mm
Prozessgasart	Druckluft
Prozessgasdruck	5 bar

Die Abhängigkeiten der Ein- und Austrittsdurchmesser vom Prozessfaserdurchmesser und der Fokussierbrennweite sind in Bild 26 und Bild 27 dargestellt. Mit Vergrößerung der Fokussierbrennweite sowie des Prozessfaserdurchmessers werden die Eintrittsdurchmesser größer. Eine

Abhängigkeit zwischen theoretischem Fokussierdurchmesser gemäß Formel 5.1 und Eintrittsdurchmesser wird festgestellt. Die Austrittsdurchmesser sind für alle Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Prozessfaserdurchmesser maximal ungefähr 400  $\mu\text{m}$  groß. Ein Zusammenhang zwischen Austrittsdurchmessern und Prozessfaserdurchmesser sowie Fokussierbrennweite wird nicht festgestellt (Bild 27).

Bild 26:  
Abhängigkeit der Eintrittsdurchmesser von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern von 50  $\mu\text{m}$  bis 400  $\mu\text{m}$

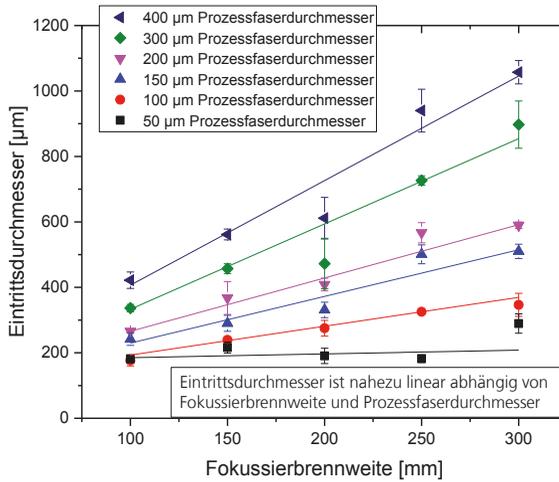
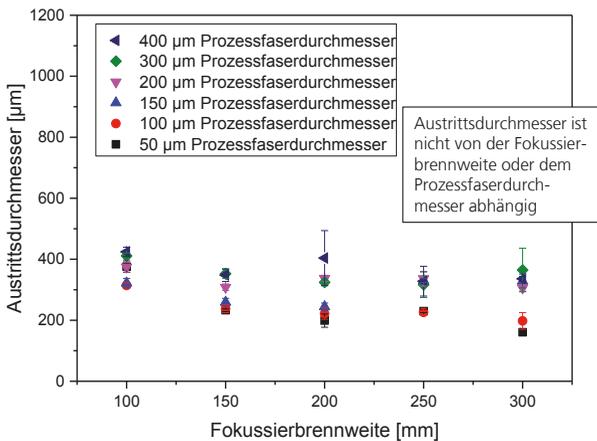
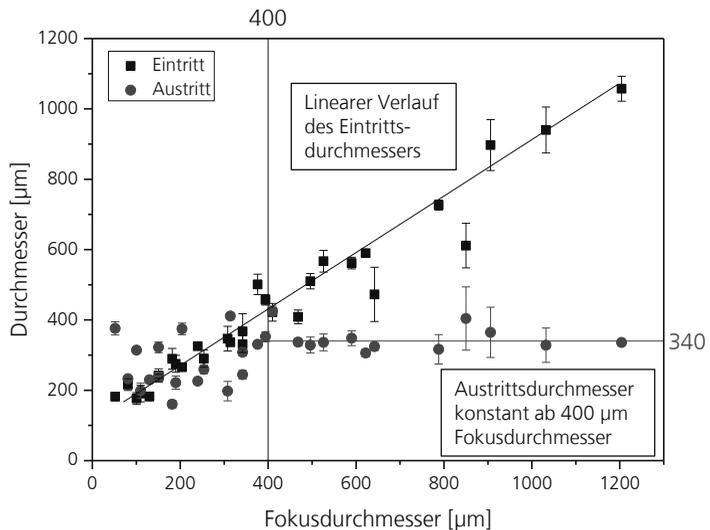


Bild 27:  
Abhängigkeit der Austrittsdurchmesser von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern von 50  $\mu\text{m}$  bis 400  $\mu\text{m}$



Für eine übersichtlichere Darstellung werden der Prozessfaserdurchmesser und die Fokussierbrennweite zum jeweils zugehörigen gemessenen Fokussierdurchmesser zusammengefasst. In Bild 28 sind die Ein- und Austrittsdurchmesser in Abhängigkeit vom gemessenen Fokussierdurchmesser aufgetragen.

Bild 28: Ein- und Austrittsdurchmesser der Bohrungen in Abhängigkeit vom gemessenen Fokussierdurchmesser der Laserstrahlung



Wie anhand von Bild 26 vermutet, ist der Eintrittsdurchmesser annähernd linear vom Fokussierdurchmesser abhängig. Die Austrittsdurchmesser sind ab einem Fokussierdurchmesser größer 400 µm konstant ca. 340 µm groß. Dies entspricht einer Grenze, ab der die Intensität der Laserstrahlung im Randbereich der Bohrungen kleiner als die erforderliche Schwellintensität zum Materialabtrag ist. Folglich wird die Laserstrahlung, die auf die Bohrungswände trifft, als Wärme in das Material abgeleitet. Alle Bohrungen, die mit einem Fokussierdurchmesser größer 400 µm erzielt werden, sind somit positiv konisch. Da die Bohrungen mit Fokussierdurchmessern kleiner 400 µm teilweise negativ konisch sind, wird im Folgenden der Einfluss der Kombination von Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite auf die Konizität der Bohrungen betrachtet.

### Beeinflussung der Konizität

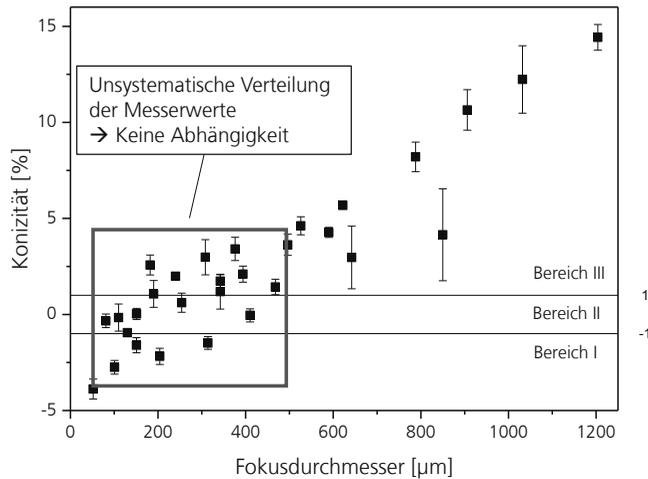
Im Folgenden werden die Messwerte für die Konizität in drei Bereiche eingeteilt (vgl. Formel 4.2):

- Bereich I: Konizität < -1
- Bereich II:  $-1 \leq \text{Konizität} \leq 1$
- Bereich III: Konizität > 1

Die Konizität wird in Abhängigkeit von den zuvor gemessenen charakteristischen Größen der Laserstrahlung Fokusbereich, Beugungsmaßzahl  $M^2$  und Rayleighlänge dargestellt. Ziel dieser Darstellungen ist die Feststellung einer systematischen Abhängigkeit von Konizität und charakteristischer Größe der Laserstrahlung.

Die Konizität ist bei Fokusbereichen größer 500  $\mu\text{m}$  annähernd linear von diesem abhängig (Bild 29). Aufgrund der unsystematischen Verteilung<sup>11</sup> der Messwerte im Bereich eines Fokusbereichs von 50  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$  können analog zu Bild 28 keine klaren Grenzen definiert werden.

Bild 29:  
Abhängigkeit der  
Konizität von  
Bohrungen vom  
Fokusbereich  
der Laserstrahlung



<sup>11</sup> Die unsystematische Verteilung der Messwerte entsteht durch verschiedene Rayleighlängen der Laserstrahlung bei gleichen Fokusbereichen (Bild 29) bzw. Beugungsmaßzahlen (Bild 30). Beispielsweise kann ein Fokusbereich von 300  $\mu\text{m}$  sowohl mit einer Kombination aus 300  $\mu\text{m}$  Prozessfaserdurchmesser und 100 mm Fokussierbrennweite als auch mit einer Kombination aus 100  $\mu\text{m}$  Prozessfaserdurchmesser und 300 mm Fokussierbrennweite erzielt werden, was zu unterschiedlichen Rayleighlängen führt.

Eine Abhängigkeit zwischen der Beugungsmaßzahl  $M^2$  und der Konizität der Bohrungen kann aufgrund der unsystematischen Verteilung<sup>11</sup> der Messwerte über den gesamten  $M^2$  Bereich von 1 bis 40 ausgeschlossen werden (Bild 30). Die Abhängigkeit von Rayleighlänge und Konizität der Bohrungen ist in Bild 31 dargestellt.

Bild 30:  
Abhängigkeit der Konizität von Bohrungen von der Beugungsmaßzahl  $M^2$  der Laserstrahlung

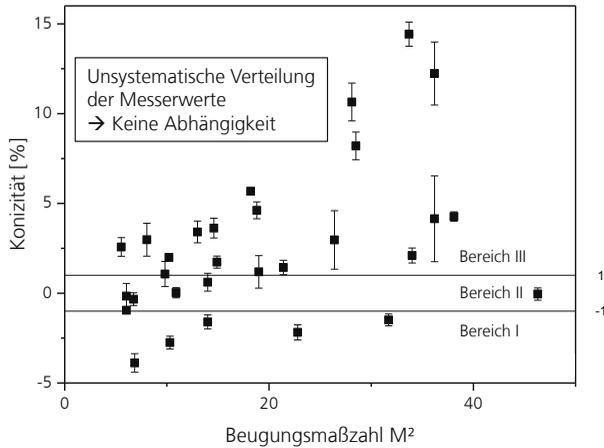
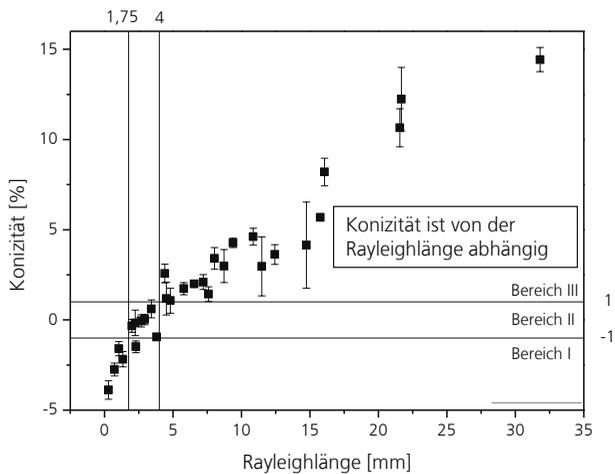


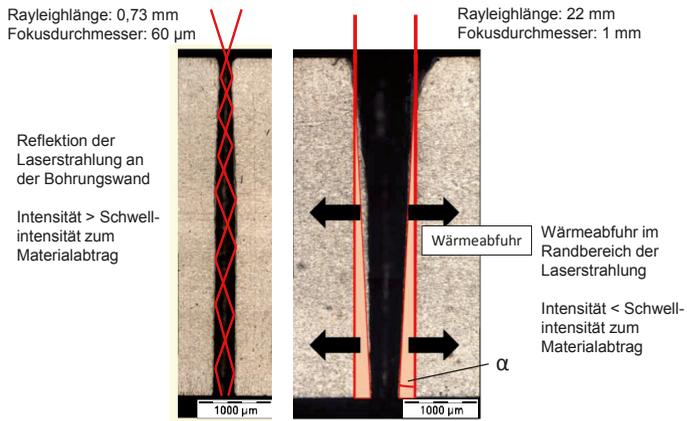
Bild 31:  
Abhängigkeit der Konizität von Bohrungen von der Rayleighlänge der Laserstrahlung



Die Konizität der Bohrungen ist bis zu einer Rayleighlänge von 5 exponentiell und danach affin linear von der Rayleighlänge abhängig. Eine Konizität im Bereich II wird durch Verwendung von Laserstrahlung mit einer Rayleighlänge zwischen 1,75 mm und 4 mm erreicht. Bei einer kleineren Rayleighlänge von z.B. 0,2 mm werden entsprechend Bohrungen mit kleinerer Konizität (- 4 %) und bei einer größeren Rayleighlänge von z.B. 33 mm Bohrungen mit größerer Konizität (+ 14 %) erzielt. Vor allem bei Verwendung großer Prozessfaserdurchmesser von z.B. 400  $\mu\text{m}$  (vgl. Bild 22) hat die Laserstrahlung eine große Rayleighlänge (33 mm). Die Intensitätsverteilung im Fokus ist somit tophat-förmig.

Zur Veranschaulichung sind in Bild 32 eine Bohrung mit kleiner Konizität von -2,75% (links) und großer Konizität von 10,65% (rechts) gegenübergestellt. Die linke Bohrung ist mit Laserstrahlung mit einer Rayleighlänge von 0,73 mm und einem Fokaldurchmesser von 60  $\mu\text{m}$  gebohrt. Bei der rechten Bohrung beträgt die Rayleighlänge 22 mm und ist somit um einen Faktor von ca. 4 größer als die Probedicke. Der Fokaldurchmesser beträgt 1 mm.

Bild 32: Längsschliff einer Bohrung mit negativer (-2,75%, links) und positiver Konizität (10,65%, rechts) sowie schematisch dargestelltem Verlauf der Laserstrahlung



Bei einer kleinen Rayleighlänge von z.B. 0,728 mm divergiert die Laserstrahlung in kleinem Abstand zum Fokus und wird somit an der Bohrungswand mehrfach reflektiert (Bild 32 links). Da bei der Reflektion nur ein kleiner Teil der Intensität als Wärme in den Grundwerkstoff abgeführt wird, können Bohrungen mit Tiefen größer als die Rayleighlänge erzielt werden. Bei ausreichender Intensität können Bohrungen erzielt werden, bei denen der Austrittsdurchmesser größer als der Eintrittsdurchmesser ist. Die Konizität ist somit negativ.

Bei Laserstrahlung mit einer großen Rayleighlänge von z.B. 22 mm divergiert die Laserstrahlung erst in entsprechend großem Abstand zum Fokus, so dass das Strahlprofil als nahezu konstant über die Bohrungstiefe angenommen werden kann (Bild 32 rechts). Umso tiefer die Bohrung wird, desto mehr trifft der Randbereich der Laserstrahlung auf die schräge Bohrungswand. Da die Laserstrahlung auf die schräge Bohrungswand mit einem Winkel von  $\alpha$  projiziert wird, ist die Fläche, auf die die Strahlung trifft, um einen Faktor von  $(\sin \alpha)^{-1}$  größer. Die Intensität der Laserstrahlung ist an den schrägen Flächen also kleiner. Sobald die Intensität kleiner als die zum Materialabtrag erforderliche Schwellintensität ist, erfolgt kein Materialabtrag mehr und die Laserstrahlung wird als Wärme in den Grundwerkstoff abgeführt. Somit entsteht eine konische Bohrungsform. Dieser Effekt ist in Bild 33 dargestellt. Die Konizität kann folglich nur durch Vergrößerung der Intensität der Laserstrahlung wie z.B. durch Verwendung einer größeren Pulsspitzenleistung verkleinert werden.

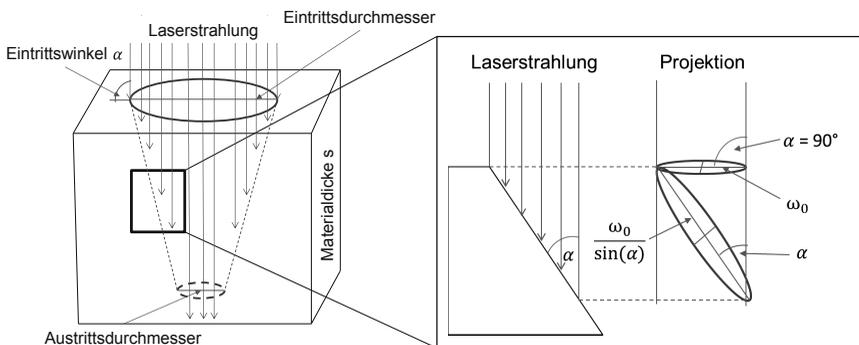


Bild 33: Schematische Darstellung einer Bohrung, die mit Laserstrahlung mit großer Rayleighlänge gebohrt ist (links) sowie Projektion der Laserstrahlung an einer Bohrungswand im Winkel  $\alpha$  (rechts)

### Zwischenfazit:

- Der Fokusbereich ist linear abhängig vom Prozessfaserdurchmesser und von der Fokussierbrennweite. Zur näherungsweise Abschätzung des resultierenden Fokusbereichs kann Formel 5.1 verwendet werden.
- Der Eintrittsdurchmesser von Bohrungen ist linear abhängig vom Fokusbereich. Ein Zusammenhang von Austrittsdurchmesser und Fokusbereich ist nicht feststellbar.

- Die Konizität einer Bohrung ist linear von der Rayleighlänge der Laserstrahlung abhängig. Rayleighlängen zwischen 1,75 mm und 4 mm führen zu zylindrischen Bohrungen mit einem Durchmesser von maximal 340 µm bei 4 kW Pulsspitzenleistung.
- Bei Verwendung von Laserstrahlung mit großer Rayleighlänge wie z.B. 22 mm ist das Intensitätsprofil der Laserstrahlung tophat-förmig. Da im Vergleich zu Laserstrahlung mit kleiner Rayleighlänge wie z.B. 0,728 mm keine Reflektion der Laserstrahlung an den Bohrungswänden erfolgt, wird der Randbereich der Laserstrahlung von den schrägen Bohrungswänden absorbiert. Da die Intensität kleiner als die zum Materialabtrag erforderliche Schwellintensität ist, ist eine negativ konische Bohrungsform die Folge.

### 5.1.2 Einfluss der Verfahrensparameter

Im Folgenden wird systematisch der Einfluss der Verfahrensparameter

- Pulsspitzenleistung
- Pulsdauer
- Repetitionsrate
- Pulsanzahl
- Fokusslage in Richtung der Laserstrahlung
- Prozessgasart und -druck

auf die Bohrungsgeometrie untersucht. Als Zielgeometrie werden zylindrische Bohrungen mit einem Durchmesser von 500 µm definiert. Daher wird zunächst der Einfluss der Verfahrensparameter an Kombinationen von Fokussierbrennweite und Prozessfaserdurchmesser untersucht, bei denen auf Basis von Kapitel 5.1.1 potentiell Eintrittsdurchmesser von ca. 500 µm erreicht werden können (Tabelle 5). Nach Ermittlung des Einflusses der Pulsspitzenleistung wird eine geeignete Kombination ausgewählt und für die weiteren Parametervariationen verwendet.

Tabelle 5: Potentiell geeignete Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Prozessfaserdurchmesser zur Erreichung eines Eintrittsdurchmessers von 500 µm

Fokussierbrennweite	Prozessfaserdurchmesser	Eintrittsdurchmesser bei 4 kW gemäß Kapitel 5.1.1
150 mm	300 µm	457 ± 15 µm
200 mm	300 µm	473 ± 77 µm
250 mm	150 µm	501 ± 29 µm
300 mm	150 µm	510 ± 22 µm

## Pulsspitzenleistung

In Bild 34 ist die Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser bei Verwendung der Kombinationen aus Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite gemäß Tabelle 5 dargestellt. Da bei der Verwendung eines Prozessfaserdurchmessers von 300  $\mu\text{m}$  Durchgangsbohrungen mit einer Pulsspitzenleistung von 2 kW aufgrund zu kleiner Intensität nicht möglich sind, sind die Ergebnisse ab einer Pulsspitzenleistung von 4 kW dargestellt.

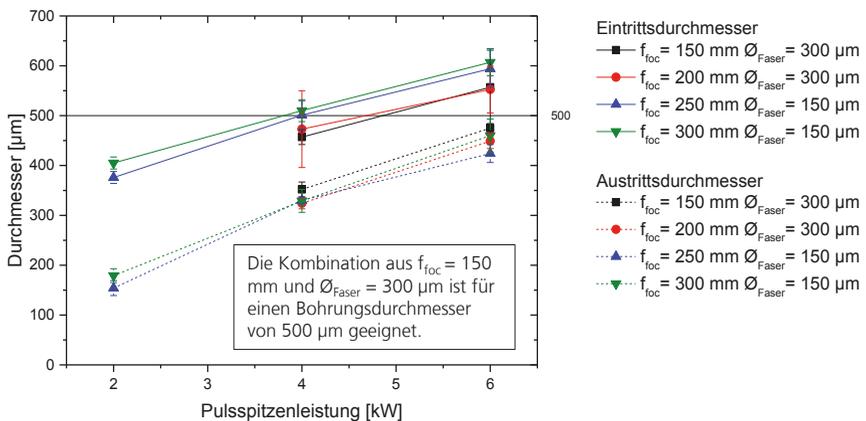


Bild 34: Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser von der Pulsspitzenleistung bei vier Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Prozessfaserdurchmesser ( $t_p = 0,5 \text{ ms}$ ;  $f_{\text{rep}} = 50 \text{ Hz}$ , Druckluft 5 bar)

Mit einer größeren Pulsspitzenleistung bis zu 6 kW werden Bohrungen mit größerem Ein- und Austrittsdurchmesser bis zu 600  $\mu\text{m}$  bzw. 480  $\mu\text{m}$  erzielt. Diese Abhängigkeit gilt für alle untersuchten Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Prozessfaserdurchmesser sowohl für den Bohrungseintritt als auch für den Bohrungsausritt. Eine größere Pulsspitzenleistung (z.B. 6 kW statt 2 kW) entspricht einer größeren eingebrachten Energie (3 J statt 1 J) und somit einer größeren Intensität der Laserstrahlung ( $3,8 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$  statt  $1,3 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ ).

Mit der Kombination aus 300  $\mu\text{m}$  Prozessfaserdurchmesser sowie 150 mm Fokussierbrennweite werden bei einer Pulsspitzenleistung von 6 kW Bohrungen mit einem Eintrittsdurchmesser von  $557 \pm 17 \mu\text{m}$  und einem Austrittsdurchmesser von  $475 \pm 9 \mu\text{m}$  erzielt. Dies entspricht einer Konizität von 1,64 %. Dies ist die kleinste Konizität von allen verwendeten Kombinationen, so dass diese Kombination aus Prozessfaserdurchmesser und

Fokussierbrennweite für einen Bohrungsdurchmesser von 500  $\mu\text{m}$  als geeignet festgelegt wird.

### Pulsdauer

Im Folgenden wird eine Variation der Pulsdauer von 0,25 ms bis 1,25 ms durchgeführt. Unterhalb von 0,25 ms Pulsdauer entstehen keine Durchgangsbohrungen, da die Intensität der Laserstrahlung noch vor dem Durchbohren kleiner als die Schwellintensität zum Materialabtrag wird. In Bild 35 ist die Abhängigkeit von Ein- und Austrittsdurchmesser von der Pulsdauer gezeigt. Bei einer Pulsdauer von 0,5 ms beträgt der Eintrittsdurchmesser ca. 570  $\mu\text{m}$  und der Austrittsdurchmesser ca. 405  $\mu\text{m}$ . Mit größerer Pulsdauer bis zu 1 ms werden sowohl Bohrungseintritt als auch -austritt bis zu 600  $\mu\text{m}$  bzw. 430  $\mu\text{m}$  größer. Allerdings entsteht bei Pulsdauern größer als 0,5 ms im oberen Teil der Bohrung eine Aufweitung (Bild 36). Dies erfolgt aufgrund von Plasmabildung in der Bohrung durch zu große Pulsenergie. Bei Pulsdauern kleiner 0,5 ms sind die Ein- und Austrittsdurchmesser um ca. 80  $\mu\text{m}$  bzw. 140  $\mu\text{m}$  kleiner und die Prozesszeit beträgt aufgrund der kleineren zur Verfügung stehenden Intensität ca. 15 s. Bei Pulsdauern größer 0,25 ms beträgt die Bohrdauer weniger als 1 s. Somit wird eine Pulsdauer von 0,5 ms als geeignet festgelegt.

Bild 35:  
Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser von der Pulsdauer

$f_{\text{foc}} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{\text{Faser}} = 300 \mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $f_{\text{rep}} = 50 \text{ Hz}$   
Druckluft 5 bar

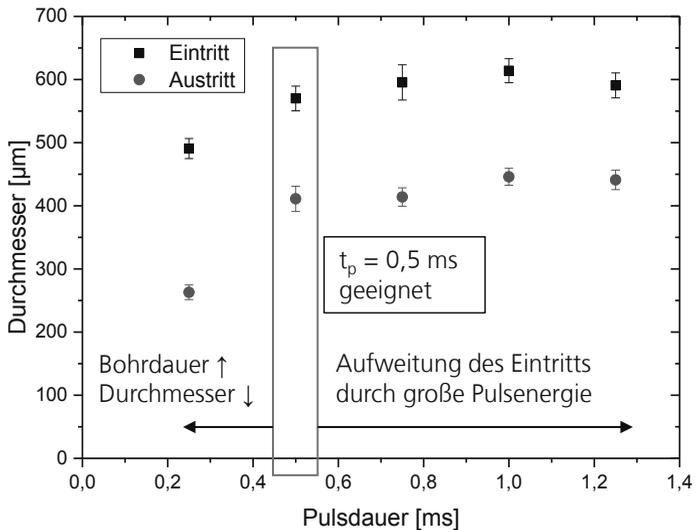
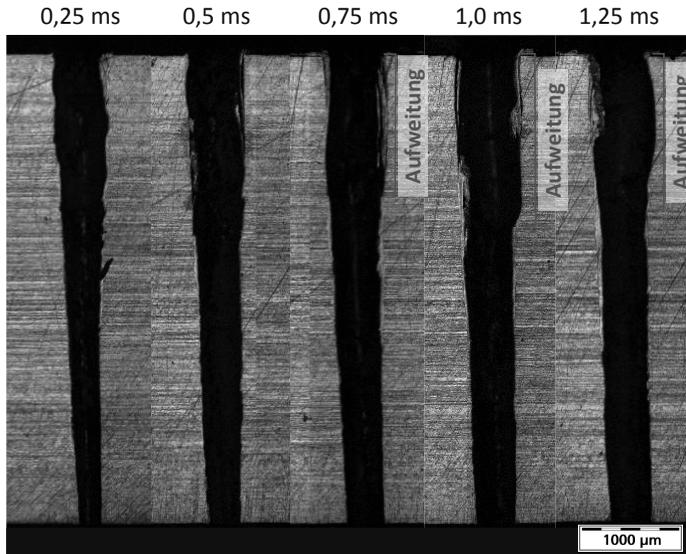


Bild 36: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit Pulsdauern von 0,25 ms bis 1,25 ms gebohrt sind. Das obere Drittel der Bohrung ist aufgrund von zu großer Pulsenergie aufgeweitet bei Pulsdauern größer 0,5 ms.

$f_{\text{loc}} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{\text{Faser}} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $f_{\text{rep}} = 50 \text{ Hz}$   
 Druckluft 5 bar

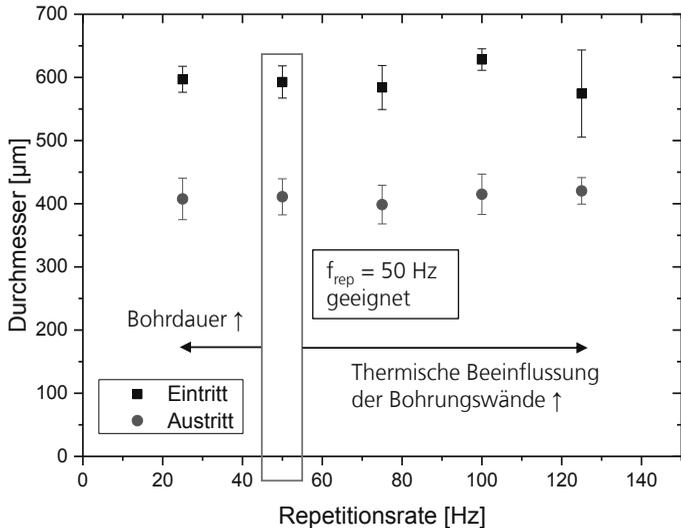


### Repetitionsrate

Der Einfluss der Repetitionsrate auf Ein- und Austrittsdurchmesser der Bohrungen ist in Bild 37 dargestellt. Die Änderungen der Durchmesser bei Variation der Repetitionsrate sind kleiner  $40 \text{ }\mu\text{m}$  und nicht systematisch von der Repetitionsrate abhängig. Da die Bohrdauer bei einer Repetitionsrate von 25 Hz ungefähr 20 s beträgt, ist die Verwendung einer Repetitionsrate größer 25 Hz sinnvoll. Ab einer Repetitionsrate von 50 Hz beträgt die Bohrdauer weniger als 1 s. Da bei größeren Repetitionsraten die Zeit zwischen zwei Pulsen kleiner ist und somit weniger Zeit für Wärmeableitung verfügbar ist, wird die thermische Beeinflussung der Bohrungswände größer. Daher wird eine Repetitionsrate von 50 Hz als geeignet festgelegt.

Bild 37:  
Abhängigkeit von  
Ein- und  
Austrittsdurchmesser  
von der  
Repetitionsrate

$f_{loc} = 150 \text{ mm}$   
 $\phi_{Faser} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $\tau_p = 0,5 \text{ ms}$   
Druckluft 5 bar



### Pulsanzahl

Um den Einfluss der Pulsanzahl auf die Größe der Ein- und Austrittsdurchmesser zu untersuchen, werden Bohrungen mit Variation der Pulsanzahl hergestellt. In Bild 38 ist ein Längsschliff von Bohrungen gezeigt, die mit Pulsanzahlen von 5 bis 200 Pulsen erzielt werden. Eine Anzahl von 5 Pulsen ist aufgrund zu kleinem Abtragsvolumen nicht ausreichend, um eine Durchgangsbohrung zu erreichen. Erst ab einer Anzahl von 10 Pulsen wird eine Durchgangsbohrung erzielt. Bei dieser Durchgangsbohrung ist der Austrittsdurchmesser nur ca. 200 µm groß. Weitere Pulse sind erforderlich, um vor allem in der unteren Hälfte der Bohrung Material abzutragen. Ab einer Anzahl von 20 Pulsen ist die Bohrungsgeometrie, abgesehen von Toleranzen der Ein- und Austrittsdurchmesser, konstant. In Bild 39 sind die Ein- und Austrittsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsanzahl dargestellt. Bei einer weiteren Vergrößerung der Pulsanzahl bis 200 Pulse wird keine Vergrößerung des Austrittsdurchmessers festgestellt. Die Standardabweichung beträgt für die Eintrittsdurchmesser 29 µm und für die Austrittsdurchmesser 27 µm. Eine Pulsanzahl von 20 Pulsen ist daher geeignet. Das entspricht einer Bohrdauer von 0,4 s.

Bild 38: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit Pulsanzahlen von 5 bis 200 Pulsen erzielt werden

$f_{loc} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{Faser} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $t_p = 0,5 \text{ ms}$   
 $f_{rep} = 50 \text{ Hz}$   
 Druckluft 5 bar

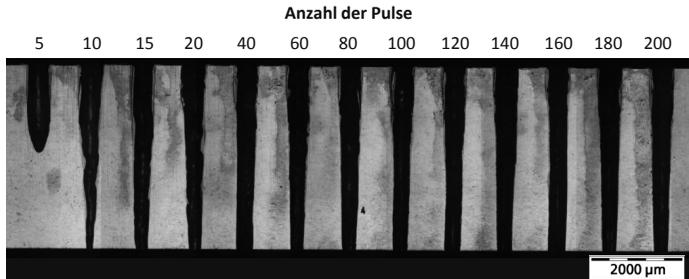
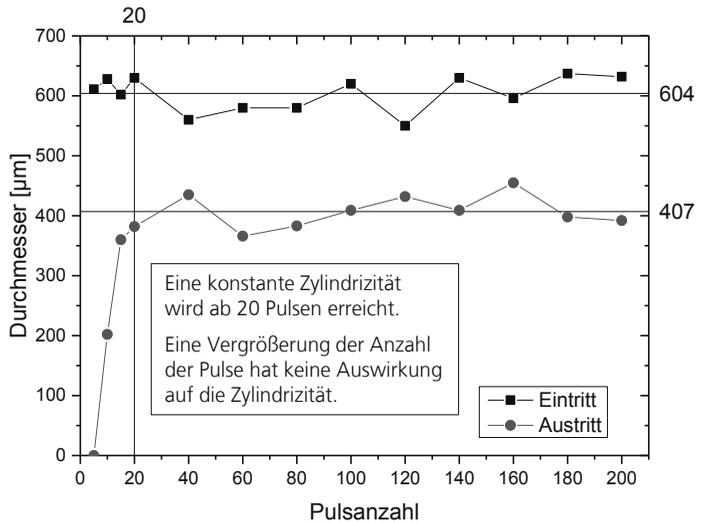


Bild 39: Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser einer Bohrung von der Pulsanzahl

$f_{loc} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{Faser} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $t_p = 0,5 \text{ ms}$   
 $f_{rep} = 50 \text{ Hz}$   
 Druckluft 5 bar



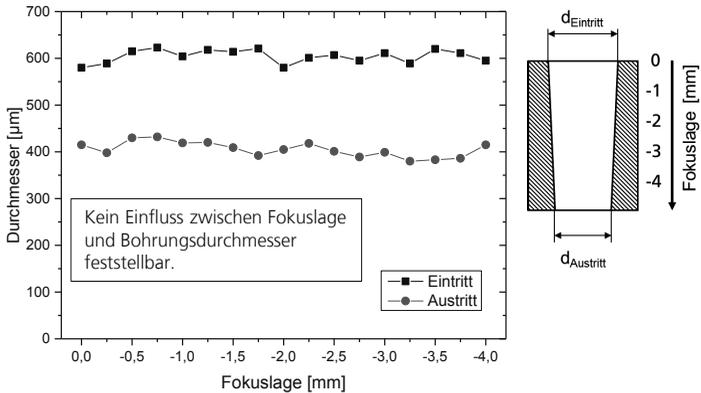
### Fokusslage

In Bild 40 ist links die Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser von der Fokusslage im Bauteil dargestellt. Bei einer Fokusslage vom Wert null ist der Fokus der Laserstrahlung auf der Oberfläche des Werkstücks positioniert. Für negative Werte der Fokusslage wird der Fokus in Richtung der z-Achse in das Werkstück positioniert (Bild 40 rechts). Ein Einfluss der Fokusslage auf die Ein- und Austrittsdurchmesser der Bohrungen wird nicht festgestellt. Aufgrund

der großen Rayleighlänge der Laserstrahlung von 7,2 mm, was dem ca. 1,5 fachen der Werkstückdicke entspricht, ist ein Einfluss nicht zu erwarten, da der Laserstrahldurchmesser entlang der gesamten Bohrungstiefe nahezu konstant ist. Die Abweichungen der Ein- und Austrittsdurchmesser sind wie bei der Variation der Pulsanzahl auf Toleranzen des Bohrprozesses zurückzuführen. Der Bohrprozess ist somit gegenüber Schwankungen der Fokusslage stabil. Dies ist für automatisierte Bohrprozesse z.B. bei Verwendung eines Roboters zur Positionierung des Werkstücks oder der Bearbeitungsoptik vorteilhaft. Bei allen weiteren Versuchen wird die Fokusslage auf der Oberfläche des Werkstücks positioniert.

Bild 40:  
Abhängigkeit von Ein- und Austrittsdurchmesser von der Fokusslage der Laserstrahlung bezüglich der Probenoberfläche

$f_{loc} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{Faser} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $t_p = 0,5 \text{ ms}$   
 $f_{rep} = 50 \text{ Hz}$   
 Druckluft 5 bar



Kein Einfluss zwischen Fokusslage und Bohrungsdurchmesser feststellbar.

### Prozessgasart

Um den Einfluss der Prozessgasart zu ermitteln, werden Bohrungen mit Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Druckluft bei einem Druck von jeweils 5 bar erzielt (Bild 41). Argon und Stickstoff sind inerte Gase. Sauerstoff ist dagegen ein reaktives Gas, so dass durch exotherme Reaktionen während des Bohrprozesses zusätzliche Energie zur Verfügung steht. Das Gasgemisch Luft besteht vor allem aus Stickstoff (78 %) und Sauerstoff (21 %), so dass eine Superposition der inerten Eigenschaften des Stickstoffs und der exothermen Eigenschaften des Sauerstoffs zu erwarten ist.

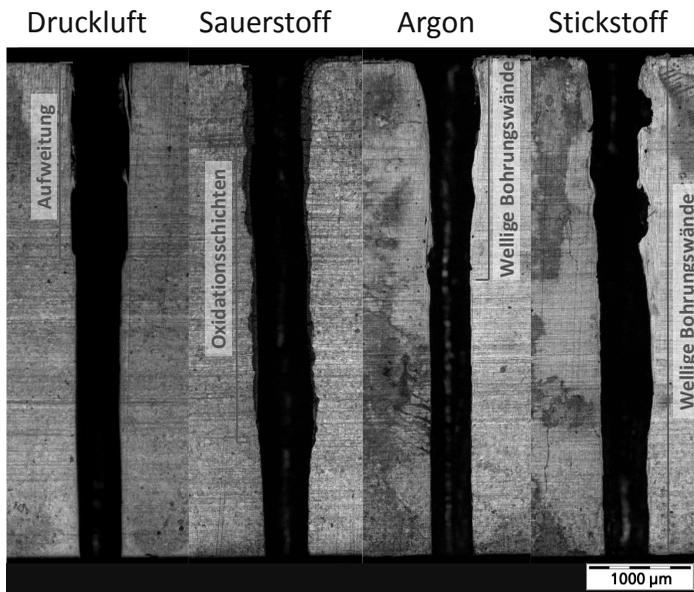
Bei Verwendung von Druckluft ist das obere Drittel der Bohrung aufgeweitet. Diese Aufweitung entsteht durch zu große Intensität der Laserstrahlung am Bohrungseintritt. Im Verlauf der Bohrung wird die Laserstrahlung teilweise von der Bohrungswand absorbiert, so dass die unteren zwei Drittel der Bohrung zylindrisch sind. Wird Sauerstoff als Prozessgas verwendet, wird die

Aufweitung aufgrund der aktiven Wirkung des Sauerstoffs auf ca. 80 % der gesamten Bohrungslänge vergrößert. Weiterhin entstehen an der gesamten Bohrungswand Oxidationsschichten mit Dicken bis zu 100  $\mu\text{m}$  durch Reaktion des Sauerstoffs mit den Elementen des Werkstoffs. Im Vergleich zu Druckluft und Sauerstoff sind Argon und Stickstoff inerte Gase. Die Bohrung, die mit Argon erzielt wird, ist im unteren Teil vergleichbar zylindrisch wie die Bohrung, bei der Druckluft verwendet wird. Im oberen Drittel haben die Bohrungswände hingegen eine wellige Struktur. Bei Verwendung von Stickstoff entsteht über die gesamte Bohrungslänge eine wellige Struktur der Bohrungswand. Sowohl bei Argon als auch bei Stickstoff ist die wellige Struktur auf den kühlenden Effekt der Prozessgase zurückzuführen, so dass die entlang der Bohrungswand strömende Schmelze teilweise unregelmäßig erstarrt.

Da die zylindrischsten Bohrungen ohne Oxidationsschichten an den Bohrungswänden mit Druckluft als Prozessgas erzielt werden, wird Druckluft als geeignetes Prozessgas festgelegt.

Bild 41: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit den Prozessgasen Druckluft, Sauerstoff, Argon und Stickstoff bei einem Prozessgasdruck von 5 bar erzielt werden

$f_{\text{loc}} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{\text{Faser}} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $t_{\text{p}} = 0,5 \text{ ms}$   
 $f_{\text{rep}} = 50 \text{ Hz}$

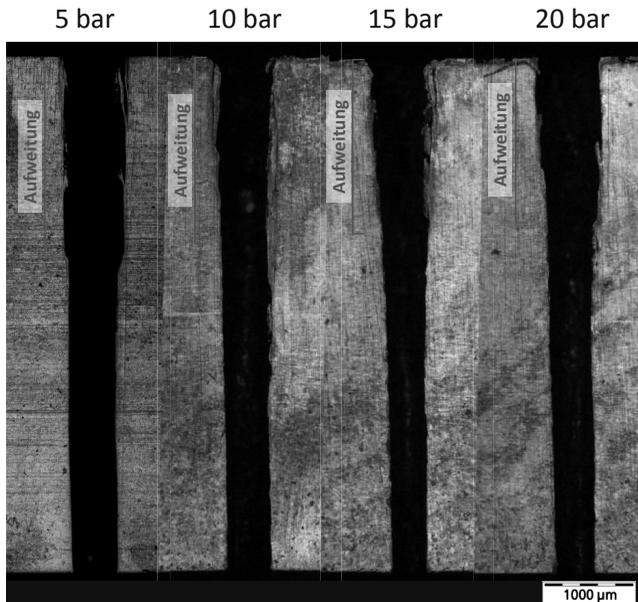


## Prozessgasdruck

In Bild 42 sind Längsschliffe von Bohrungen dargestellt, die mit Druckluft bei Prozessgasdrücken von 5 bis 20 bar erzielt werden. Ein Einfluss des Prozessgasdrucks auf die Bohrungsgeometrie wird nicht festgestellt. Die Bohrungseintritte sind wie zuvor im ersten Drittel der Bohrungslänge aufgeweitet. Mit einem um 15 bar größerem Prozessgasdruck wird aufgrund der kühlenden Wirkung eines größeren Prozessgasvolumenstroms die Länge der Aufweitung um 0,35 mm kleiner. Die Bohrungsaufweitungen sind vergleichbar. Ein Prozessgasdruck von 5 bar wird aufgrund der größeren Wirtschaftlichkeit bzgl. Prozessgasbereitstellung als geeignet festgelegt. Eine Verkleinerung bzw. Vermeidung der Aufweitung des Bohrungseintritts wird durch eine dynamische Prozessführung im folgenden Kapitel erzielt.

Bild 42: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen mit variiertem Prozessgasdruck von 5 bar bis 20 bar

$f_{roc} = 150 \text{ mm}$   
 $\varnothing_{Faser} = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $P = 6 \text{ kW}$   
 $t_p = 0,5 \text{ ms}$   
 $f_{rep} = 50 \text{ Hz}$   
 Druckluft

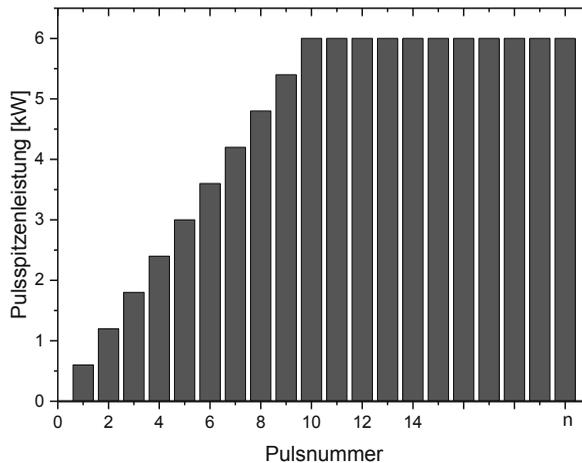


### 5.1.3 Einfluss der dynamischen Prozessführung

Im Folgenden wird der Einfluss einer dynamischen Prozessführung auf die Bohrungsgeometrie untersucht. Basierend auf den Ergebnissen von Kapitel 5.1.2 wird vermutet, dass die Intensität der Laserstrahlung der ersten

Pulse einer Bohrung zu groß ist, da bei nahezu allen Bohrungen im erste Drittel die Durchmesser aufgeweitet sind und unregelmäßig Schmelzablagerungen an den Bohrungswänden anhaften. Daher wird im Folgenden der zeitliche Intensitätsverlauf der Laserstrahlung angepasst. Dazu erfolgt eine Vergrößerung der Pulsspitzenleistung von Puls zu Puls innerhalb der ersten zehn Pulse. Dies wird auch als Interpulse shaping bezeichnet. Dabei wird die Pulsspitzenleistung innerhalb eines einzelnen Pulses nicht verändert. In Bild 43 ist der Verlauf der Pulsspitzenleistung abhängig von der Pulsnummer dargestellt. Während der ersten zehn Pulse wird die Pulsspitzenleistung um jeweils 600 W vergrößert. Alle weiteren Pulse werden bis zur Pulsnummer n mit einer Pulsspitzenleistung von 6000 W emittiert. [UDK12]

Bild 43: Zeitlicher Verlauf der Pulsspitzenleistung beim Interpulse shaping. Während der ersten 10 Pulse wird die Pulsspitzenleistung jeweils um 600 W vergrößert. Alle weiteren Pulse werden bis zur Pulsnummer n mit einer Pulsspitzenleistung von 6000 W emittiert.



Ein Längsschliff einer Bohrung mit zeitlicher Anpassung der Intensität ist in Bild 44 rechts gezeigt. Im Vergleich zu Bohrungen ohne zeitliche Anpassung der Intensität (Bild 44 links) ist die Bohrungsgeometrie über die gesamte Bohrungslänge zylindrisch. Eine Vergrößerung des Durchmessers mit Anhaftung von Schmelzsichten mit Dicken bis zu 150  $\mu\text{m}$  an den Bohrungswänden im ersten Drittel der Bohrung wird vermieden. Die Schmelzsichten an den Bohrungswänden von Bohrungen mit zeitlicher Anpassung der Intensität weisen eine maximale Dicke von 50  $\mu\text{m}$  auf.

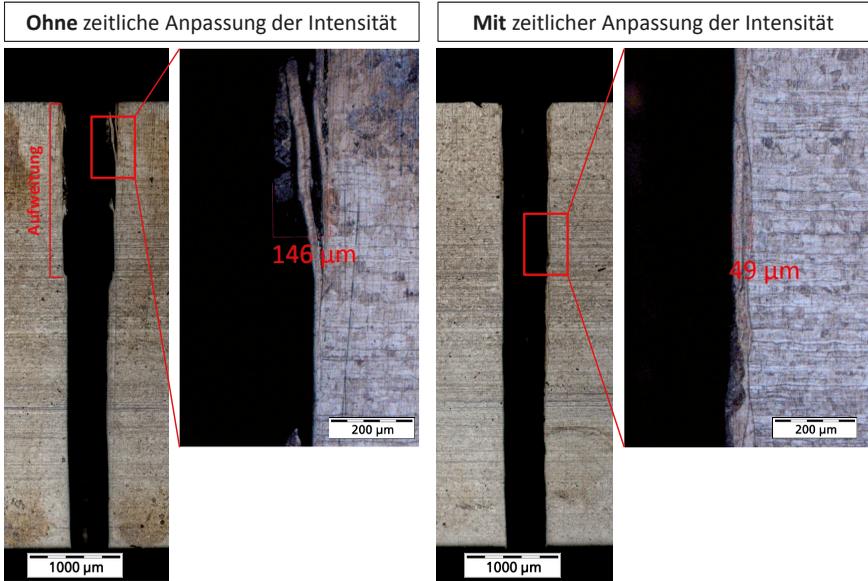


Bild 44: Geätzte Längsschliffe mit Makroaufnahmen von Bohrungen ohne zeitliche Anpassung der Intensität (links) und mit zeitlicher Anpassung der Intensität (rechts). Bei zeitlicher Anpassung der Intensität ist die Bohrungsgeometrie zylindrisch.

### Zusammenfassung geeigneter Parameter

Eine Zusammenfassung der in Kapitel 5.1 für Schritt 1 ermittelten geeigneten Verfahrensparameter ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6:  
Zusammenfassung der geeigneten Verfahrensparameter zum Bohren mit Faserlaserstrahlung (Schritt 1)

Parameter	Wert
Prozessfaserdurchmesser	300 µm
Fokussierbrennweite	150 mm
Pulsspitzenleistung	6 kW (Puls 1: 0,6 kW   Puls 2-10: jeweils + 0,6 kW   Puls 11-n: 6 kW)
Pulsdauer	0,5 ms
Repetitionsrate	50 Hz
Prozessgasart	Druckluft
Prozessgasdruck	5 bar
Bohrdauer	1 s

## Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der Ein- und Austrittsdurchmessern sowie der mittleren Schmelzschichtdicke wird anhand von 30 Bohrungen mit den Verfahrensparametern gemäß Tabelle 6 untersucht. Die mittlere Schmelzschichtdicke wird durch das arithmetische Mittel aus jeweils drei Messungen an unterschiedlichen Stellen innerhalb einer Bohrung bestimmt. In Bild 45 sind die statistischen Verteilungen der Ein- und Austrittsdurchmesser sowie der Schmelzschichtdicken dargestellt. In Tabelle 7 sind die resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen aufgeführt.

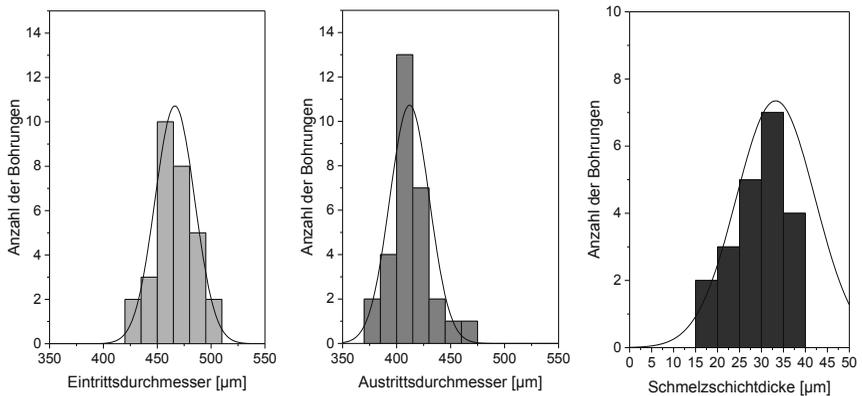


Bild 45: Statistische Verteilungen der Ein- (links) und Austrittsdurchmesser (mitte) sowie der Schmelzschichtdicke (rechts) für 30 Bohrungen

Tabelle 7: Mittelwerte und Standardabweichungen für Ein- und Austrittsdurchmesser, Konizität sowie der Schmelzschichtdicke für 30 Bohrungen

Größe	Mittelwert	Standardabweichung
Eintrittsdurchmesser	466 µm	18,4 µm
Austrittsdurchmesser	412 µm	18,4 µm
Konizität	1,09 %	0,59 %
Schmelzschichtdicke	33 µm	9 µm

### Analyse der Schmelzschicht

Die Analyse der chemischen Zusammensetzung des Grundmaterials und der Schmelzschicht ist exemplarisch für eine Bohrung ohne zeitliche Anpassung der Intensität in Bild 46 dargestellt. Links ist eine REM Aufnahme des Längsschliffes mit eingezeichnetem linearem Messbereich gezeigt. Innerhalb des Messbereichs werden mittels EDX-Analysen Spektren für den Anteil der Elemente Sauerstoff, Chrom, Eisen, Silizium und Nickel ermittelt. Die an den Messpunkten X1 (Schmelzschicht) und X2 (Grundmaterial) ermittelte Elementzusammensetzung ist in Bild 46 unten dargestellt.

Die Elementverteilung innerhalb der Schmelzschicht ist konstant. Eine Anreicherung von Sauerstoff um 29,3 % sowie eine Verarmung von Eisen um 26,8 % und Nickel um 3,6 % in der Schmelzschicht im Vergleich zum Grundmaterial ist auf eine Bildung von Eisen- und Nickeloxyden in der Schmelzschicht zurückzuführen. Der Sauerstoff wird als ca. 21-prozentiger Anteil mit dem Prozessgas Druckluft zugeführt. Die Spektren von Chrom, Silizium und Aluminium sind sowohl in der Schmelzschicht als auch im Grundmaterial nahezu konstant.

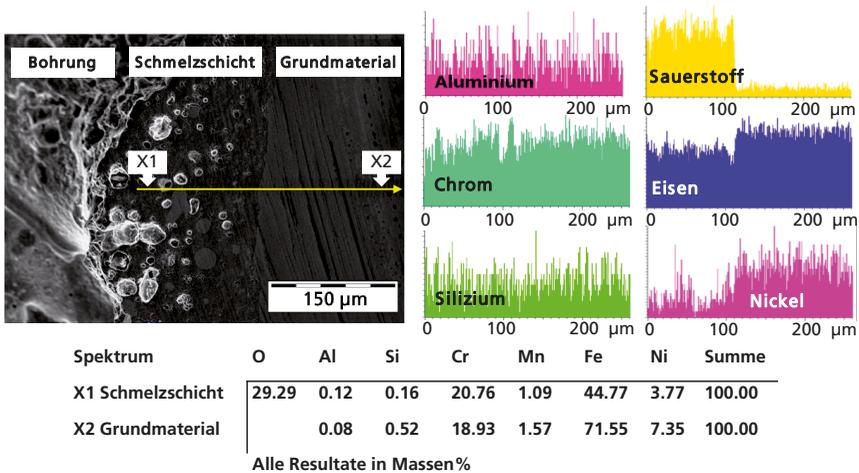
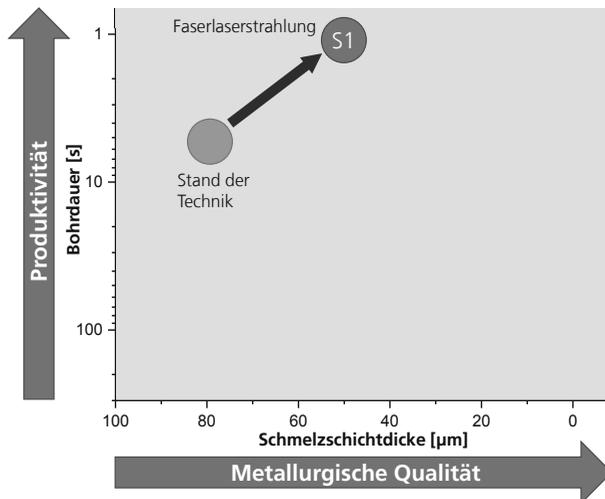


Bild 46: REM-Aufnahme der Schmelzschicht am Bohrungseintritt (links) und EDX-Analyse der chemischen Materialzusammensetzung innerhalb der Schmelzschicht und des Grundmaterials (rechts). Die Einheiten der y-Achsen der Elementverteilungen entlang der Messstrecke sind relativ und entsprechen den Messwerten in der Tabelle (unten).

**Fazit:**

- Beim Perkussionsbohren wird die Bohrungsgeometrie hauptsächlich durch eine geeignete Kombination aus Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite festgelegt. Durch systematische Ermittlung sowie Festlegung geeigneter Verfahrensparameter kann die metallurgische Qualität bzgl. Schmelzschichten und Rissen an der Bohrungswand vergrößert werden.
- Eine dynamische Prozessführung durch zeitliche Vergrößerung der Intensität (Interpulse Shaping) synchron zum Bohrprozess kann verwendet werden, um eine Aufweitung des Eintritts von Bohrungen zu vermeiden.
- Durch die Verwendung von Faserlaserstrahlung kann die Produktivität im Vergleich zur Verwendung von blitzlampen-gepumpter Laserstrahlung vergrößert werden, da größere Repetitionsraten wie z.B. 50 Hz statt konventionell 10-20 Hz verwendet werden können. Die metallurgische Qualität der Bohrungen bzgl. Schmelzschichten wird nicht beeinflusst.
- Die Einteilung der Ergebnisse von Schritt 1 bzgl. erreichter Produktivität und metallurgischer Qualität sind im Vergleich zum Stand der Technik in Bild 47 dargestellt.

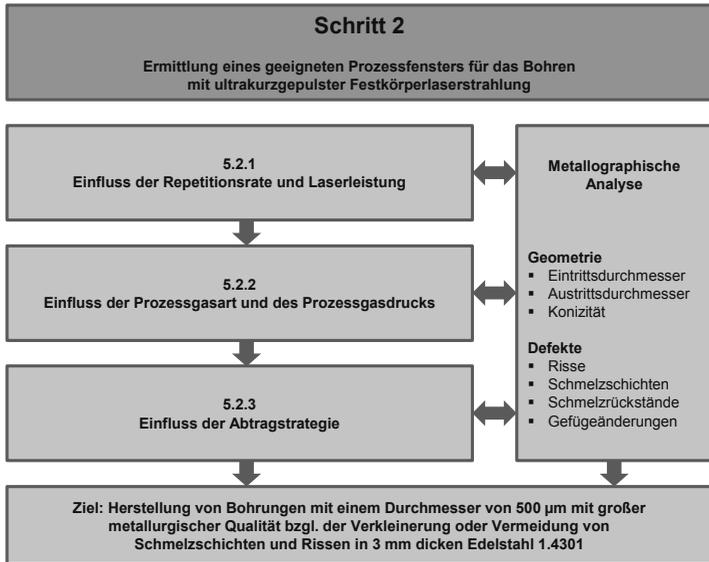
Bild 47: Einteilung des Bohrverfahrens von Schritt 1 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität im Vergleich zum Stand der Technik



## 5.2 Schritt 2: Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Bohren mit ultrakurzgepulster Festkörperlaserstrahlung

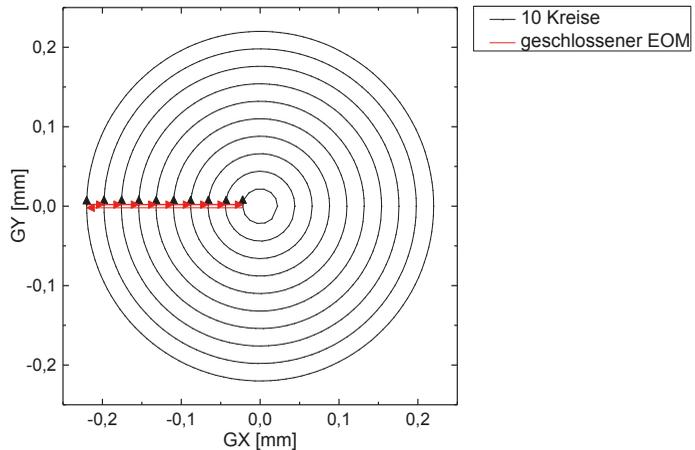
In Schritt 2 wird ultrakurzgepulste Festkörperlaserstrahlung zur Herstellung der gesamten Bohrung verwendet. Ziel ist die Vermeidung von Schmelzschichten, Schmelzrückständen und Rissen an den Bohrungswänden. Dabei erfolgt eine kreis- oder spiralförmige Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahlung. Im Folgenden wird ein geeignetes Prozessfenster hierfür ermittelt. Die experimentelle Vorgehensweise ist in Bild 48 dargestellt.

Bild 48:  
Flussdiagramm zur  
experimentellen  
Vorgehensweise von  
Schritt 2



Zunächst wird in Kapitel 5.2.1 der Einfluss der Repetitionsrate und der Laserleistung sowie in Kapitel 5.2.2 der Einfluss der Prozessgasart und des -drucks auf das Bearbeitungsergebnis untersucht. Dabei erfolgt die Verfahrensbewegung der Laserstrahlung anhand von Kreisbewegungen wie in Bild 49 schematisch dargestellt. Hierbei werden nacheinander 50 Kreise von außen nach innen verfahren. Der Durchmesser des äußersten Kreises beträgt 440 µm, so dass mit einem Fokusbereich von etwa 65 µm eine Bohrung mit ungefähr 500 µm Durchmesser erzielt wird.

Bild 49:  
Schematische Darstellung einer Verfahrensbewegung bestehend aus zehn Kreisen, die nacheinander von außen nach innen verfahren werden. GX und GY sind dabei die Verfahrachsen des Galvo-Scanners



Zwischen den einzelnen Kreisen wird die Scannerbewegung abgestoppt und der Laserfokus wird bei geschlossenem EOM von einem Kreis zum nächsten verfahren. Dadurch wird die mittlere Leistung während des gesamten Bohrvorgangs auf etwa 43 % der Leistung verkleinert, welche bei durchgehend geöffnetem EOM auf das Probenmaterial trifft. Die im Folgenden angegebenen Leistungen beziehen sich auf die mittlere Leistung bei durchgehend geöffnetem EOM. Die zugehörigen Leistungsmessungen werden im Strahlengang hinter der Fokussieroptik an der Position des Probenmaterials durchgeführt. Weiterhin wird durch das Abstoppen der Scannerbewegung zwischen den Kreisen die mittlere Verfahrgeschwindigkeit verkleinert. Die aus der Verfahrstrecke und der Bohrdauer abgeschätzte mittlere Verfahrgeschwindigkeit beträgt 72,4 mm/s.

Nach Ermittlung geeigneter Parameter für Repetitionsrate und Laserleistung sowie Prozessgasart und -druck wird in Kapitel 5.2.3 der Einfluss der Abtragstrategie bzgl. Fokusslage in Richtung der Laserstrahlung und einer spiralförmigen Verfahrensbewegung untersucht.

### Unterscheidung von Schmelzschichten und Schmelzrückständen

Bei Bohrungen, die mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung gebohrt werden, besteht bzgl. der Schmelzschichten folgender Unterschied zu Bohrungen, bei denen Faserlaserstrahlung verwendet wird:

Faserlaserstrahlung (Schritt 1)

An der gesamten Bohrungswand ist eine durchgehende Schmelzschicht mit Dicken zwischen 20 µm und 100 µm vorhanden.

Ultrakurzgepulste Festkörperlaserstrahlung (Schritt 2 und Schritt 3)

An der Bohrungswand ist eine durchgehende Schmelzschicht mit einer Dicke von ca. 1 µm vorhanden, Bild 50. Diese Schicht entsteht durch Wärmeakkumulation durch die an- und absteigenden Flanken unterhalb der Abtragschwelle eines jeden Laserpulses. Anhand des zeitlichen Fluenzverlaufs eines einzelnen Laserpulses ist dieser Effekt in Bild 51 dargestellt. Diese Schichtdicke kann nicht beeinflusst werden und wird somit nicht betrachtet. Abhängig von den verwendeten Verfahrensparametern haften einzelne, lokal begrenzte Schmelzrückstände an den Bohrungswänden an. In allen Diagrammen mit Ergebnissen zu ultrakurzgepulster Laserstrahlung wird die mittlere Dicke dieser Rückstände von jeweils drei Stellen einer Bohrung angegeben.

Bild 50: REM-Aufnahme einer mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung erzielter Bohrung (links) mit Nahaufnahme der nicht vermeidbaren, ca. 1 µm dicken Schmelzschicht an der Bohrungswand (rechts)

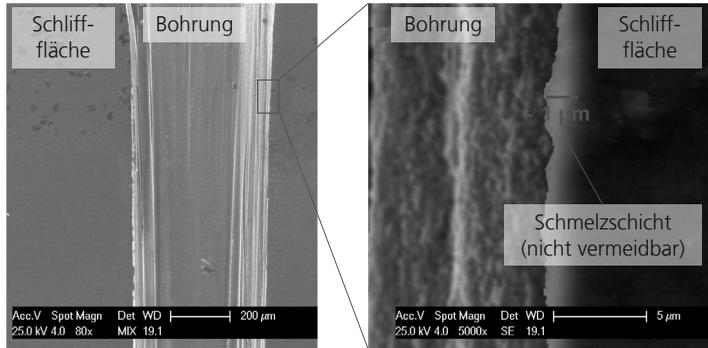
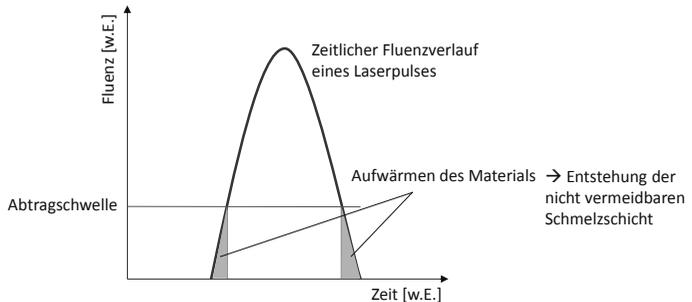


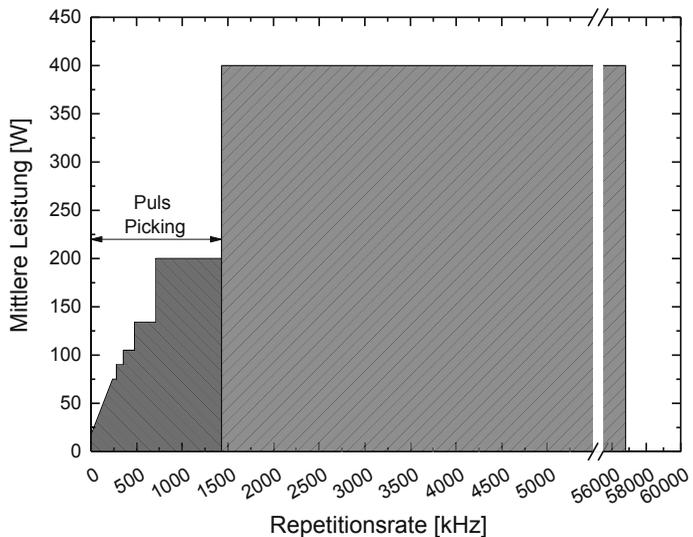
Bild 51: Schematische Darstellung des zeitlichen Fluenzverlaufs von ultrakurzgepulster Laserstrahlung mit eingezeichneter Abtragschwelle



### 5.2.1 Einfluss der Repetitionsrate und Laserleistung

Im Folgenden werden die beiden Verfahrensparameter Repetitionsrate und mittlere Laserleistung variiert, um eine geeignete Kombination beider Parameter für Bohrungen mit möglichst kleiner thermischer Beeinflussung zu ermitteln. Die untersuchten Repetitionsraten sind 238 kHz, 477 kHz, 715 kHz, 1 MHz, 1,43 MHz und 5,1 MHz. Bei einer Repetitionsrate größer oder gleich 1,43 MHz stehen die gesamten 400 W mittlere Leistung der Laserstrahlquelle zur Materialbearbeitung zur Verfügung. Für Repetitionsraten kleiner 1,43 MHz wird mittels des EOM Puls Picking betrieben, wodurch die verfügbaren mittleren Leistungen verkleinert werden (Bild 52). Beispielsweise wird der EOM bei einer Repetitionsrate von 715 kHz nur für jeden zweiten Puls transmissiv geschaltet. Durch die Auskopplung jeden zweiten Pulses ist daher nur die halbe mittlere Leistung von 200 W verfügbar. Puls Picking hat keinen Einfluss auf die Laserfluenz.

Bild 52:  
Abhängigkeit der mittleren Laserleistung von der Repetitionsrate. Repetitionsraten kleiner 1,43 MHz können durch Puls Picking realisiert werden. Dabei ist nicht die volle mittlere Leistung verfügbar.



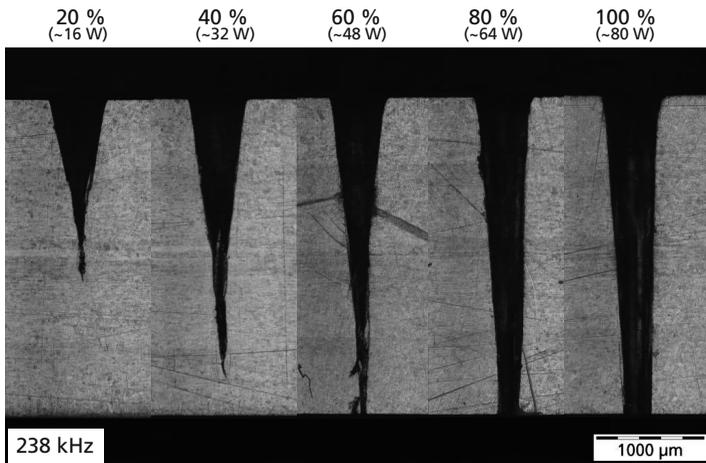
Die folgenden Bohrungen werden bei einer Bohrdauer von 147 s (Repetitionsrate 238 - 1000 kHz) bzw. 5 s (Repetitionsraten 1,43 - 5,1 MHz) erzielt. Grund für die unterschiedliche Bohrdauer ist die größere Abtragrate eines schmelzdominierten Abtrags aufgrund von Wärmeakkumulation bei

größeren Repetitionsraten im Vergleich zur Abtragrate eines dampfdominierten Abtrags bei kleineren Repetitionsraten.

In den Bildern 53 bis 55 sind Längsschliffe von Bohrungen dargestellt, die mit Repetitionsraten von 238 kHz, 715 kHz und 1,43 MHz erzielt werden<sup>12</sup>. Bei allen Repetitionsraten wird die jeweils verfügbare mittlere Leistung von 20% bis 100% variiert. Die entsprechenden Leistungen in Watt sind oberhalb der Bohrungen angegeben. Die maximale mittlere Leistung bei 1,43 MHz beträgt 376 W statt wie zu erwarten 400 W, da durch die optische Strahlführung an Umlenkspiegeln sowie der Fokussieroptik Verluste entstehen.

Bild 53: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 238 kHz bei 20 - 100 % mittlerer Leistung (16 - 80 W) erzielt werden

50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



<sup>12</sup> Die Längsschliffe zu 477 kHz, 1 MHz und 5,1 MHz sind im Anhang in Bild 98, Bild 99 und Bild 100 dargestellt.

Bild 54: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 715 kHz bei 20 - 100 % mittlerer Leistung (35 - 169 W) erzielt werden

50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar

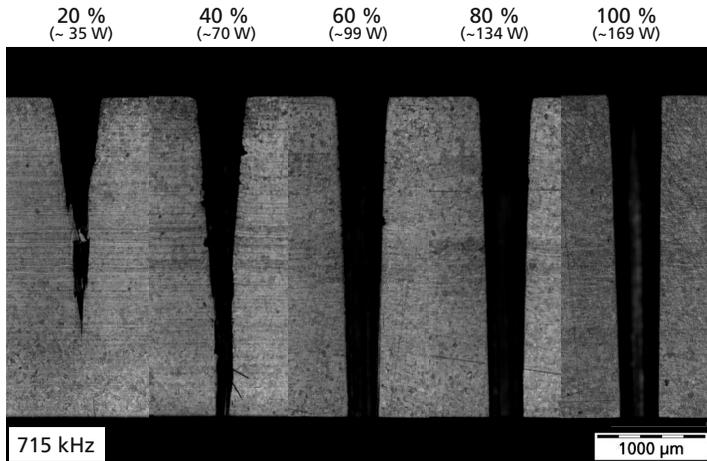
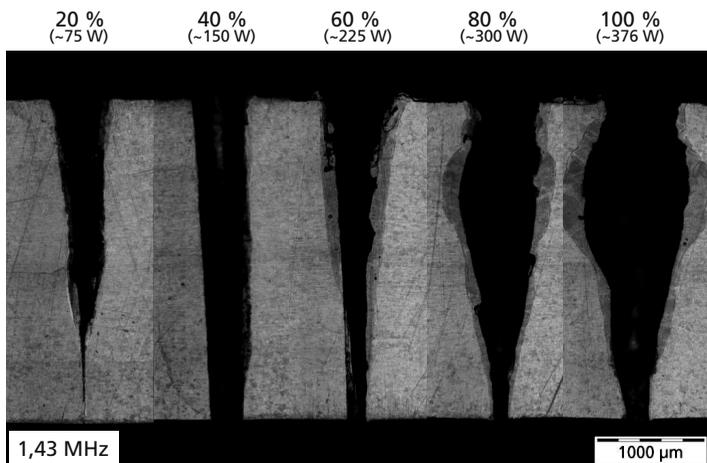


Bild 55: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 1,43 MHz bei 20 - 100 % mittlerer Leistung (75 - 376 W) erzielt werden

50 Kreise  
10 Wdh.  
5 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



Bei einer Repetitionsrate von 238 kHz sind die Bohrungen bei kleinen Leistungen (16 - 64 W) nicht bzw. nur mit einem Austrittsdurchmesser kleiner 200 µm durchgebohrt. Die zylindrischste Bohrung bei einer Repetitionsrate von 238 kHz wird bei einer Leistung von 80 W erzielt. Dies entspricht der

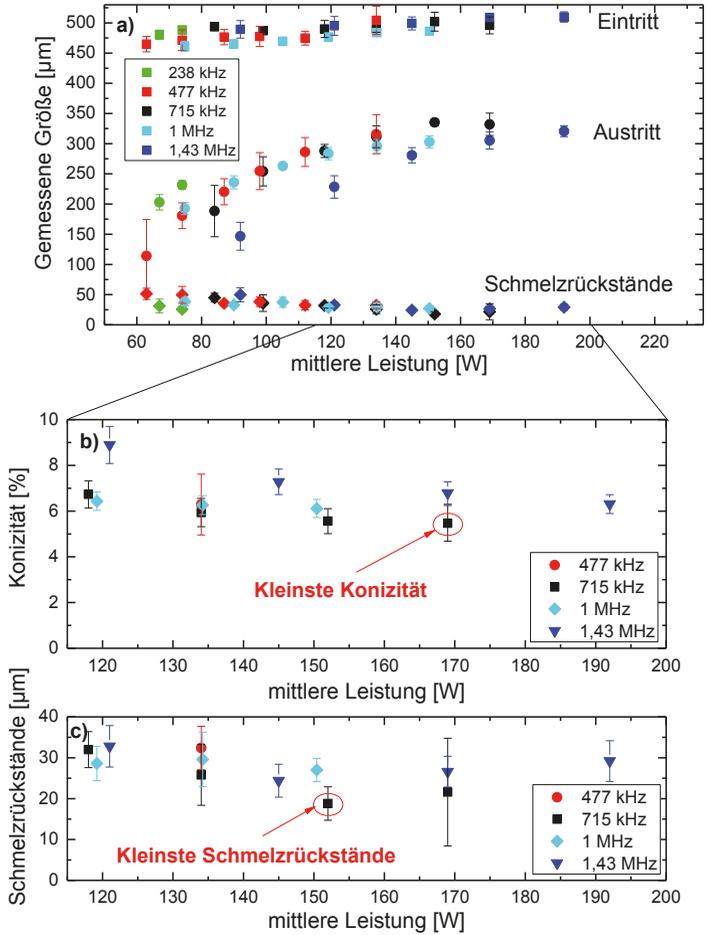
maximal verfügbaren Leistung bei einer Repetitionsrate von 238 kHz. Bei einer Repetitionsrate von 715 kHz sind Leistungen bis zu 169 W verfügbar. Wie bei einer Repetitionsrate von 238 kHz sind die Bohrungen bei kleiner Leistung (20%) nicht oder nur mit kleinem Austrittsdurchmesser von z.B. 150 µm bei 40 % Leistung durchgebohrt. Wiederum wird der größte Austrittsdurchmesser von ca. 340 µm bei der maximal verfügbaren Leistung (169 W) erreicht. An den Bohrungswänden werden keine signifikanten thermischen Beeinflussungen festgestellt.

Bei einer Repetitionsrate von 1,43 MHz sind über den gesamten Leistungsbereich thermische Beeinflussungen in Form von Schmelzschichten an den Bohrungswänden vorhanden. Bei großen Leistungen von 300 W und 376 W werden Aufweitungen in der oberen Hälfte der Bohrung zu festgestellt. Diese entstehen durch das Auftreten von Plasmen während des Bohrprozesses. Bei zu großen Repetitionsraten wird der zeitliche Laserpuls-zu-Laserpuls-Abstand so klein, dass eine Wechselwirkung zwischen ablatiertem Material und Laserstrahlung auftritt. Die Laserstrahlung wird vom ablatiertem Material absorbiert, so dass eine Aufweitung der Bohrung verursacht wird und die Laserstrahlung nicht mehr zum Grund der Bohrung propagiert wird. Eine Repetitionsrate von 1,43 MHz oder größer ist daher ungeeignet.

In Bild 56 a) sind die Messergebnisse in Abhängigkeit der Leistung quantitativ dargestellt. Allgemein wird bei Vergrößerung der Leistung der Austrittsdurchmesser größer und die Dicke der Schmelzrückstände kleiner. Für den geeigneten Leistungsbereich von 110 W bis 200 W sind in Bild 56 b) die Konizitäten und c) die Schmelzrückstände dargestellt. Die kleinste Konizität (5,47 %) wird bei einer Repetitionsrate von 715 kHz und 169 W mittlerer Leistung erreicht. Die kleinsten Schmelzrückstände (18,8 µm) werden bei 715 kHz und 152 W festgestellt. Analog zu den Längsschliffen in den Bildern 53 bis 55 sind eine Repetitionsrate von 715 kHz und Leistungen von 152 bis 169 W geeignet. [UFK14]; [UKK15a]; [UKK15b]; [Uch15]

Bild 56: Vergleich der gemessenen Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung bei verschiedenen Repetitionsraten (a).

Konizität (b) und Dicke der Schmelzrückstände (c) in Abhängigkeit der mittleren Leistung bei verschiedenen Repetitionsraten



**Zwischenfazit:**

- In Tabelle 8 sind die geeigneten Parameter und die Ergebnisse bzgl. Ein- und Austrittsdurchmessern sowie Konizität und Dicke der Schmelzrückstände bei Verwendung von Kreisbewegungen zusammengefasst.

Tabelle 8:  
Zusammenfassung geeigneter Parameter und der gemessenen Größen bei Verwendung von Kreisbewegungen

Parameter	Wert
Verfahrensbewegung	50 Kreise von außen nach innen (+ 50)
Repetitionsrate	715 kHz
Leistung	152 W
Wiederholungen	300
Bohrdauer	147 s
Verfahrgeschwindigkeit	200 mm/s (~ 72,4 mm/s*)
Fokusslage	$z = -1,5$ mm
Eintrittsdurchmesser	$(502,0 \pm 15,6)$ $\mu\text{m}$
Austrittsdurchmesser	$(335,2 \pm 5,5)$ $\mu\text{m}$
Konizität	$(5,56 \pm 0,55)$ %
Schmelzrückstände	$(18,8 \pm 4,1)$ $\mu\text{m}$

\* effektiv während des Bohrprozesses verfügbar resultierend aus den verwendeten Kreisbewegungen

- Repetitionsraten größer 715 kHz sind aufgrund thermischer Beeinflussung der Bohrungswände nicht geeignet.
- Im Folgenden werden die experimentellen Ergebnisse mit der Grenzfrequenz verglichen, die mithilfe der auf Seite 18 eingeführten Formel **5.3** berechnet werden kann.

5.3

$$f_{\text{rep}} = \left( \frac{4\pi^2 \lambda \sqrt{\kappa} (T_M - T_0) v_{\text{Scanner}}}{\tau_L A E_P 2W_0} \right)^{\frac{2}{7}}$$

Für die berechnete Grenzfrequenz<sup>13</sup> ergibt sich ein Wert von 933 kHz. Dieser Wert ist in derselben Größenordnung wie die experimentell ermittelte Grenzfrequenz (715 kHz). Die Differenz zwischen der analytisch berechneten und der experimentell ermittelten Grenzfrequenz ist vermutlich eine Folge der Vernachlässigung der Scan-to-Scan-Wärmeakkumulation. Eine analytische Berechnung der Scan-to-Scan-Wärmeakkumulation ist nicht bekannt.

<sup>13</sup> Die in der Berechnung verwendeten Werte sind: Schmelztemperatur  $T_M = 1712$  K [Bäu11]; Umgebungstemperatur:  $T_0 = 20$  °C = 293 K; Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(T = 0,5 * (T_M + T_0) = 1002,5$  K) = 0,246 W/cmK [GKM91]; Temperaturleitfähigkeit:  $\kappa(T = 0,5 * (T_M + T_0) = 1002,5$  K) = 0,0666 cm<sup>2</sup>/s [GKM91]; Laserpulsdauer  $\tau_L = 7,65$  ps; Absorptionsgrad  $A = 0,8$  [ARR08]; [KNT05]; [KMM02]; Pulsenergie  $E_P = 285$   $\mu\text{J}$ ; Verfahrgeschwindigkeit  $v_{\text{Scanner}} = 72,4$  mm/s; Fokussdurchmesser  $2W_0 = 75$   $\mu\text{m}$ .

## 5.2.2 Einfluss der Prozessgasart und des Prozessgasdrucks

Im Folgenden wird der Einfluss des koaxial zugeführten Prozessgases auf die Bohrungsgeometrie und die Bohrdauer untersucht. In Bild 57 sind Längsschliffe von Bohrungen ohne Verwendung von Prozessgas dargestellt. Zum Schutz der Scanneroptik vor ablatiertem Material wird Druckluft mittels einer Crossjetdüse zwischen Probe und Scanner-Optik geblasen, so dass ablatiertes Material aus den Bohrungen abgelenkt wird.

Bild 57: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die ohne Prozessgas bei mittleren Leistungen von 16 - 80 W erzielt werden

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Kein Prozessgas

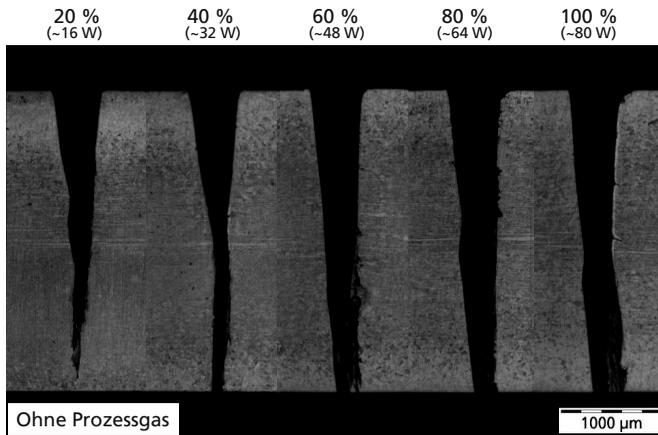
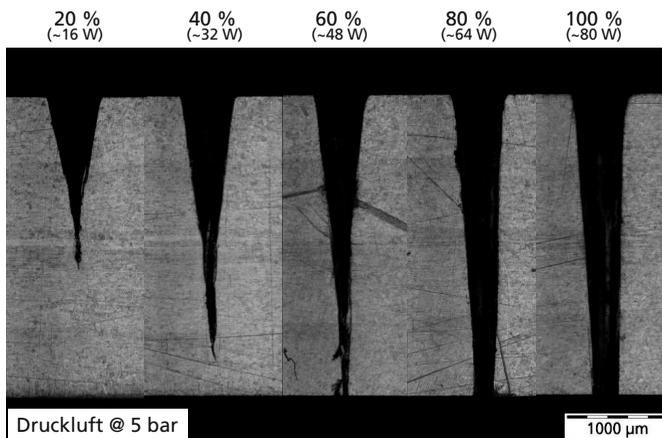


Bild 58: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit Druckluft als Prozessgas bei mittleren Leistungen von 16 - 80 W erzielt werden

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



Zum Vergleich sind in Bild 58 Längsschliffe von Bohrungen dargestellt, bei denen Druckluft mittels einer Prozessgasdüse bei einem Druck von 5 bar koaxial zur Laserstrahlung als Prozessgas verwendet wird. Bei kleinen Leistungen (20 % bis 40 %) wird festgestellt, dass die Bohrungstiefe von Bohrungen, die ohne Prozessgas erzielt werden, nach 147 s größer ist als bei Bohrungen, die mit Prozessgas erzielt werden. Bei Verwendung des Prozessgases Druckluft wird somit der Materialabtrag vor dem Durchbohren verkleinert. Grund hierfür sind unter anderem die durch das Prozessgas verursachten Verdichtungsstöße, die den Materialabtrieb aus der Bohrung verkleinern [Eng09]. Bei großen Leistungen (80 % und 100 %) vergrößert sich dagegen die Zylindrizität der Bohrungen durch Verwendung des Prozessgases Druckluft. Nach dem Durchbohren wird der Materialabtrieb nach unten aus der Bohrung durch das Prozessgas unterstützt, so dass Bohrungen mit geraden Bohrungswänden und vergrößerten Bohrungsausstritten entstehen. Bohrungen, die ohne Prozessgas erzielt werden, haben dagegen eine wellige Geometrie. Diese entsteht durch Reflexionen der Laserstrahlung an den schrägen Bohrungswänden und durch die Bildung von Plasmen innerhalb der Bohrung. Bei 100 % mittlerer Leistung werden in der ersten Hälfte der Bohrung Schmelzschichten sowie Risse an den Bohrungswänden festgestellt. Folglich ist die Verwendung von Prozessgas zwingend erforderlich, um thermisch nicht beeinflusste Bohrungen zu erzielen. Der Einfluss der Prozessgasart und des -drucks wird im Folgenden untersucht.

### **Einfluss der Prozessgasart**

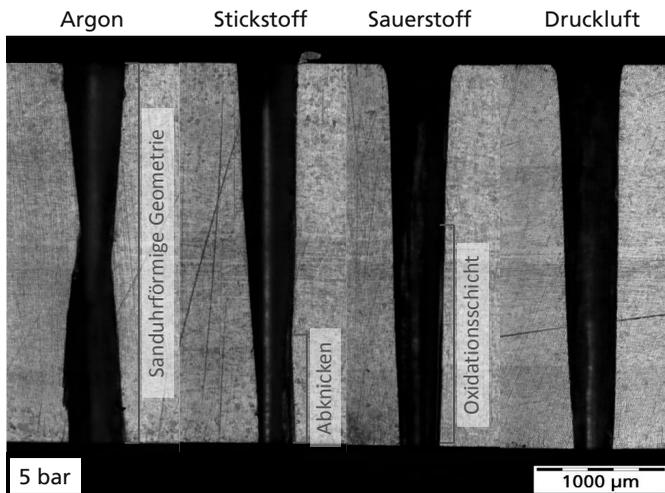
Um den Einfluss der Prozessgasart zu ermitteln, werden Bohrungen mit Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Druckluft bei einem Druck von jeweils 5 bar erzielt. In Bild 59 sind Längsschliffe der Bohrungen bei Verwendung der vier untersuchten Prozessgase gezeigt. Anstatt einer zylindrischen Bohrung entsteht bei Verwendung von Argon eine Bohrung in Sanduhrform, bei der der kleinste Bohrungsdurchmesser von ca. 300 µm etwa in der Mitte der Bohrung liegt. Neben den inerten Eigenschaften von Argon sind die durch das Prozessgas verursachten Verdichtungsstöße ein Grund hierfür. Die Verdichtungsstöße, die der Materialablation entgegenwirken, liegen bei Argon näher beieinander als zum Beispiel bei Sauerstoff [Eng09]. Durch Reflexionen der Laserstrahlung an den Bohrungswänden entsteht schließlich die sanduhrförmige Bohrungsgeometrie. Bei der mit Stickstoff erzielten Bohrung wird ebenfalls ein Abknicken im unteren Teil der Bohrung festgestellt.

Die Bohrungen mit Sauerstoff und Druckluft weisen die größte Zylindrizität auf. Bei Verwendung von Sauerstoff wird aufgrund der exothermen Reaktionsfähigkeit zusätzlich Energie in den Bohrprozess eingekoppelt, wodurch der Materialabtrag vergrößert wird und somit zylindrischere

Bohrungen erzielt werden. Bei der Bohrung mit Sauerstoff als Prozessgas wird in der unteren Hälfte eine Oxidationsschicht an der Bohrungswand festgestellt. Bei Verwendung von Druckluft ist die Bohrungsgeometrie symmetrisch und an den Bohrungswänden werden keine Ablagerungen wie Schmelzrückstände festgestellt.

Bild 59: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen mit den Prozessgasen Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Druckluft

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
 50 Kreise  
 300 Wdh.  
 147 s Bohrdauer  
 Gasdruck 5 bar



Die quantitative Auswertung der Schmelzrückstände an den Bohrungswänden in Abhängigkeit von der Prozessgasart ist in Bild 60 dargestellt. Die Schmelzrückstände sind mit durchschnittlich 16 µm maximaler Dicke bei Verwendung von Druckluft kleiner als bei Bohrungen, die mit Sauerstoff (45 µm), Stickstoff (59 µm) und Argon (71 µm) erzielt werden. Die Durchbohrdauern bei den verschiedenen Prozessgasen sind in Bild 61 dargestellt. Auch hier wird der exotherm reaktive Einfluss von Sauerstoff festgestellt, da die Durchbohrdauer mit ca. 33 s bei Verwendung von Sauerstoff am kleinsten ist. Aufgrund der kleinsten Dicke der Schmelzrückstände wird Druckluft als geeignetes Prozessgas festgelegt. [UFK14]; [UKK15a]; [UKK15b]; [Uch15]

Bild 60:  
Abhängigkeit der  
Schmelzrückstände  
von der  
Prozessgasart Argon,  
Stickstoff, Sauerstoff  
und Druckluft

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Gasdruck 5 bar

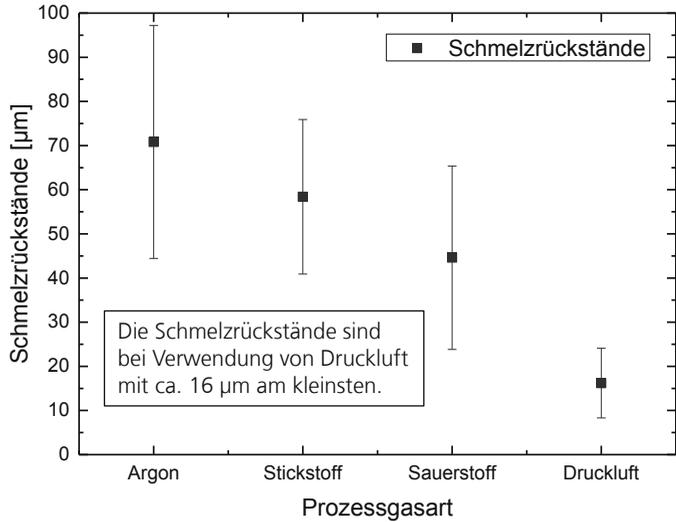
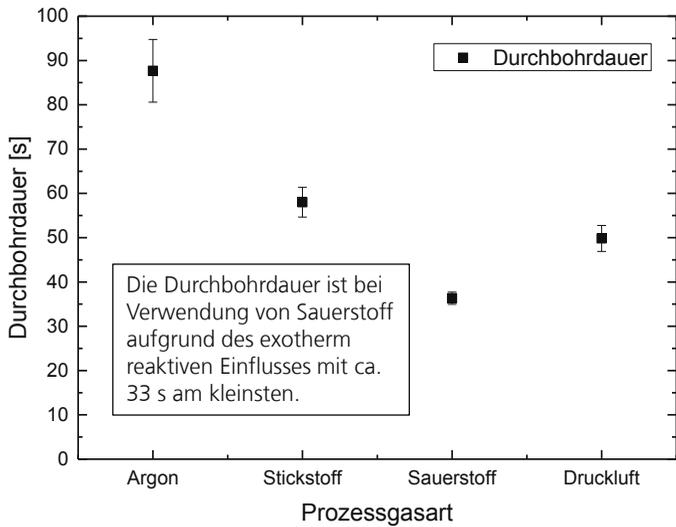


Bild 61:  
Abhängigkeit der  
Durchbohrdauer von  
der Prozessgasart  
Argon, Stickstoff,  
Sauerstoff und  
Druckluft

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
50 Kreise  
Gasdruck 5 bar

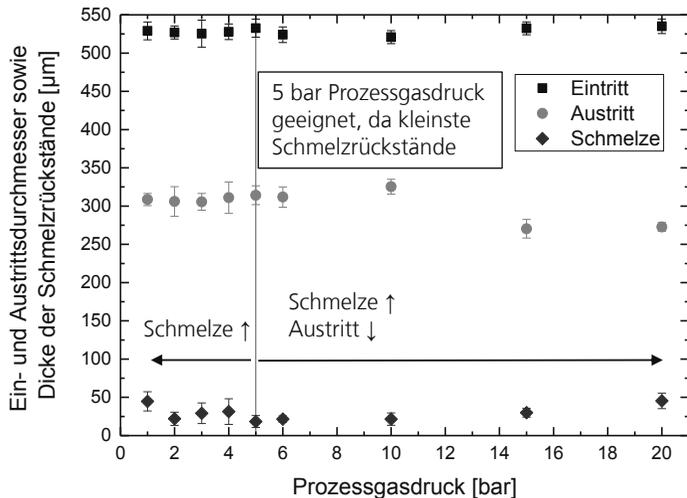


## Einfluss des Prozessgasdrucks

Im Folgenden wird der Einfluss des Prozessgasdrucks bei Verwendung von Druckluft auf die Bohrungsgeometrie sowie die Dicke der Schmelzrückstände untersucht. In Bild 62 sind die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Schmelzrückstände in Abhängigkeit des Prozessgasdrucks von 1 bis 20 bar dargestellt. Die Eintrittsdurchmesser sind nahezu unabhängig vom Prozessgasdruck. Die Austrittsdurchmesser sind bei Prozessgasdrücken von 1 bis 10 bar nahezu konstant 315  $\mu\text{m}$ . Bei Drücken größer 10 bar werden diese um ca. 50  $\mu\text{m}$  kleiner. Die Dicke der Schmelzrückstände variiert im Prozessgasdruckbereich von 1 bis 6 bar zwischen 15 und 50  $\mu\text{m}$ . Die Schwankungen sind jedoch nicht systematisch. Bei Drücken größer 10 bar werden die Schmelzrückstände bis zu 50  $\mu\text{m}$  größer bei einem Prozessgasdruck von 20 bar. Grund hierfür ist die größere Durchbohrdauer, die aus dem gegen den Materialaustrieb wirkenden größeren Prozessgasstrom resultiert. Zudem entstehen bei großen Prozessgasdrücken turbulente Strömungen an den Bohrungswänden, wodurch ein laminarer Austrieb des ablatierten Materials verkleinert wird. Aufgrund der kleinsten Schmelzrückstände von ca. 20  $\mu\text{m}$  wird ein Prozessgasdruck von 5 bar als geeignet festgelegt.

Bild 62: Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit des Prozessgasdrucks von 1 bis 20 bar

$f_{\text{rep}} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
 50 Kreise  
 300 Wdh.  
 147 s Bohrdauer  
 Druckluft



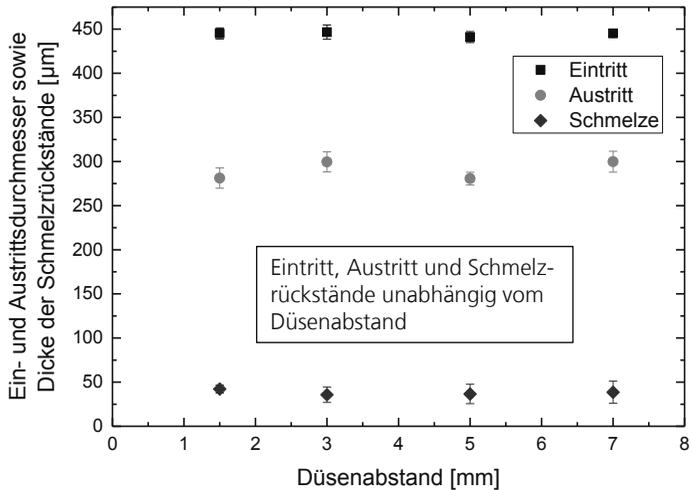
## Einfluss des Düsenabstands

Der Düsenabstand wird im Folgenden von 1,5 bis 7 mm variiert. Die Fokusslage der Laserstrahlung ist dabei konstant auf der Probenoberfläche positioniert. Die gemessenen Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit des Düsenabstands bei einem Prozessgasdruck von 5 bar sind in Bild 63 dargestellt. Die gemessenen Größen sind nahezu unabhängig vom eingestellten Düsenabstand. Die Ausbreitung des Gasvolumenstroms in radiale Richtung zwischen Düse und Werkstück ist bei den verwendeten Düsenabständen vernachlässigbar klein, so dass keine signifikante Verkleinerung des koaxialen Volumenstroms erfolgt.

Für die Herstellung von Bohrungen mit kleinen Neigungswinkeln zur Probenoberfläche wie z.B.  $30^\circ$  ist diese Unabhängigkeit vorteilhaft. Damit die Düse bei solchen Neigungswinkeln nicht mit dem Werkstück kollidiert, muss der Düsenabstand auf bis zu 7 mm vergrößert werden. Da dies keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Bohrungen hat, kann der Düsenabstand zwischen 1,5 mm und 7 mm beliebig gewählt werden.

Bild 63: Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit des Düsenabstands von 1,5 bis 7 mm

$f_{\text{rep}} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
 50 Kreise  
 300 Wdh.  
 147 s Bohrdauer  
 Druckluft 5 bar



**Zwischenfazit:**

- Die Verwendung von Prozessgas ist zwingend erforderlich, um eine symmetrische Bohrungsgeometrie ohne thermische Beeinflussung der Bohrungswände zu erzielen.
- Druckluft ist ein geeignetes Prozessgas. Bei Verwendung inerter Prozessgase wie Argon oder Stickstoff entstehen asymmetrische Bohrungsgeometrien, Schmelzrückstände bis zu 90 µm sowie Durchbohrdauern bis zu 90 s. Mit Sauerstoff ist die Durchbohrdauer mit 33 s um rund 15 Sekunden kleiner als bei Verwendung von Druckluft. Die Ein- und Austrittsdurchmesser sind vergleichbar. An den Bohrungswänden befinden sich jedoch durchgehende Oxidationsschichten, so dass Sauerstoff ungeeignet ist.
- Ein Prozessgasdruck von 5 bar ist geeignet. Bei kleineren (z.B. 1 bar) oder größeren Drücken (z.B. 10 bar) entstehen Schmelzrückstände bis zu 50 µm Größe. Bei weiterer Vergrößerung des Drucks bis zu 20 bar wird der Austrittsdurchmesser der Bohrungen um ca. 50 µm kleiner.
- Sowohl die Bohrungsgeometrie als auch die Schmelzrückstände sind unabhängig vom Düsenabstand im Bereich von 1,5 mm bis 7 mm.

**5.2.3 Einfluss der Abtragstrategie**

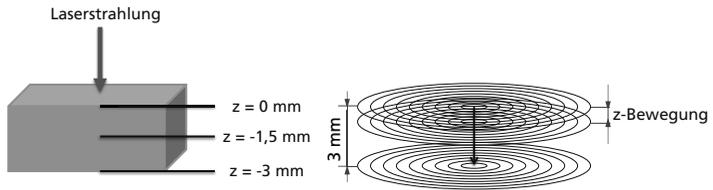
Die Abtragstrategie hat beim Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse, da durch eine geeignete Verfahrensbewegung der Laserstrahlung die örtliche Laserpuls-zu-Laserpuls-Überlagerung und somit die thermisch induzierten Defekte beeinflusst werden. Dazu werden im Folgenden der Einfluss der Fokusslage in Richtung der Laserstrahlung sowie einer spiralförmigen Verfahrensbewegung der Laserstrahlung auf die Bohrungsergebnisse untersucht.

**Einfluss der Fokusslage**

Da aufgrund der Strahlpropagation die Fokusslage für die Materialbearbeitung relevant ist, werden die Einflüsse verschiedener Fokusslagen auf die Bohrungsergebnisse untersucht. Zum einen werden Bohrungen mit festen Fokusslagen erzielt (Bild 64 links). Dabei wird die Fokusslage der Laserstrahlung entweder auf die Probenoberfläche ( $z = 0$  mm), in die Mitte der Probe ( $z = -1,5$  mm) oder auf die Probenunterseite ( $z = -3$  mm) positioniert. Weiterhin

werden Bohrungen mit dynamischer Anpassung der Fokusslage synchron zum Bohrprozess durchgeföhrt. Dabei befindet sich die Fokusslage zu Beginn des Bohrprozesses auf der Probenoberfläche und wird schrittweise in z-Richtung nachgeföhrt, so dass am Ende des Bohrprozesses die Fokusslage auf der Probenunterseite positioniert ist (Bild 64 rechts). Als dritte Variante wird im ersten Teil des Bohrprozesses durch Perkussionsbohren in möglichst kurzer Zeit durch das Probenmaterial durchgebohrt. Anschließend werden Kreisbewegungen durchgeföhrt. Das ablatierte Material kann somit direkt nach dem Durchbohren der Probe nach unten aus der Bohrung ausgetrieben werden.

Bild 64:  
Schematische  
Darstellung der  
Position der  
Fokusslage ohne  
(links) und mit  
dynamischer  
Anpassung der  
Fokusslage (rechts)



In Bild 65 sind die Ergebnisse der verschiedenen Positionierungen des Fokus zusammengefasst dargestellt. Dabei beträgt die Bohrdauer zu Vergleichszwecken bei allen Positionierungen 147 s. Die Eintrittsdurchmesser betragen bei allen Positionierungen ca. 500  $\mu\text{m}$ . Bei den Bohrungen ohne Fokussnachföhung sind bei einer Fokusslage von  $z = 0 \text{ mm}$  und  $z = -3 \text{ mm}$  die Austrittsdurchmesser am kleinsten (169  $\mu\text{m}$  bzw. 213  $\mu\text{m}$ ) und die Schmelzrückstände am größten (66  $\mu\text{m}$  bzw. 99  $\mu\text{m}$ ). Somit sind diese beiden festen Fokusslagen ungeeignet, um möglichst zylindrische, thermisch wenig belastete Bohrungen zu erzielen. Bei Positionierung der Fokusslage in die Mitte der Bohrung ( $z = -1,5 \text{ mm}$ ), bei Durchföhung einer Fokussnachföhung und bei der Perkussionsbohrung sind die Austrittsdurchmesser ( $\sim 240 \mu\text{m}$ ) und Schmelzrückstände ( $\sim 54 \mu\text{m}$ ) ähnlich groß.

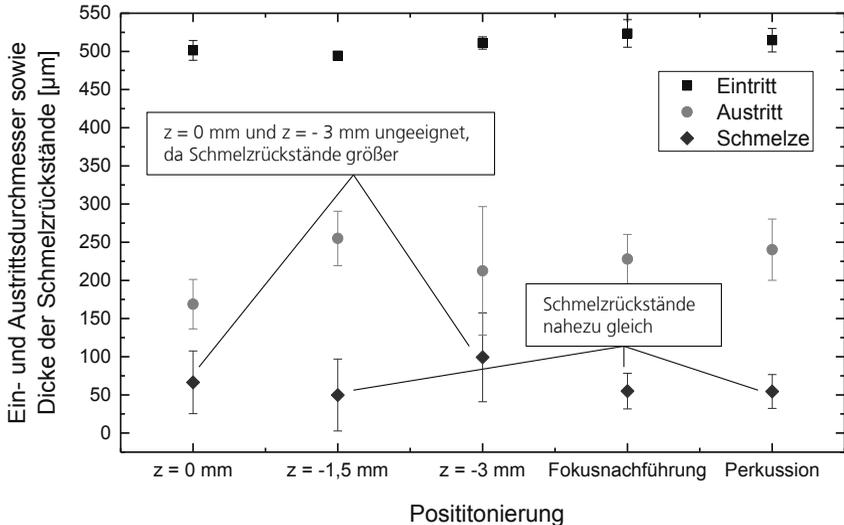


Bild 65: Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände bei Variation der Verfahrensbewegung ( $f_{rep} = 238$  kHz;  $P = 80$  W; 50 Kreise; 300 Wdh.; 147 s Bohrdauer; Druckluft)

Bei einer Aufsicht auf die Bohrungseintritte dieser drei Verfahrensbewegungen werden jedoch Unterschiede festgestellt (Bild 66). Die ovale Form der Bohrungseintritte ist eine Folge von Leckleistung der Laserstrahlquelle. Dies wird im folgenden Abschnitt erklärt. Bei der Perkussionsbohrung wird eine ausgeprägte thermische Beeinflussung der Probenoberfläche festgestellt. Daher wird diese Verfahrensbewegung nicht weiter betrachtet.

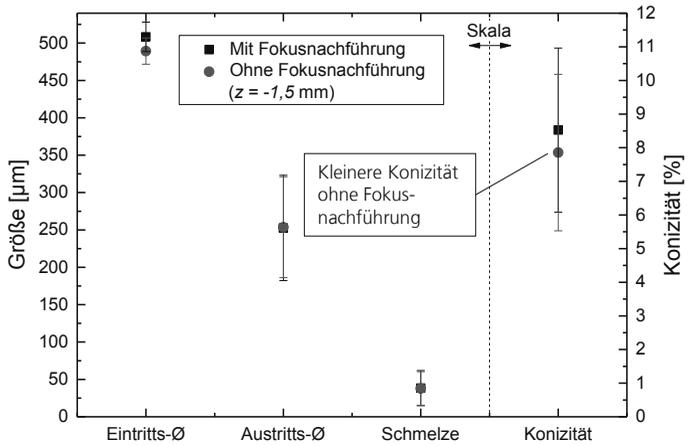
Bild 66: Aufsicht auf Bohrungseintritte, die ohne Fokuspnachführung (links), mit Fokuspnachführung (mitte) und zu Beginn mit einer Perkussionsbohrung (rechts) erzielt werden



Im Folgenden werden die Verfahrensbewegungen mit Fokuspnachführung und ohne Fokuspnachführung mit Fokuspposition  $z = -1,5$  mm detaillierter untersucht. In Bild 67 sind Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Dicke der Schmelzrückstände und die entsprechenden Konizitäten von jeweils 115

Bohrungen zusammengefasst. Diese 115 Bohrungen werden bei unterschiedlichen Leistungen (63 - 192 W) und Repetitionsraten (238 - 715 kHz) erzielt. Die gemittelten Ergebnisse gelten somit für einen großen Leistungs- und Repetitionsratenbereich. Folglich sind die Standardabweichungen groß.

Bild 67: Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände und Konizität von jeweils 115 Bohrungen mit und ohne Fokussachführung



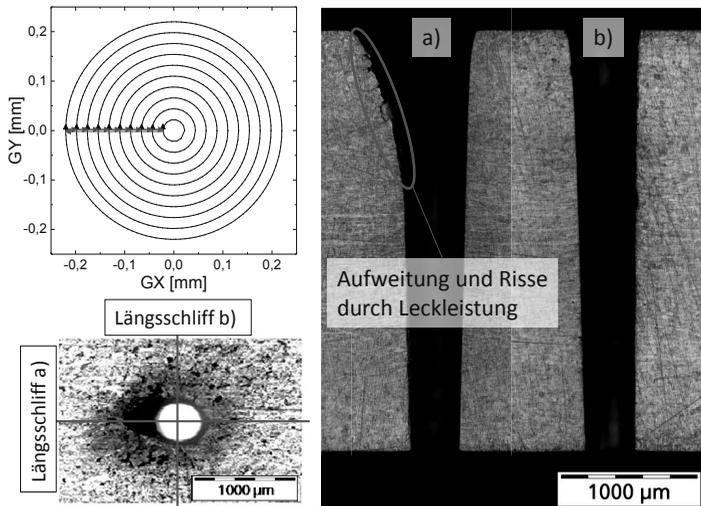
Im Mittel sind die Eintrittsdurchmesser bei Bohrungen mit Fokussachführung um 19 µm größer als bei Bohrungen ohne Fokussachführung. Die Austrittsdurchmesser unterscheiden sich in der Größe nur um etwa 1 µm. Demzufolge haben die mit Fokussachführung erzielten Bohrungen (8,5 %) eine größere Konizität als die ohne Fokussachführung erzielten Bohrungen (7,9 %). Die Schmelzrückstände sind für beide Positionierungen nahezu identisch (38 µm). Somit wird zusammenfassend aufgrund der kleineren Konizität die Herstellung der Bohrungen ohne Fokussachführung mit fester Fokusposition bei  $z = -1,5$  mm als geeignet festgelegt. [UFK14] [Uch15]

### Einfluss der Leckleistung der Laserstrahlquelle

Aufgrund der Verwendung der InnoSlab-Technologie zur Verstärkung der ultrakurzen Laserpulse in der Laserstrahlquelle, wird trotz geschlossenem EOM Leckleistung aus der Laserstrahlquelle emittiert. Durch Leckleistung wird die Bohrungsqualität bezüglich Geometrie und wärmebeeinflussten Bereichen wie Schmelzrückständen an den Bohrungswänden verkleinert. In Bild 68 sind die Auswirkungen der umgebungsabhängigen Leckleistung, die teilweise über 20 W beträgt, auf die Bohrungsgeometrie dargestellt.

Bild 68: Einfluss der Leckleistung: Bei einem Längsschliff entlang der Verfahrbewegung der Laserstrahlung mit Leckleistung wird am Bohrungseintritt an einer Seite eine Aufweitung und Risse in der Bohrungswand festgestellt (a). Bei einem Längsschliff orthogonal zur Verfahrbewegung der Laserstrahlung wird am Bohrungseintritt keine Aufweitung festgestellt (b).

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
 50 Kreise  
 300 Wdh.  
 147 s Bohrdauer  
 Druckluft 5 bar



Zwischen den einzelnen Kreisbahnen wird die Laserstrahlung mit geschlossenem EOM verfahren. In dieser Zeit wird die Probenoberfläche mit der Leckleistung bestrahlt. Da das Springen zwischen den einzelnen Kreisen immer in dieselbe Richtung erfolgt, wird nur in diese Richtung zusätzliches Material abgetragen. Am Bohrungseintritt entstehen in diese Richtung eine Aufweitung und Risse an der Bohrungswand (Bild 68 Längsschliff a).

Bei allen bisher dargestellten Längsschliffen wurde der Einfluss der Leckleistung vernachlässigt, indem die Schlicfrichtung orthogonal zur Verfahrbewegung zwischen den Kreisen (Bild 68 Längsschliff b)) positioniert wurde. In diese Richtung wird keine Aufweitung festgestellt. Zur Vermeidung eines Einflusses der vorhandenen Leckleistung muss auf ein Springen zwischen den Kreisen bei geschlossenem EOM verzichtet werden. Dazu wird im Folgenden die Verwendung von Spiralbewegungen untersucht, bei denen ein Springen nicht erforderlich ist.

### Bohrungen mittels Spiralbewegungen

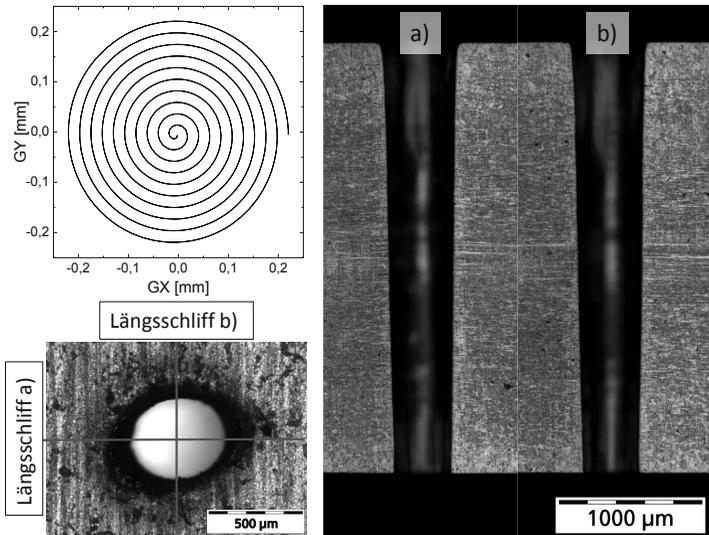
Im Folgenden wird der Einfluss von Spiralbewegungen anstatt von Kreisbewegungen auf die Bohrungsergebnisse untersucht. Durch die Verwendung von Spiralbewegungen ist das Springen zwischen den Kreisen mit geschlossenem EOM nicht erforderlich, so dass keine Verkleinerung der

metallurgischen Qualität am Bohrungseintritt durch emittierte Leckleistung zu erwarten ist.

In Bild 69 ist die Verfahrbewegung von zehn Spiralbahnen dargestellt. Weiterhin sind eine Aufsicht auf einen Bohrungseintritt sowie zwei Längsschliffe von Bohrungen dargestellt, die mittels dieser Spiralbewegung erzielt werden. Unabhängig von der Schliffrichtung werden keine Aufweitungen oder Risse an den Bohrungseintritten festgestellt.

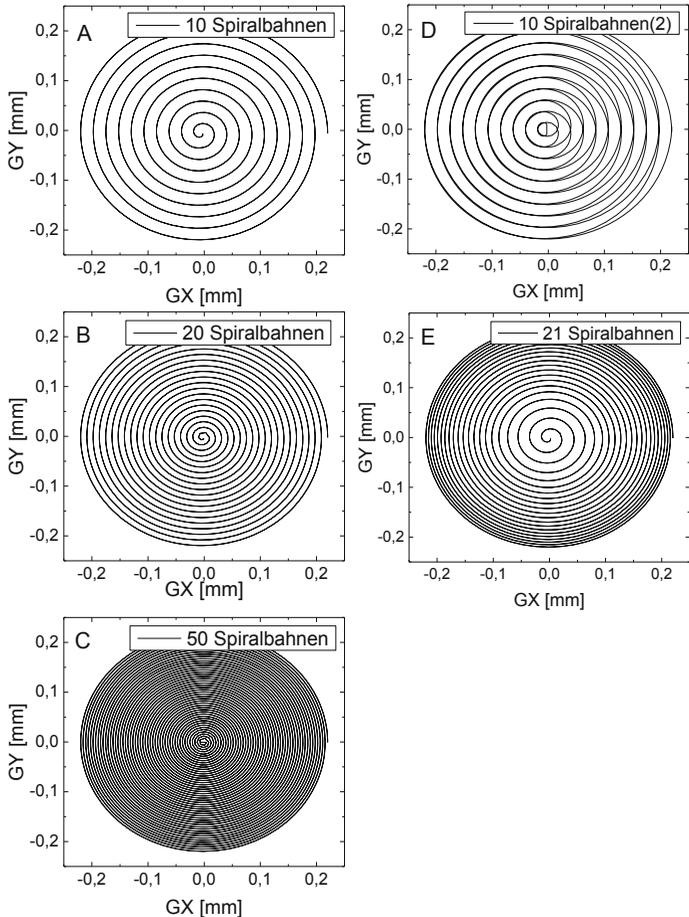
Bild 69:  
Schematische Darstellung einer Verfahrbewegung von zehn Spiralbahnen ineinander (oben links). Aufsicht auf einen Bohrungseintritt (unten links) und geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mittels Spiralbewegungen erzielt werden (rechts).

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
10 Spiralen  
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



Im Folgenden wird der Einfluss von fünf verschiedenen Spiralbewegungen (Bild 70) auf die Dicke von Schmelzrückständen und die Konizität von Bohrungen untersucht.

Bild 70:  
Schematische  
Darstellungen von  
fünf verschiedenen  
Spiralbewegungen.  
GX und GY sind  
dabei die  
Verfahrsachsen des  
Galvo-Scanners



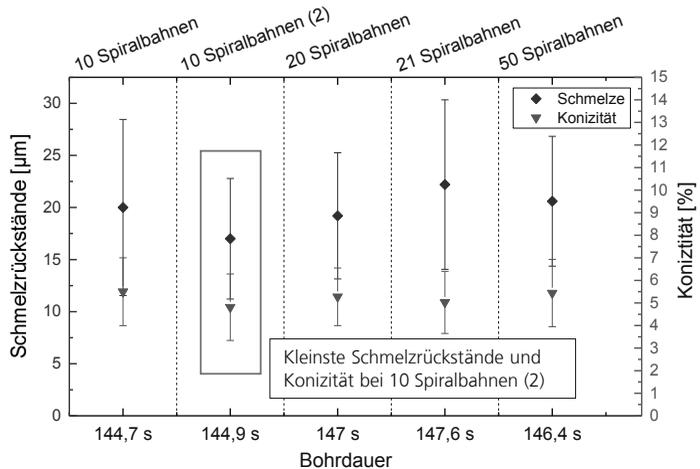
Bei den Spiralbewegungen in Bild 70 A - C erfolgen 10, 20 bzw. 50 Spiralsbahnen ineinander. Dabei wird die Laserstrahlung nach Verfahren der Spiralsbahnen von außen nach innen auf demselben Weg in entgegengesetzte Richtung von innen nach außen zurückgeführt, so dass kein Springen mit geschlossenem EOM zwischen den Spiralsbahnen erforderlich ist. Bei der Spiralbewegung „10 Spiralsbahnen (2)“ in Bild 70 D wird der Rückweg der

zehn Spiralbahnen von innen nach außen um die GY-Richtung gespiegelt. Hierdurch wird eine Verfahrbewegung mit konstanter Geschwindigkeit erwartet, da ein Abbremsen und Beschleunigen des Scanners am Ende jeder Spirale nicht erforderlich ist. Die Spiralbewegung in Bild 70 E besteht aus 21 Spiralbahnen, die innen weiter auseinander liegen und außen näher zusammenliegen. Hierdurch wird mehr Laserstrahlung auf den äußeren Bereich der Bohrung geführt, wodurch der Bohrungsaustritt potentiell vergrößert wird. Aufgrund der unterschiedlichen Bahnlängen der einzelnen Spiralbewegungen werden zu Vergleichszwecken die Wiederholungen der Spiralbewegungen so gewählt, dass die Bohrdauer jeweils ca. 147 s beträgt.

In Bild 71 sind die Schmelzrückstände und Konizitäten für die fünf Spiralbewegungen A - E bei einer Bohrdauer von ca. 147 s quantitativ dargestellt. Bei allen Spiralbewegungen sind die Schmelzrückstände etwa 20 µm und die Konizitäten etwa 5 %. Bei der Spiralbewegung „10 Spiralbahnen (2)“ sind die Schmelzrückstände (17 µm) und die Konizität (4,8 %) am kleinsten, da bei dieser Bewegung die Laserstrahlung kontinuierlich mit konstanter Geschwindigkeit verfahren wird. Diese Spiralbewegung wird im Folgenden weiter untersucht.

Bild 71: Schmelzrückstände und Konizitäten von Bohrungen, die mit den fünf verschiedenen Spiralbewegungen und einer Bohrdauer von etwa 147 s erzielt werden

$f_{rep} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
 147 s Bohrdauer  
 Druckluft 5 bar

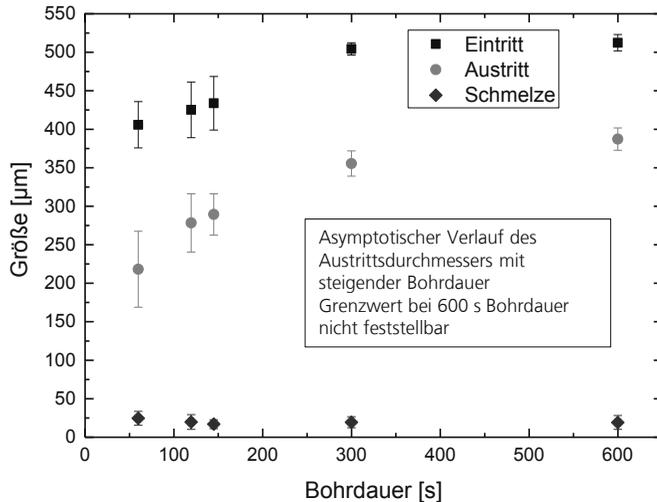


Zur Ermittlung der Abhängigkeit der Ergebnisse von der Bohrdauer sind in Bild 72 die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Schmelzrückstände von Bohrungen der Verfahrbewegung „10 Spiralbahnen (2)“ bei einer Bohrdauer im Bereich 60 - 600 s dargestellt. Mit größerer Bohrdauer werden Ein- und Austrittsdurchmesser größer. Ein asymptotisches Verhalten des

Austrittsdurchmessers wird festgestellt, der asymptotische Grenzwert ist jedoch bei einer Bohrdauer von zehn Minuten noch nicht bestimmbar. Die Schmelzrückstände sind bohrdauerunabhängig ca. 20  $\mu\text{m}$  groß.

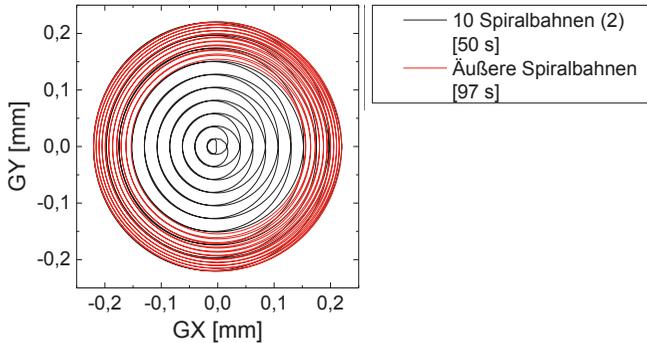
Bild 72: Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände in Abhängigkeit der Bohrdauer für die Spiralbewegung „10 Spiralbahnen (2)“

$f_{\text{rep}} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
 10 Spiralbahnen (2)  
 147 s Bohrdauer  
 Druckluft 5 bar



Eine Verlängerung der Bohrdauer auf zehn Minuten ist eine unwirtschaftliche Möglichkeit zur Verkleinerung der Konizität. Um große Bohrdauern zu vermeiden, wird bei unveränderter Bohrdauer (ca. 147 s) eine weitere Spiralbewegung (Bild 73) mit dem Ziel Verkleinerung der Konizität durch Vergrößerung des Austrittsdurchmessers untersucht. Diese Verfahrensbewegung ist eine Kombination aus der Verfahrensbewegung „10 Spiralbahnen (2)“ und einem Verfahren von äußeren Spiralbahnen. Bei dieser Spiralbewegung erfolgt die ersten 50 Sekunden die Spiralbewegung „10 Spiralbahnen (2)“, wobei nach etwa 32 Sekunden das Probenmaterial durchbohrt wird. In den restlichen 97 Sekunden wird die Laserstrahlung gemäß den äußeren Spiralbahnen (Bild 73, rote Spiralbahnen) verfahren. Dadurch wird die Laserstrahlung nach dem Durchbohren vor allem auf die Bohrungswände geführt, wodurch eine Vergrößerung des Austrittsdurchmessers erwartet wird.

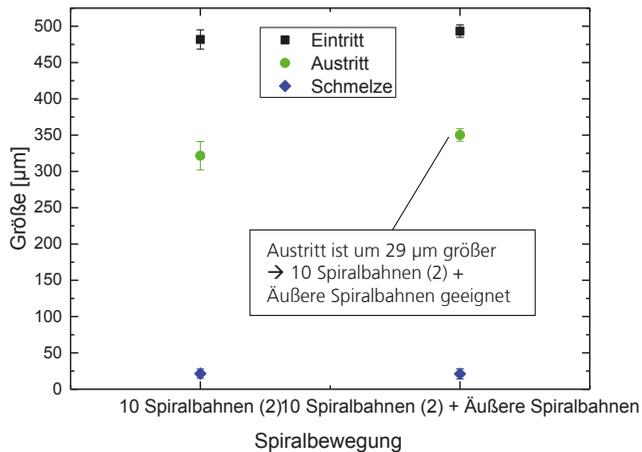
Bild 73:  
Schematische Darstellung einer Verfahrensbewegung, die die Verfahrensbewegung „10 Spiralbahnen (2)“ und äußere Spiralbahnen kombiniert. GX und GY sind dabei die Verfahrachsen des Galvo-Scanners



In Bild 74 sind die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände der beiden Spiralbewegungen „10 Spiralbahnen (2)“ und „10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen“ nebeneinander dargestellt. Wie erwartet, ist der Austrittsdurchmesser bei der Verfahrensbewegung „10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen“ um 29  $\mu\text{m}$  größer als bei der Verfahrensbewegung „10 Spiralbahnen (2)“. Der Unterschied bei den Eintrittsdurchmessern beträgt 11  $\mu\text{m}$ . Die Schmelzrückstände sind nahezu gleich groß. Abschließend wird somit die Spiralbewegung „10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen“ aufgrund der kleineren Konizität der Bohrungen als geeignet festgelegt. [UKK15a]; [UKK15b]

Bild 74: Vergleich der Ein- und Austrittsdurchmesser sowie der Schmelzrückstände für die Spiralbewegungen „10 Spiralbahnen (2)“ und „10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen“

$f_{\text{rep}} = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 80 \text{ W}$   
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



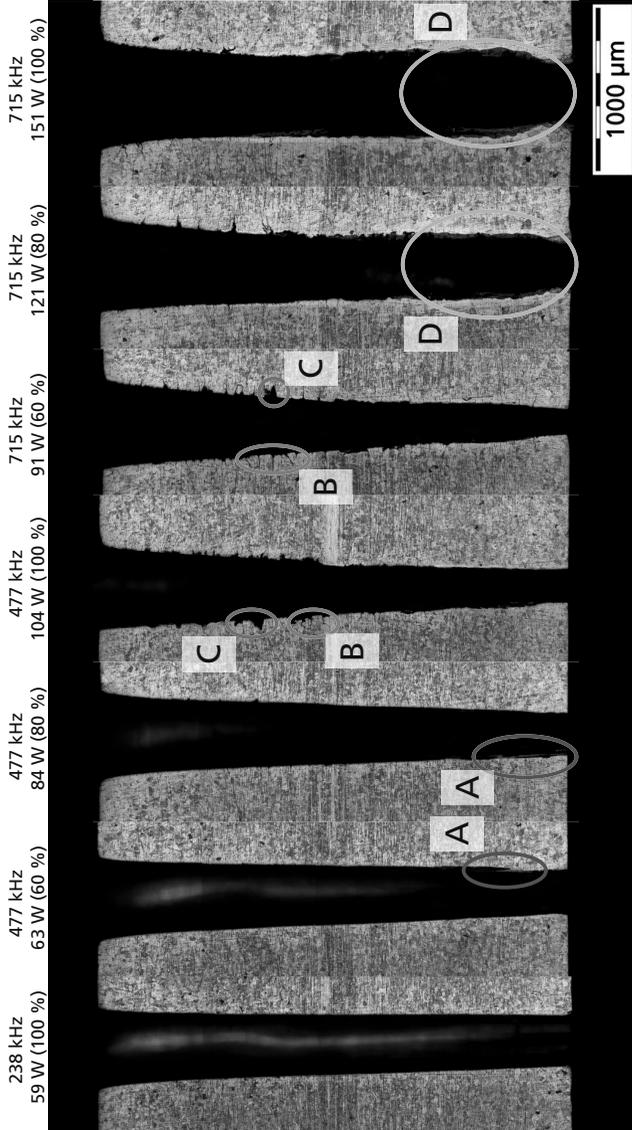
### **Zusätzliche Variation der Repetitionsrate und der Laserleistung bei Verwendung der Spiralbewegung**

Die bisher dargestellten Ergebnisse von Bohrungen mit Spiralbewegungen sind bei einer Repetitionsrate von 238 kHz und 100 % Leistung (ca. 80 W) erzielt. In Bild 75 sind Längsschliffe von Bohrungen mit variierten Repetitionsraten und Laserleistungen dargestellt, bei denen die Spiralbewegung „10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen“ verwendet wird. Bei Repetitionsraten größer 238 kHz werden die Bohrungswände aufgrund von Wärmeakkumulation zunehmend thermisch beeinflusst. In den Längsschliffen der Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 477 kHz erzielt werden, werden Schmelzrückstände (Bild 75, A), Risse (Bild 75, B) und Einbrände (Bild 75, C) an den Bohrungswänden festgestellt.

Bei Repetitionsraten von 715 kHz entsteht vor dem Durchbohren ein Plasma im unteren Teil der Bohrung. Das Probenmaterial wird vor dem Durchbohren stark erhitzt, so dass für ca. zehn Sekunden an der Probenunterseite ein Glühen auftritt. Erst anschließend wird das Probenmaterial durchbohrt. Als Resultat dieses Effekts wird eine Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers von etwa 200 µm oberhalb der Probenunterseite festgestellt (Bild 75, D). Im Bereich dieser Aufweitungen werden Schmelz- und Oxidationsschichten an den Bohrungswänden festgestellt. Trotz fast dreimal größerer Leistung ist die Durchbohrdauer nahezu identisch zum Bohrprozess mit 238 kHz.

Somit wird bei einem Bohrprozess mittels Spiralbewegungen eine Repetitionsrate von 238 kHz und 80 W Leistung als geeignet definiert.

Bild 75: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mittels Spiralbewegungen bei Variation der Repetitionsrate und der mittleren Leistung erzielt werden: Bei großen Repetitionsraten werden thermische Einflüsse an den Bohrungswänden in Form von Schmelzschichten (A), Rissen (B), Einbränden (C) und Plasmaaufweitungen (D) festgestellt



## Zusammenfassung geeigneter Parameter

Eine Zusammenfassung der in Kapitel 5.2 für Schritt 2 ermittelten geeigneten Verfahrensparameter ist in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9:  
Zusammenfassung  
geeigneter  
Parameter für das  
Bohren mit  
ultrakurz-gepulster  
Laserstrahlung  
(Schritt 2)

Parameter	Spiralbewegungen
Verfahrbewegung	10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen
Wiederholungen	690 + 765
Repetitionsrate	238 kHz
Mittlere Leistung	80 W
Verfahrgeschwindigkeit	200 mm/s
Fokuslage	$z = -1,5 \text{ mm}$
Prozessgasart	Druckluft
Prozessgasdruck	5 bar
Bohrdauer	147 s

Die verwendeten Repetitionsraten bei Spiralbewegungen unterscheiden sich um einen Faktor drei von den Kreisbewegungen (238 kHz statt 715 kHz). Die effektiv gemessenen mittleren Leistungen liegen dagegen mit 80 W bzw. 65 W in derselben Größenordnung. Somit ist neben der von der Repetitionsrate abhängigen Laserpuls-zu-Laserpuls-Wärmeakkumulation vor allem die Scan-to-Scan-Wärmeakkumulation für eine vergrößerte thermische Beeinflussung relevant. Während eine Scanwiederholung bei Kreisbewegungen in 0,49 s erfolgt, erfolgt eine Scanwiederholung bei Spiralbewegungen in 0,07 s. Die Laserstrahlung trifft also nach kürzerer Zeit wieder auf die gleiche Stelle an der Bohrungswand.

## Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit werden 55 Bohrungen mit den Verfahrensparametern gemäß Tabelle 6 mittels Spiralbewegungen bzgl. Ein- und Austrittsdurchmesser sowie der mittleren Dicke der Schmelzrückstände analysiert (Bild 76). Die mittlere Dicke der Schmelzrückstände wird durch das arithmetische Mittel aus jeweils drei Messungen an unterschiedlichen Stellen innerhalb einer Bohrung bestimmt. In Tabelle 10 sind die resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen aufgeführt.

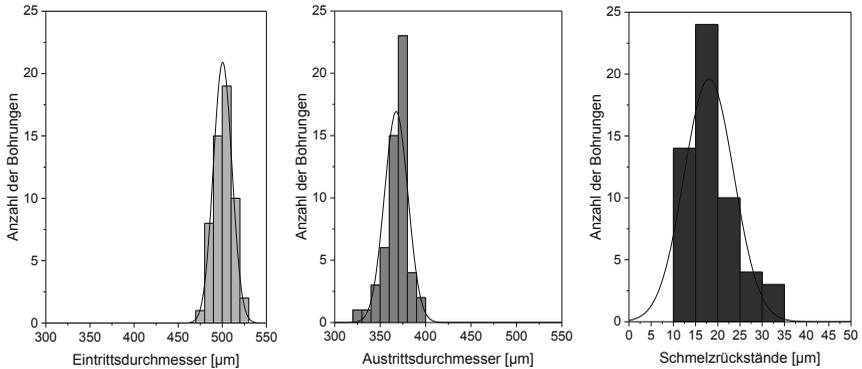


Bild 76: Statistische Verteilungen der Ein- (links) und Austrittsdurchmesser (mitte) sowie der Schmelzrückstände (rechts) für 55 Bohrungen

Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichungen für Ein- und Austrittsdurchmesser, Konizität sowie der Schmelzrückstände für 55 Bohrungen

Größe	Mittelwert	Standardabweichung
Eintrittsdurchmesser	500 µm	10,5 µm
Austrittsdurchmesser	368 µm	13,0 µm
Konizität	4,43 %	0,56 %
Schmelzrückstände	18 µm	5,6 µm

**Fazit:**

- Spiralbewegungen sind für das Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung geeignet, da ein Einfluss der Leckleistung der Laserstrahlung vermieden wird. Die Spiralbewegung sollte direkt nach dem Durchbohren des Werkstücks auf äußere Spiralbahnen geändert werden, so dass die Laserstrahlung zur Vergrößerung des Austrittsdurchmessers vor allem auf die Bohrungswände positioniert wird.
- In Bild 77 sind Makroaufnahmen von Bohrungen dargestellt, die bei der Untersuchung der Reproduzierbarkeit erzielt werden. Im Vergleich zu Schritt 1 entstehen keine durchgängigen Schmelzschichten an den Bohrungswänden. An dem Großteil der Bohrungswände werden keine thermischen Beeinflussungen festgestellt (a). An lokal begrenzten Bereichen der Bohrungswände werden thermische

86 Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren

Beeinflussungen bzgl. Schmelzrückständen (b) und c)), Rissbildung (d)) und Einbrände (e)) festgestellt.

- Die Einteilung der Ergebnisse von Schritt 2 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität sind im Vergleich zu Schritt 1 und zum Stand der Technik in Bild 78 dargestellt.

Bild 77: Thermisch unbeeinflusste Bohrungswand a) und thermisch beeinflusste Bohrungswände: Schmelzrückstände b) & c), Risse d) und Einbrände e)

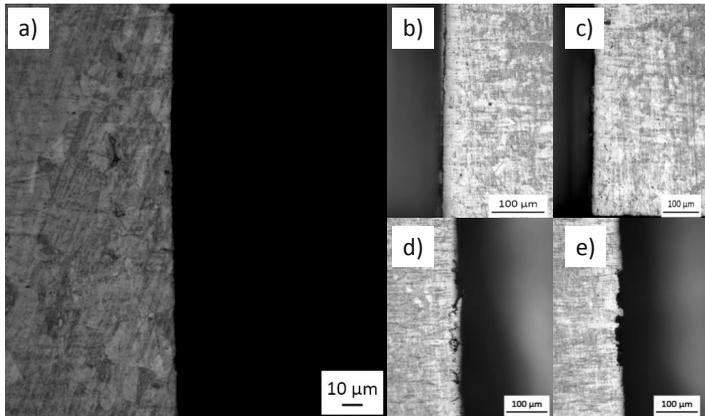
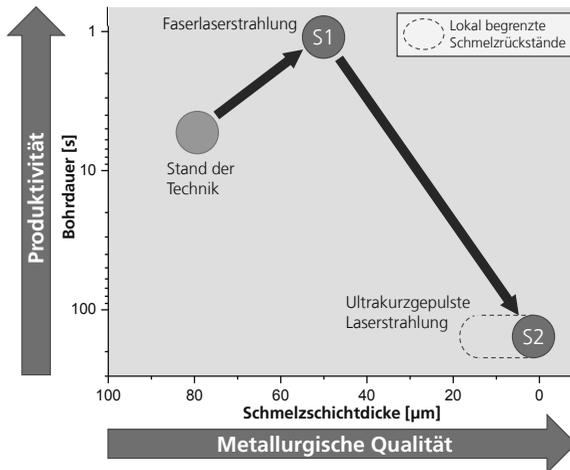


Bild 78: Einteilung des Bohrverfahrens mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung von Schritt 2 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität im Vergleich zu Schritt 1 sowie zum Stand der Technik



### 5.3 Schritt 3: Hybrider Bohrprozess

Die Ergebnisse der in Schritt 1 und Schritt 2 grundlegend entwickelten Bohrprozesse sind in Bild 79 anhand von geätzten Längsschliffen mit Angabe der jeweiligen Bohrdauern gegenübergestellt. Die Bohrung mit Faserlaserstrahlung (Bild 79 links) kann mit einer Bohrdauer kleiner 1 s erzielt werden. Allerdings befindet sich an den Bohrungswänden eine bis zu 50 µm dicke Schmelzschicht. Rechts in Bild 79 ist eine Bohrung dargestellt, die mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung in ca. 147 s erzielt wird. An den Bohrungswänden werden weder Schmelzschichten oder Risse festgestellt.

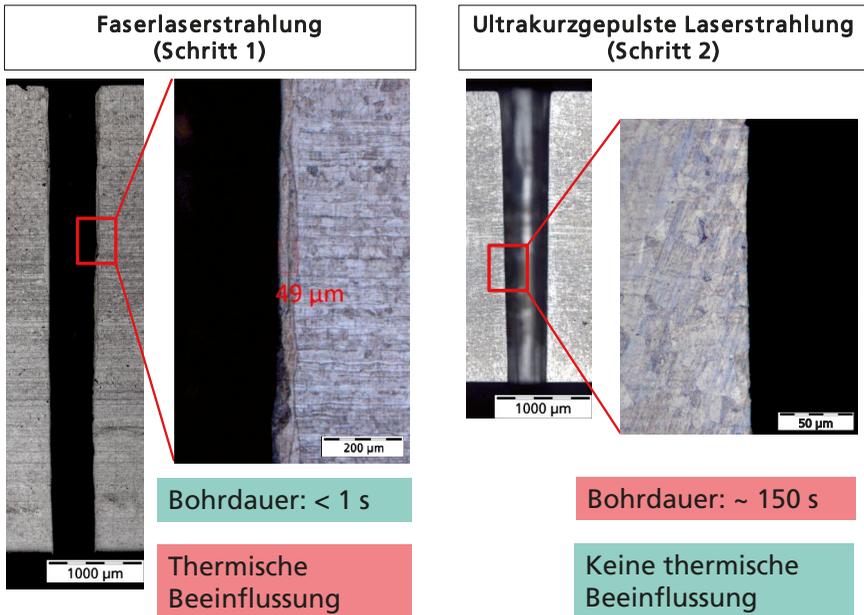
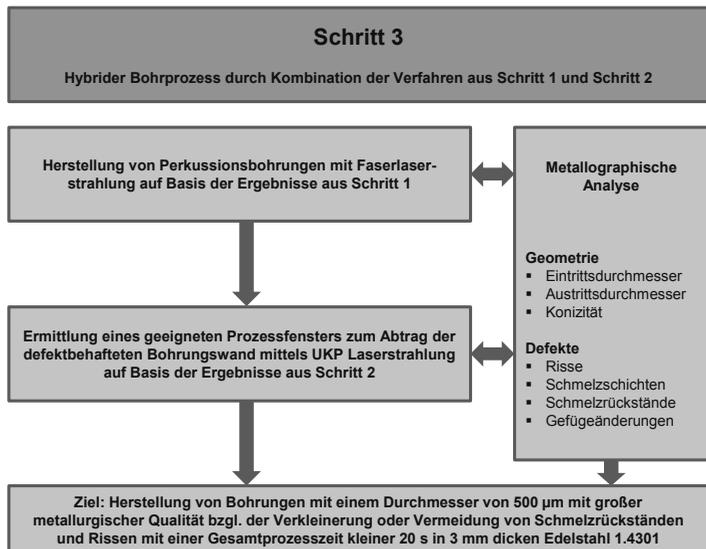


Bild 79: Geätzte Längsschliffe mit Makroaufnahmen einer mit Faserlaserstrahlung erzielten Bohrung (links) und einer mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung erzielten Bohrung (rechts)

Da eine Bohrdauer von 150 s für das Bohren z.B. von Turbinenschaufeln mit einigen 100 Kühlluftbohrungen zu groß ist, werden im Folgenden die Vorteile beider Bohrprozesse - große Produktivität (Faserlaserstrahlung, Bohrdauer kleiner 1 s) sowie große metallurgische Qualität (ultrakurzgepulste Laserstrahlung, keine thermische Beeinflussung) - kombiniert. Dazu wird in diesem Schritt ein hybrider Bohrprozess entwickelt und angewandt. Zunächst

wird eine Vorbohrung mit Faserlaserstrahlung auf Basis der Ergebnisse aus Schritt 1 erzielt. Die defektbehaftete Schmelzschicht an der Bohrungswand wird mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung in einem nachfolgenden Prozessschritt abgetragen. Die experimentelle Vorgehensweise von Schritt 3 ist in Bild 80 dargestellt.

Bild 80:  
Flussdiagramm zur  
experimentellen  
Vorgehensweise von  
Schritt 3



### 5.3.1 Vorbohren mit Faserlaserstrahlung

Die Vorbohrungen sollen mit möglichst kleiner Bohrdauer mittels Faserlaserstrahlung erzielt werden. Analog zu Schritt 2 soll die Bohrungstiefe 3 mm betragen. Daher werden zunächst die in Schritt 1 ermittelten Verfahrensparameter gemäß Tabelle 8 für das Bohren mittels Faserlaserstrahlung auf Edelstahl 1.4301 mit einer Materialstärke von 3 mm übertragen. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Prozesses bzgl. der um 2 mm kleineren Materialdicke im Vergleich zu Schritt 1 werden 30 Bohrungen analysiert. In Bild 81 sind die statistischen Verteilungen der Ein- und Austrittsdurchmesser sowie der Schmelzschichtdicken dargestellt. In Tabelle 11 sind die resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen aufgeführt. Ein Längsschliff einer Vorbohrung und eine Nahaufnahme der Bohrungswand mit einer Schmelzschicht mit einer Dicke bis zu 60 µm sind in Bild 82 dargestellt. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit Schritt 1. Die

Austrittsdurchmesser sind aufgrund der kleineren Bohrungstiefe im Mittel um 16 µm größer. Die Bohrdauer beträgt 0,5 s.

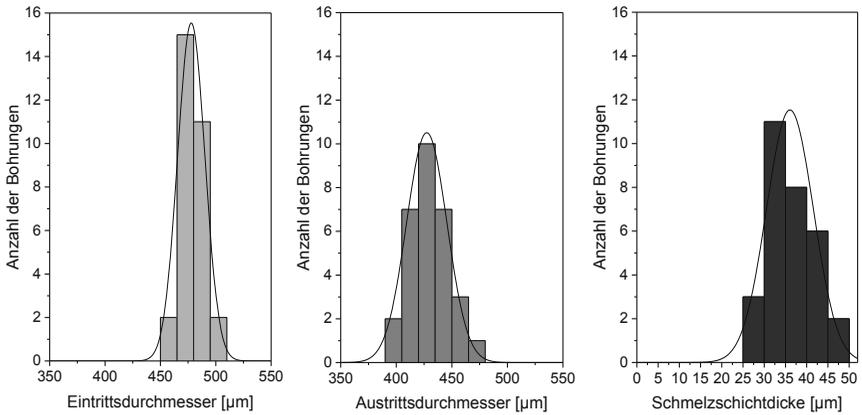
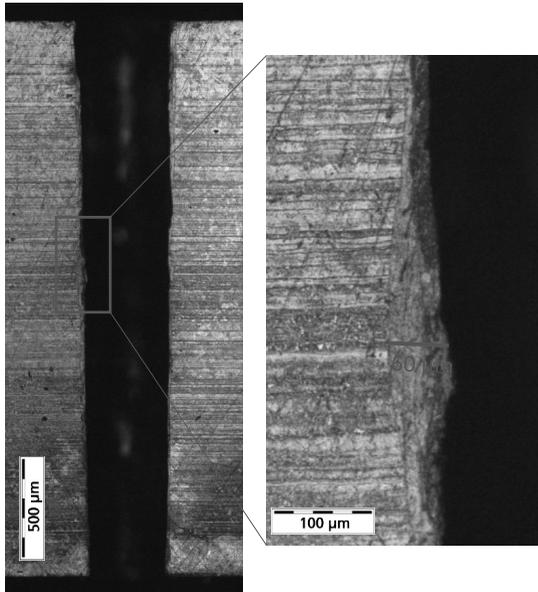


Bild 81: Statistische Verteilung der Ein- (links) und Austrittsdurchmesser (mitte) sowie der Schmelzschichtdicken (rechts) für 30 Bohrungen

Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichungen für Ein- und Austrittsdurchmesser, Konizität und Schmelzschichtdicke für 30 Bohrungen

Größe	Mittelwert	Standardabweichung
Eintrittsdurchmesser	477 µm	11,2 µm
Austrittsdurchmesser	428 µm	17,2 µm
Konizität	1,63 %	0,7 %
Schmelzschichtdicke	36 µm	5,5 µm

Bild 82: Geätzter Längsschliff einer Vorbohrung mit Faserlaserstrahlung (links) sowie Nahaufnahme der Bohrungswand mit bis zu 60  $\mu\text{m}$  dicker Schmelzschicht (rechts)



### 5.3.2 Abtrag der defektbehafteten Schmelzschichten

Im Folgenden werden die Schmelzschichten an den Bohrungswänden mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung abgetragen. Dazu wird der Einfluss der Abtragstrategie bzgl. des Durchmessers der verwendeten Spiralverfahrbewegung sowie der Einfluss der Verfahrensparameter Repetitionsrate, mittlere Laserleistung und Bearbeitungsdauer untersucht. Für alle Versuche wird analog zu Schritt 2 eine feste Pulsdauer von 7,65 ps und als Prozessgas Druckluft mit einem Gasdruck von 5 bar verwendet. Die Verfahrensgeschwindigkeit der Laserstrahlung beträgt 200 mm/s.

Für den Abtrag der Schmelzschichten muss die Probe nach dem Vorbohren mit Faserlaserstrahlung an einem zweiten Versuchsaufbau für ultrakurzgepulste Laserstrahlung neu ausgerichtet werden. Bedingt durch den Wechsel des Versuchsaufbaus können zwei Fehler entstehen, durch die das Bearbeitungsergebnis beeinflusst wird:

1. Abweichung der Bohrungsmittelpunkte: Bei der Ausrichtung der Probe zur Bearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung kann eine Abweichung

zum Mittelpunkt der Vorbohrung auftreten, so dass der Materialabtrag nicht koaxial zur Mittelachse der Vorbohrung erfolgt (Bild 83 links).

**2. Abweichung der Bohrungswinkel:** Durch fehlerhaftes Ausrichten der Probe bzgl. des Bohrungswinkels zur Richtung der ultrakurzgepulsten Laserstrahlung wird die bestrahlte Fläche auf einer Seite der Bohrung kleiner. Die gegenüberliegende Seite wird stärker bestrahlt, so dass der Abtrag größer als auf der anderen Seite ist (Bild 83 rechts).

Die einzelnen Abweichungen oder eine Überlagerung beider Abweichungen resultiert in einem ungleichmäßigen Materialabtrag an gegenüberliegenden Bohrungswänden. Dies ist anhand eines Längsschliffs in Bild 83 mittig dargestellt. Bei dieser Beispielbohrung ist die Abweichung so groß, dass die Bohrung nicht entlang der gesamten Bohrungstiefe nachbearbeitet wird. Daher werden im Folgenden die Schmelzrückstände in dem Bereich des Bohrungslängsschliffs gemessen, der von der ultrakurzgepulsten Laserstrahlung bearbeitet wird.

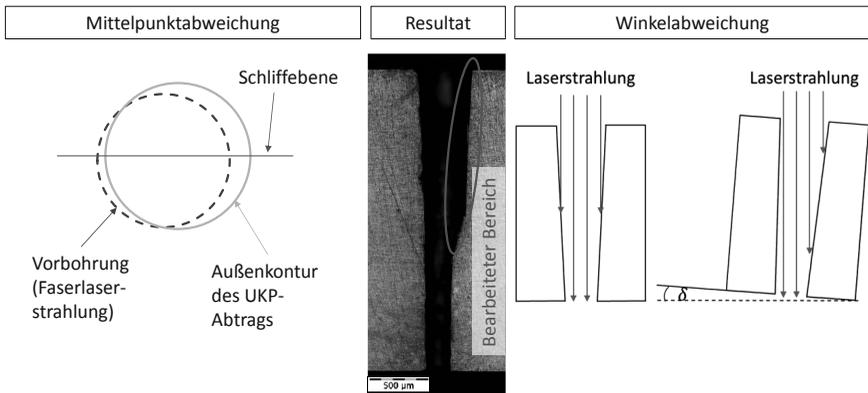
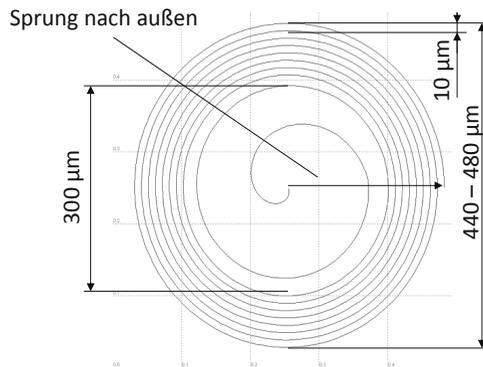


Bild 83: Schematische Darstellung der möglichen Fehler durch falsches Ausrichten der Probe: 1. Abweichung der Bohrungsmittelpunkte (links); 2. Abweichung der Bohrungswinkel (rechts); resultierende Beeinflussung der Bohrungsergebnisse dargestellt anhand eines Längsschliffs mit Markierung des bearbeiteten Bereichs (Mitte)

### 5.3.2.1 Einfluss der Abtragstrategie

In die mittels Faserlaserstrahlung erzielten Vorbohrungen soll die ultrakurzgepulste Laserstrahlung vor allem auf die Bohrungswände positioniert werden, um die Schmelzschichten abzutragen. Daher wird im Folgenden eine Spiralverfahrbewegung von außen nach innen auf Basis der Ergebnisse von Schritt 2 verwendet. Die verwendete spiralförmige Geometrie ist in Bild 84 schematisch dargestellt. Der Abstand zwischen zwei Bahnen der Spiralen beträgt  $10\ \mu\text{m}$ . Die innenliegende Spiralbahn hat einen Durchmesser von  $300\ \mu\text{m}$ .

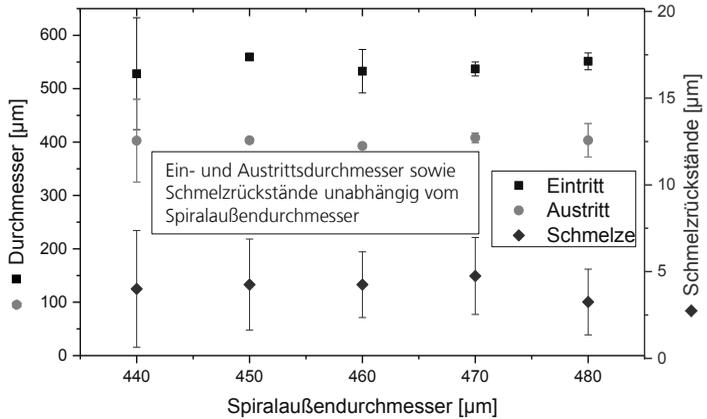
Bild 84:  
Schematische  
Darstellung der  
verwendeten  
Spiralverfah-  
bewegung von  
außen nach innen  
zum Abtrag der  
Schmelzschichten



Zur Ermittlung eines geeigneten Außendurchmessers wird dieser in einem Bereich von  $440\ \mu\text{m}$  bis  $480\ \mu\text{m}$  variiert. In Bild 85 sind die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Dicken der Schmelzrückstände von Bohrungen in Abhängigkeit des Spiralaußendurchmessers dargestellt. Die verwendete Repetitionsrate der Laserstrahlung beträgt  $715\ \text{kHz}$  und die mittlere Leistung  $200\ \text{W}$ . Eine Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser vom Spiralaußendurchmesser wird nicht festgestellt. Die mittlere Dicke der Schmelzrückstände ist bei allen untersuchten Spiraldurchmessern mit  $4\ \mu\text{m}$  nahezu konstant groß. Somit ist die Dicke der Schmelzrückstände unabhängig vom Spiralaußendurchmesser. Für alle weiteren Versuche wird im Folgenden ein Spiralaußendurchmesser von  $450\ \mu\text{m}$  verwendet.

Bild 85:  
Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit vom Spiralaußendurchmesser

$f_{rep} = 715 \text{ kHz}$   
 $P = 200 \text{ W (100\%)}$   
Anzahl Spiralen: 100  
Bearbeitungsdauer: 8 s  
5 bar Druckluft



### 5.3.2.2 Einfluss der Verfahrensparameter

Im Folgenden wird der Einfluss der Verfahrensparameter

- Repetitionsrate,
- mittlere Leistung und
- Bearbeitungsdauer

auf das Bearbeitungsergebnis untersucht.

#### Einfluss der Repetitionsrate und der Laserleistung

Die Repetitionsrate und die Leistung haben einen Einfluss auf die durch Wärmeakkumulation bedingte thermische Belastung der Bohrungswände. Im Folgenden wird der Einfluss auf die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Dicke der Schmelzrückstände und eventuelle Rissbildung untersucht. Die Repetitionsrate wird im Bereich zwischen 100 kHz und 1,43 MHz variiert. Für jede Repetitionsrate werden Versuche mit einer mittleren Leistung zwischen 50 % und 100 % durchgeführt.

#### Repetitionsrate 1430 kHz

Bei Verwendung einer Repetitionsrate von 1,43 MHz sind 100 % der mittleren Laserleistung (400 W) verfügbar. Bei Bohrungen, die mit 100 % Leistung bearbeitet werden, werden an der gesamten Bohrungswand bis zu 60 µm tiefe Risse festgestellt (Bild 86). Diese Risse sind in der REM-Aufnahme

des Längsschliffs (a) sowie einer Nahaufnahme der Bohrungswand (b) dargestellt. Die mittlere Dicke der Schmelzrückstände beträgt  $7\ \mu\text{m}$ .

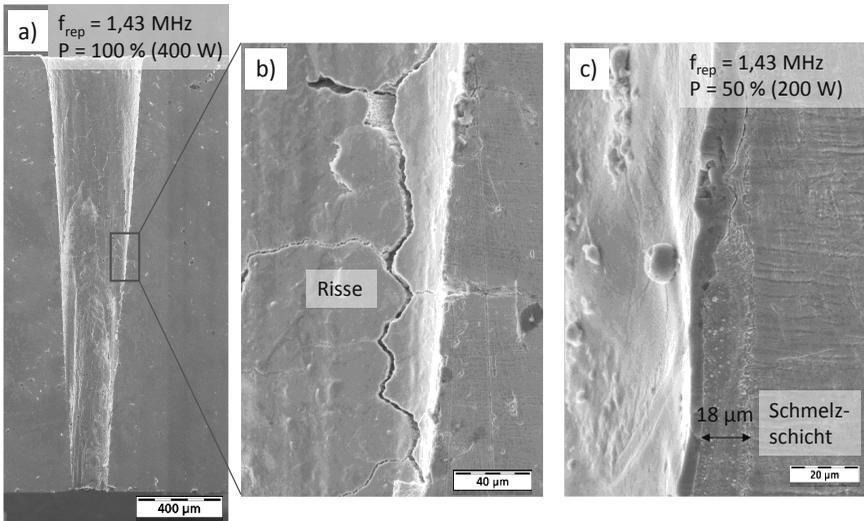


Bild 86: REM-Aufnahmen eines Längsschliffs einer Bohrung, die mit  $f_{\text{rep}} = 1,43\ \text{MHz}$  und 100 % Leistung (400 W) erzielt wird (a) sowie Nahaufnahme der rissbehafteten Bohrungswand (b); Schmelzschicht (c) einer Bohrung, die mit  $f_{\text{rep}} = 1,43\ \text{MHz}$  und 50 % Leistung (200 W) erzielt wird. (188 Spiralen, 15 s Bearbeitungszeit, 5 bar Druckluft)

Durch Verkleinerung der Leistung auf 50 % (200 W) entsteht eine bis zu  $20\ \mu\text{m}$  dicke Schmelzschicht an der Bohrungswand (Bild 86 c). Unabhängig von der mittleren Leistung ist die Laserpuls-zu-Laserpuls Überlagerung bei einer Repetitionsrate von  $1,43\ \text{MHz}$  zu groß, so dass durch Wärmeakkumulation thermische Effekte wie Schmelzschichten oder Risse an der Bohrungswand auftreten. Analog zu den Ergebnissen von Schritt 2 wird eine Repetitionsrate von  $1,43\ \text{MHz}$  als ungeeignet festgelegt. [UKK15a]

### Repetitionsrate 100 kHz

Bei einer Repetitionsrate von 100 kHz ist die Laserpuls-zu-Laserpuls Überlagerung kleiner als bei einer Repetitionsrate von  $1,43\ \text{MHz}$ , so dass die thermische Beeinflussung kleiner ist. In Bild 87 ist eine REM-Aufnahme eines Längsschliffs einer Bohrung dargestellt, die mit einer Repetitionsrate von 100 kHz sowie 100 % Leistung (29 W) erzielt wird. An der Bohrungswand werden weder Risse noch Schmelzrückstände festgestellt. Die Laserfluenz reicht aufgrund der kleinen verfügbaren mittleren Leistung (29 W) jedoch

nicht aus, um einen vollständigen Abtrag der Schmelzschichten entlang der gesamten Bohrungstiefe zu erzielen. Der bearbeitete Bereich ist ca. 1,3 mm tief.

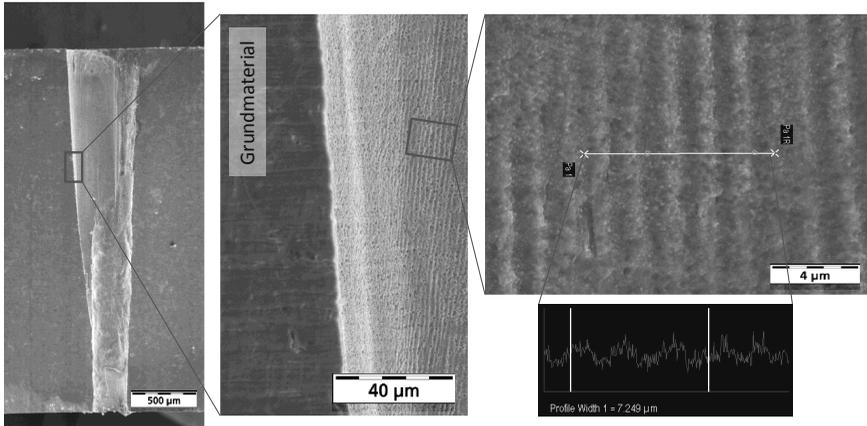


Bild 87: REM Aufnahme eines Längsschliffs einer Bohrung, die mit 100 kHz und 100 % Leistung (29 W) mit 300 Spiralwiederholungen (23 s) erzielt wird mit einer Nahaufnahme der Bohrungswand sowie einer Nahaufnahme von Riffelbildung an der Bohrungswand und Vermessung des Höhenprofils der Riffel

Weiterhin entstehen beim Bohrprozess mit einer Repetitionsrate von 100 kHz rillenartige Strukturen auf der bearbeiteten Bohrungswand. Diese sind in den Nahaufnahmen (Bild 87) dargestellt. Der gemessene Abstand zwischen den Rillen beträgt  $1,81 \pm 0,1 \mu\text{m}$ . Dies ist in der Größenordnung der Länge  $l_{puls}$ , die dem örtlichen Abstand zwischen zwei Pulsen der Laserstrahlung aufgrund der Verfahrensbewegung des Galvoscanners entspricht. Die Länge  $l_{puls}$  kann mittels Formel 5.4 berechnet werden.

5.4

$$l_{puls} = v_{scan} \cdot \frac{1}{f_{rep}} \approx 2 \mu\text{m}$$

Die Verfahrensgeschwindigkeit des Galvoscanners beträgt  $v_{scan} = 200 \text{ mm/s}$  und die Repetitionsrate  $f_{rep} = 100 \text{ kHz}$ . Somit wird ein örtlicher Abstand zwischen zwei Pulsen von ca.  $2 \mu\text{m}$  erzielt.

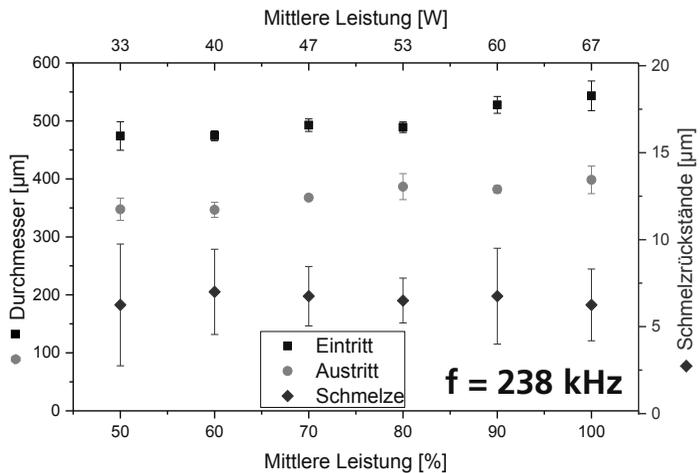
Sowohl aufgrund der nicht ausreichenden Bearbeitungstiefe als auch aufgrund der rillenartigen Strukturen an der Bohrungswand wird eine Repetitionsrate von 100 kHz als ungeeignet festgelegt. Daher wird im Folgenden der Bereich zwischen 100 kHz und 1,43 MHz untersucht. [UKK15b]

### Repetitionsrate 238 kHz

Bei einer Repetitionsrate von 238 kHz ist eine mittlere Leistung von maximal 67 W verfügbar. Die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Dicke der Schmelzrückstände sind in Abhängigkeit von der mittleren Leistung in Bild 88 dargestellt.

Bild 88: Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung

f = 238 kHz  
Anzahl Spiralen: 188  
Bearbeitungsdauer: 15 s  
5 bar Druckluft

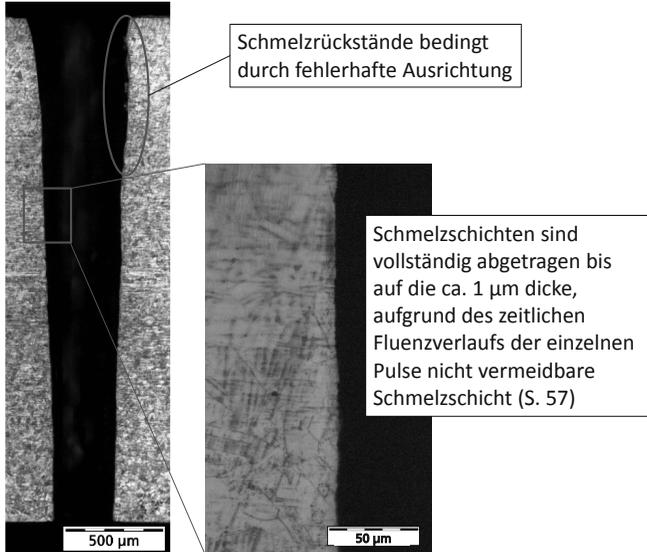


Die Schmelzrückstände sind mit ca. 6 µm bei allen Bohrungen unabhängig von der mittleren Leistungen annähernd gleich groß. Wie zuvor werden die Ein- und Austrittsdurchmesser mit größerer Leistung bis 67 W tendenziell größer (540 µm bzw. 395 µm), da eine größere Fluenz verfügbar ist. Die kleinsten Konizitäten mit 3,4 % werden mit einer Leistung von 80 % erzielt. Ein Längsschliff dieser Bohrung ist in Bild 89 dargestellt. An der Bohrungswand werden keine Schmelzrückstände oder Risse festgestellt. Bei dieser Bohrung ist bedingt durch die Ausrichtung der Probe eine Abweichung der Bohrungsmittelpunkte aufgetreten, da an der Bohrungswand oben rechts Schmelzrückstände festgestellt werden.

Aufgrund der kleinen Konizität wird eine Repetitionsrate von 238 kHz mit 80 % mittlerer Leistung (53 W) für das Abtragen der Schmelzschichten als geeignet festgelegt. [UKK15b]

Bild 89:  
Längsschliff sowie  
Nahaufnahme einer  
Bohrung, die mit  
einer Repetitionsrate  
von 238 kHz erzielt  
wird

$f = 238 \text{ kHz}$   
 $P = 53 \text{ W (80 \%)}$   
Anzahl Spiralen: 188  
Bearbeitungsdauer:  
15 s  
5 bar Druckluft

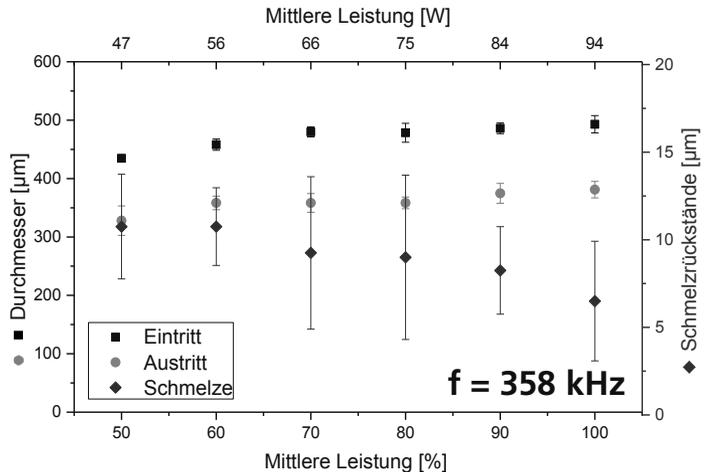


### Repetitionsraten 358 kHz, 476 kHz und 715 kHz

Die Ein- und Austrittsdurchmesser sowie die Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung bei einer Repetitionsrate von 358 kHz sind in Bild 90 dargestellt. Die Schmelzrückstände betragen bei Leistungen zwischen 50 % (47 W) und 90 % (94 W) bis zu 11 µm. Die Vergrößerung der Schmelzrückstände um 5 µm im Vergleich zu einer Repetitionsrate von 238 kHz resultiert aus einer größeren Wärmeakkumulation in den Bohrungen aufgrund der größeren Laserpuls-zu-Laserpuls-Überlagerung. Bei weiterer Vergrößerung der Repetitionsraten auf 476 kHz oder 715 kHz werden unabhängig von der Leistung teilweise bis zu 20 µm lange Risse in der Bohrungswand festgestellt. Die Verwendung einer Repetitionsrate größer 238 kHz wird somit als ungeeignet festgelegt. Die detaillierten Messungen von Ein- und Austrittsdurchmessern sowie der Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung bei Repetitionsraten von 476 kHz und 715 kHz sind in Bild 101 und Bild 102 im Anhang dargestellt. [UKK15b]

Bild 90:  
Ein- und  
Austrittsdurchmesser  
sowie Dicke der  
Schmelzrückstände  
in Abhängigkeit von  
der mittleren  
Leistung

f = 358 kHz  
Anzahl Spiralen: 188  
Bearbeitungsdauer:  
15 s  
5 bar Druckluft

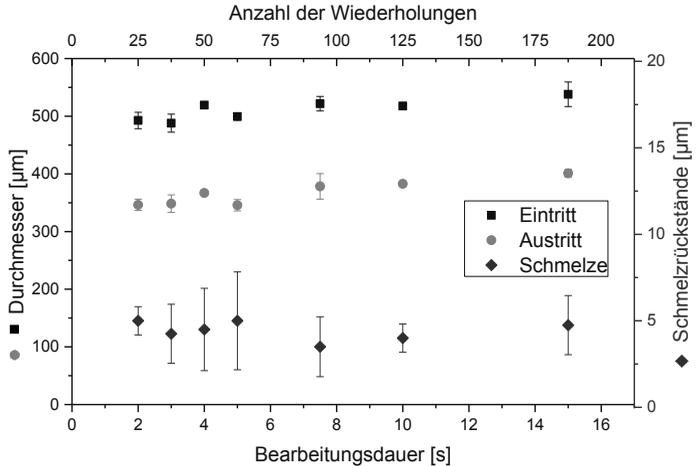


### Einfluss der Bearbeitungsdauer

Im Folgenden soll die kleinste erforderliche Bearbeitungsdauer ermittelt werden. Untersucht werden Bearbeitungsdauern zwischen 2 und 15 s. Dabei erfolgen 25 Spiralwiederholungen innerhalb von 2 s. In Bild 91 ist die Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser sowie der Dicke der Schmelzrückstände von der Bearbeitungsdauer sowie der Anzahl der Spiralwiederholungen bei einer Repetitionsrate von 238 kHz und 67 W Leistung (100 %) dargestellt.

Bild 91:  
Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der Bearbeitungsdauer

f = 238 kHz  
P = 67 W (100 %)  
5 bar Druckluft



Durch eine Vergrößerung der Bearbeitungsdauer von 2 s auf 15 s werden die Bohrungseintritte um 25 µm und die Bohrungsausritte um 35 µm vergrößert. Bei größerer Bearbeitungsdauer bis zu 15 s wird somit mehr Material an den Bohrungswänden abgetragen. Im Bereich zwischen 2 s und 5 s wird ein Abtrag der Schmelzschichten im oberen Teil der Bohrung von bis zu 22 µm festgestellt. Dies entspricht einer Verkleinerung der mittleren Schmelzschichtdicke um 88 %. Allerdings werden bei allen Bearbeitungsdauern kleiner als 10 s die Bohrungswände nicht über die gesamte Bohrungstiefe bearbeitet. In Bild 92 ist mittig ein Längsschliff einer Bohrung mit einer Bearbeitungsdauer von 7,5 s dargestellt. Bei dieser Bohrung ist aufgrund einer Abweichung der Bohrungsmittelpunkte nur die linke Bohrungswand bearbeitet. Im oberen Bereich der Bohrung (Bild 92 links) wird eine glatte Struktur der Bohrungswand festgestellt. Die wärmebeeinflussten Schichten im unteren Bereich der Bohrung hingegen nicht abgetragen (Bild 92 rechts). Eine Bearbeitungsdauer von 15 s wird daher als geeignet festgelegt. Dabei werden über die gesamte Bohrungstiefe die in Schritt 1 entstehenden Schmelzschichten abgetragen (Bild 88). [UKK15b]

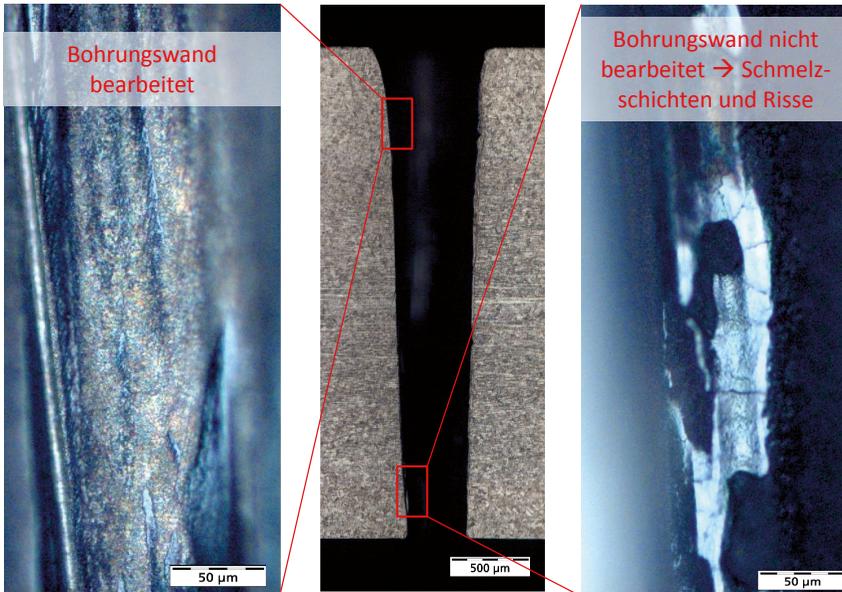


Bild 92: Geätzter Längsschliff einer Bohrung mit einer Bearbeitungsdauer von 7,5 s (Mitte) sowie Nahaufnahmen aus dem oberen Bereich der Bohrung, der mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung bearbeitet ist (links) und dem unteren Bereich der Bohrung, der nicht bearbeitet ist, so dass rissbehaftete Schmelzschichten festgestellt werden (rechts)

### Zusammenfassung geeigneter Parameter

Eine Zusammenfassung der in Kapitel 5.3 für Schritt 3 ermittelten geeigneten Verfahrensparameter ist in Tabelle 12 aufgeführt.

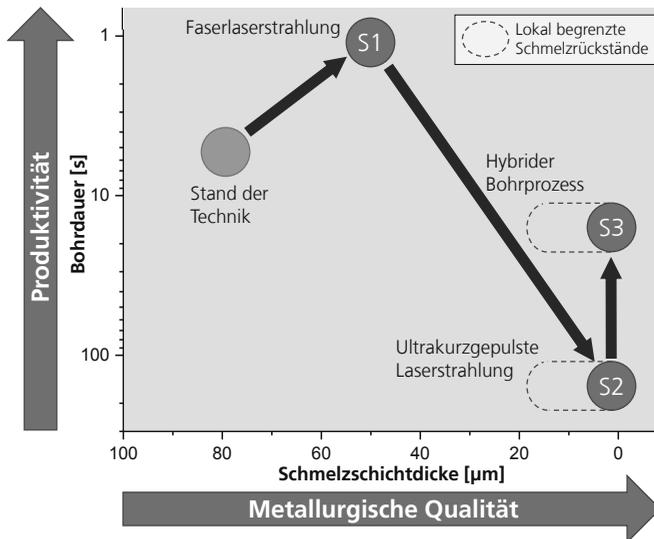
Tabelle 12:  
Zusammenfassung geeigneter Parameter zum Abtrag der thermisch belasteten Bereiche mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung (Schritt 3)

Parameter	Wert
Verfahrensbewegung	Spiralen (Außendurchmesser 450 µm)
Wiederholungen	188
Repetitionsrate	238 kHz
Mittlere Leistung	53 W (80 %)
Prozessgasart	Druckluft
Prozessgasdruck	5 bar
Bearbeitungsdauer	15 s

**Fazit:**

- Ein Abtrag der ca. 33  $\mu\text{m}$  dicken Schmelzschichten von den Vorbohrungen ist grundsätzlich möglich. Vereinzelt haften Schmelzrückstände mit Dicken bis zu 5  $\mu\text{m}$  an der Bohrungswand an. Die Bearbeitungsdauer für den zweiten Prozessschritt sollte 15 s betragen. Somit ergibt sich eine Gesamtbearbeitungszeit von 16 s für den hybriden Bohrprozess. Die Bearbeitungszeit kann im Vergleich zum Bohren nur mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung (Schritt 2) um einen Faktor von ca. 9 verkleinert werden.
- Um den hybriden Bohrprozess für industrielle Anwendungen einsetzen zu können, muss eine Bearbeitungsoptik entwickelt werden, in die beide Laserstrahlungen eingekoppelt werden können. Somit ist ein erneutes Ausrichten der Bauteile nicht mehr erforderlich. Ein ungleichmäßiger Abtrag an der Schmelzschichten bedingt durch fehlerhafte Ausrichtung kann somit verhindert werden.
- Die Einteilung der Ergebnisse von Schritt 3 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität sind im Vergleich zu Schritt 1 und 2 sowie zum Stand der Technik in Bild 93 dargestellt.

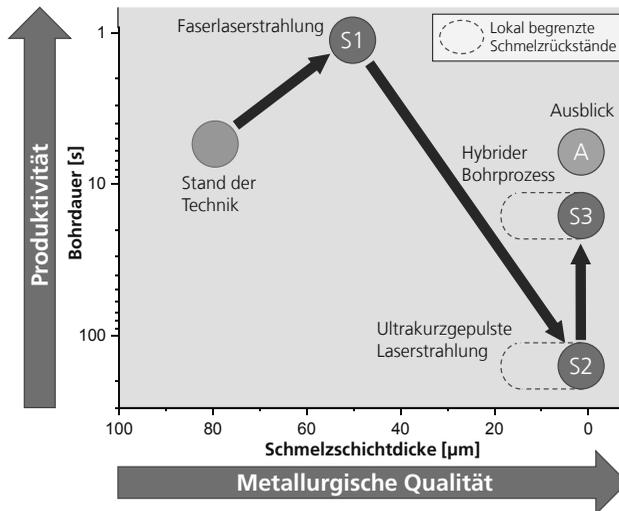
Bild 93: Einteilung des hybriden Bohrprozesses von Schritt 3 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität im Vergleich zu Schritt 1 und 2 sowie zum Stand der Technik



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit wird ein hybrider Laserstrahl-Bohrprozess dargestellt und entwickelt mit dem Ziel, die metallurgische Qualität von Kühlluftbohrungen bei nahezu gleichbleibender Produktivität zu vergrößern, so dass die lebensdauer-senkenden Defekte wie Schmelzschichten oder Risse reduziert oder gänzlich vermieden werden können. Zunächst wird eine Vorbohrung mittels Faserlaserstrahlung (große Produktivität) in 1 s erzielt. In einem nachfolgenden Prozessschritt werden die Schmelzschichten an den Bohrungswänden mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung (große Qualität) in 15 s abgetragen. Die Ergebnisse sind im Vergleich zum Stand der Technik in Bild 94 bzgl. Produktivität sowie metallurgischer Qualität eingeteilt.

Bild 94: Einteilung der Bohrverfahren von Schritt 1 bis Schritt 3 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität



Bei der Bearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung werden teilweise lokal begrenzte Schmelzrückstände mit Dicken bis zu 20 µm festgestellt. Mögliche Ursachen für diese Schmelzrückstände sind in Bild 95 dargestellt. Eine fehlerhafte Ausrichtung der Probe kann durch die Verwendung einer Bearbeitungsoptik vermieden werden, in die die Laserstrahlung beider Laserstrahlquellen eingekoppelt werden kann. Somit ist eine zweite Ausrichtung der Probe nicht erforderlich.

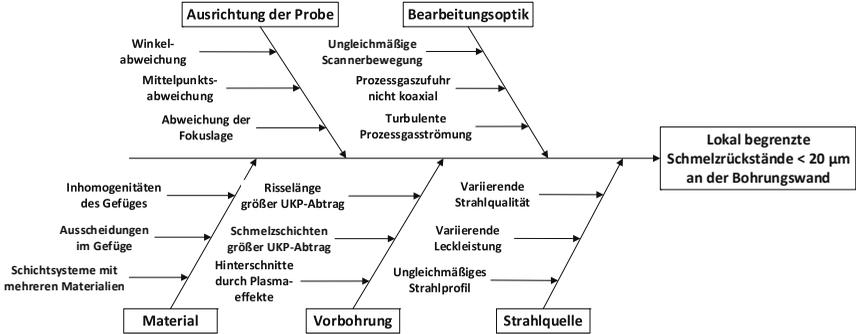


Bild 95: Ishikawa Diagramm mit Ursachen für lokal begrenzte Schmelzrückstände an der Bohrungswand bei der Bearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung

Beim hybriden Bohrprozess kann ein Break-even-point zwischen Durchmesser der Vorbohrung und minimal erforderlichem UKP-Abtrag ermittelt werden. Der UKP-Abtrag soll möglichst klein sein, so dass die Produktivität groß ist. Schmelzschichten und eventuell vorhandene Hinterschnitte durch Plasmaeffekte müssen aber sicher abgetragen werden.

Repetitionsraten größer 238 kHz sind beim Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung aufgrund von Wärmeakkumulation nicht geeignet. Daher sollte eine ultrakurzgepulste Laserstrahlquelle verwendet werden, bei der die volle mittlere Leistung bei einer Repetitionsrate von 238 kHz verfügbar ist, um Konizität und Bearbeitungsdauer zu verkleinern.

Im Rahmen der Arbeit wird qualitativ festgestellt, dass die metallurgische Qualität von Bohrungen durch den hybriden Bohrprozess vergrößert wird. Quantitative Untersuchungen zur Vergrößerung der Lebensdauer anhand von Thermozyklierversuchen, isothermen (LCF<sup>14</sup>) und thermomechanischen (TMF<sup>15</sup>) Ermüdungsversuchen werden derzeit durchgeführt.

Die Investitionskosten zur Realisierung des hybriden Bohrprozesses z.B. für das Bohren von Turbinenschaufeln sind größer als bei konventionellen Laserbohrprozessen, da in zwei Laserstrahlquellen sowie eine kombinierte Bearbeitungsoptik investiert werden muss. Sollte die durch Kühlluftbohrungen in Turbomaschinenkomponenten induzierte Lebensdauerreduzierung jedoch auf einen Faktor von z.B. 5 verkleinert werden können, amortisieren sich die Investitionen in kürzester Zeit.

<sup>14</sup> LCF steht für Low-Cycle-Fatigue

<sup>15</sup> TMF steht für Thermo-mechanical-Fatigue

## 7 Quellen und weiterführende Literatur

- [All76] ALLMEN, M. von: *Laser Drilling velocity in metals*. In: *Journal of Applied Physics* 47 (1976), Nr. 12, S. 5460
- [ARR08] ANCONA, A. ; RÖSER, F. ; RADEMAKER, K. ; LIMPET, J. ; NOLTE, S. ; TÜNNERMANN, A.: *High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system*. In: *Optics Express* 16 (2008), Nr. 12, S. 8958
- [BKS72] BASOV, N. G. ; KROKHIN, O. N. ; SKLIZKOV, G. V.: *Gas dynamics of laser plasma in the course of heating*. In: *Soviet Physics JET* (1972), Vol. 34, No. 1, S. 81–84
- [Bäu11] BÄUERLE, Dieter: *Laser Processing and Chemistry : With 332 figures*. 4th ed. Berlin : Springer, 2011
- [BMA02] BINDER, Alexander (Hrsg.); METZGER, Thomas (Hrsg.); ASHKENASI, David (Hrsg.); MÜLLER, Gerhard (Hrsg.); RIESBECK, Thomas (Hrsg.); EICHLER, Hans J. (Hrsg.): *High aspect-ratio laser-drilling of micro-holes with a Nd:YAG Master-Oscillator Power-Amplifier (MOPA) system*, 2002
- [Brä04] BRÄUNLING, Willy J. G.: *Flugzeugtriebwerke*. Berlin [u.a.] : Springer, 2004 (2)
- [Bun10] Bundesregierung Deutschland: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. – Deutschland. 28.09.2010
- [CBL98] CARUEL, F. ; BOURGUIGNON, S. ; LALLEMENT, B. ; FARGEAS, S. ; DEBUSSAC, A. ; HARRIS, K. ; ERICKSON, G. L. ; WAHL, J. B.: *SNECMA experience with cost-effective DS airfoil technology applied using CM 186 LC alloy*, Bd. 120. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1998, S. 97–104
- [CSS02] CORCORAN, A. ; SEXTON, L. ; SEAMAN, B. ; RYAN, P. ; BYRNE, G.: *The laser drilling of multi-layer aerospace material systems*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 123 (2002), S. 100–106
- [Dav02] DAUSINGER, F. (Hrsg.): *Femtosecond technology for precision manufacturing: Fundamental and technical aspects*, 2002 (50)
- [Dav04] DAUSINGER, Friedrich: *Präzisionsbohren mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen*. In: *LTI* 04/05 (2004)
- [DR06] DIELS, Jean-Claude ; RUDOLPH, Wolfgang: *Ultrashort laser pulse phenomena : Fundamentals, techniques, and applications on a femtosecond time scale*. 2nd ed. Amsterdam, London : Elsevier/Academic Press, 2006 (Optics and photonics)

- [Die12] Dietrich, J.: *Synchrone Produktivitäts- und Qualitätssteigerung beim Perkussionsbohren*. Aachen, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Lasertechnik. Dissertation. 2012
- [DUH13] DÖRING, S. ; ULLSPERGER, T. ; HEISLER, F. ; RICHTER, S. ; TÜNNERMANN, A. ; NOLTE, S.: *Hole Formation Process in Ultrashort Pulse Laser Percussion Drilling*. In: *Physics Procedia* 41 (2013), S. 431–440
- [EE06] EICHLER, Jürgen ; EICHLER, Hans-Joachim: *Laser : Bauformen, Strahlführung, Anwendungen : mit 57 Tabellen, 164 Aufgaben und vollständigen Lösungswegen*. 6., aktualisierte Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2006
- [Eng09] ENGBERS, Sven: *Untersuchung des Prozessgaseinflusses beim Perkussionsbohren mittels Schlierenfotografie*. Münster, Fachhochschule Münster, Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen University. Bachelorarbeit. 2009
- [Fai12] FAIBT, B.: *Anwendungen mit Pikosekundenlasern*. Ditzingen, 22.11.2012
- [FHP98] FRENCH, P. W. (Hrsg.); HAND, D. P. (Hrsg.); PETERS, C. (Hrsg.); SHANNON, G. J. (Hrsg.); BYRD, P. J. (Hrsg.); STEEN, W. M. (Hrsg.): *Investigation of the Nd:YAG laser percussion drilling process using high speed filming*, 1998
- [FNW03] FRENCH, P. W. (Hrsg.); NAEEM, M. (Hrsg.); WATKINS, K. G. (Hrsg.): *Laser percussion drilling of aerospace material using a 10 kW peak power laser using a 400 µm optical fibre delivery system*, 2003
- [GHO12] GOTTMANN, Jens ; HERMANS, Martin ; ORTMANN, Jürgen: *Digital Photonic Production of Micro Structures in Glass by In-Volume Selective Laser-Induced Etching using a High Speed Micro Scanner*. In: *Physics Procedia* 39 (2012), S. 534–541
- [GKM91] GRAVES, R. S. ; KOLLIE, T. G. ; MCELROY, D. L. ; GILCHRIST, K. E.: *The thermal conductivity of AISI 304L stainless steel*. In: *International Journal of Thermophysics* 12 (1991), Nr. 2, S. 409–415
- [GW09] GRUPP, M. ; WESTPHÄLING, Tim: *Faserlaser - Das energieeffiziente Werkzeug : Verschiedene industrielle Anwendungen im Überblick*. In: *Laser Technik Journal* (2009), Nr. 6, S. 38–41
- [HHL98] HAIGHT, Richard A. ; HAYDEN, Dennis ; LONGO, Peter ; NEARY, Timothy E. ; WAGNER, Alfred ; GRENON, Brian J. ; ABOUD, Frank E.: *Implementation and performance of a femtosecond laser mask repair system in manufacturing*. In: *18th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management* : SPIE, 1998 (SPIE Proceedings), S. 477–484
- [HJ76] HAMILTON, D. C. ; JAMES, D. J.: *Hole drilling with a repetitively-pulses TEA CO2 laser*. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* (1976), Vol. 9, S. L41-L43
- [HW93] HASHISHM, M. ; WHALEN, J.: *Precision Drilling of Ceramic-Coated Components With Abrasive-Waterjets*, Vol. 115, Januar 1993. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Vol. 115, 1993, S. 148–154

- [HL93] HERZIGER, G. ; LOOSEN, P.: *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Grundlagen - Systeme - Verfahren* : Hanser, 1993
- [HTS76] HETTECHE, L. R. ; TUCKER, T. R. ; SCHRIEMPF, J. T. ; STEGMANN, R. L. ; METZ, S. A.: *Mechanical response and thermal coupling of metallic targets to high intensity 1.06 $\mu$  laser radiation*. In: *Journal of Applied Physics* (1976), Vol. 47, No. 4, S. 1415–1421
- [HR96] HÜTTNER, Bernd ; ROHR, Gernot: *On the theory of ps and sub-ps laser pulse interaction with metals I. Surface temperature*. In: *Applied surface science* 103 (1996), Nr. 3, S. 269–274
- [IFN98] ITATANI, J. ; FAURE, J. ; NANTEL, M. ; MOUROU, G. ; WATANABE, S.: *Suppression of the amplified spontaneous emission in chirped-pulse-amplification lasers by clean high-energy seed-pulse injection*. In: *Optics Communications* 148 (1998), 1-3, S. 70–74
- [JFK15] JANSSEN, Stefan ; FÖGEN, N. ; KELBASSA, Ingo ; CETIN, M. ; OPPITZ, S.: *Drilling of holes for force transmission elements in CFRP-preforms via ultra-short pulse laser radiation, A060*. In: Japan Laser Processing Society (Hrsg.): *Proceedings of LAMP2015 : The 7th International Congress on laser advanced Materials Processing, 2015*
- [KRS05] KALASHNIKOV, M. P. ; RISSE, E. ; SCHÖNNAGEL, H. ; SANDNER, W.: *Double chirped-pulse-amplification laser: a way to clean pulses temporally*. In: *Optics Letters* 30 (2005), Nr. 8, S. 923
- [KBP02] KAMALU, J. ; BYRD, P. J. ; PITMAN, A.: *Variable angle laser drilling of thermal barrier coated nimonic*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002), 2-3, S. 355–362
- [KMM02] KI, H. ; MOHANTY, P. S. ; MAZUMDER, J.: *Multiple reflection and its influence on keyhole evolution*. In: *Journal of Laser Applications* 14 (2002), S. 39
- [Kla02] KLABBERS-HEIMANN, J. J.: *Anwendungsgrenzen von modernen Nickelbasis-Superlegierungen in effusionsgekühlten Bauteilen zukünftiger Gasturbinen*. Aachen, RWTH Aachen University. Dissertation. 2002
- [KKW04] KLEINBAUER, Jochen ; KNAPPE, Ralf ; WALLENSTEIN, Richard: *Ultrashort Pulse Lasers and Amplifiers Based on Nd:YVO4 and Yb:YAG Bulk Crystals, Bd. 96*. In: ASCHERON, Claus E. ; KÖLSCH, Hans J. ; SKOLAUT, Werner ; DAUSINGER, Friedrich ; LUBATSCHOWSKI, Holger ; LICHTNER, Friedemann (Hrsg.): *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004 (Topics in applied physics), S. 17–34
- [KNT05] KÖNIG, J. ; NOLTE, S. ; TÜNNERMANN, A.: *Plasma evolution during metal ablation with ultrashort laser pulses*. In: *Optics Express* 13 (2005), Nr. 26, S. 10597
- [Kor03] KORTE, Frank: *Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen*. 1. Aufl. Göttingen : Cuvillier, 2003

- [Kro65] KROKHIN, O. N.: "Matched" plasma heating mode using laser radiation. In: *Soviet Physics - Technical Physics* (1965), Vol. 9 No. 7, S. 1024–1026
- [KLS13] KUBIS, Peter ; LI, Ning ; STUBHAN, Tobias ; MACHUI, Florian ; MATT, Gebhard J. ; VOIGT, Monika M. ; BRABEC, Christoph J.: *Patterning of organic photovoltaic modules by ultrafast laser*. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2013), S. n/a
- [Lad09] LADWIG, Michael: Schnell, spontan, flexibel. Kombikraftwerke, Jg. 61, Nr. 5, 2009. In: *BWK Das Energie Fachmagazin*, 2009, S. 16–19
- [Lec03] LECHNER, C. ; SEUME, J. (Mitarb.): *Stationäre Gasturbinen*. Berlin u.a. : Springer, 2003
- [LAB13] LETSCH, Andreas ; AMETOWOBLA, Mawuli ; BARTL, Dominik ; NOLTE, Stefan ; PESCHEL, Thomas: *Ultrashort-Pulse Laser Structuring of Thin-Film Solar Modules*. In: *Laser Technik Journal* 10 (2013), Nr. 5, S. 16–19
- [LL02a] LOW, D. K. Y. ; LI, L.: *Comparison of intra- and interpulse modulation in laser percussion drilling*. In: *Proc.IMEchE* 216 (2002), B, S. 167–171
- [LL02b] LOW, D. K. Y. ; LI, L.: *Effects of Inter-Pulse and Intra-Pulse shaping during laser percussion drilling*. In: *Proc.SPIE* 4426 (2002), S. 191–194
- [LLB01] LOW, D. K. Y. ; LI, L. ; BYRD, P. J.: *The influence of temporal pulse train modulation during laser percussion drilling*. In: *Optics and Lasers in Engineering* 35 (2001), S. 149–164
- [LLC99] LOW, D. K. Y. (Hrsg.) ; LI, L. (Hrsg.) ; CORFE, A. G. (Hrsg.) ; BYRD, P. J. (Hrsg.): *Taper control during laser percussion drilling of NIMONIC alloy using sequential pulse delivery pattern control (SPDPC)*, 1999
- [LBM05] LUGSCHEIDER, Erich ; BOBZIN, Kirsten ; MAES, M. ; LACKNER, K. ; POPRAWA, Reinhart ; KREUTZ, Ernst Wolfgang ; WILLACH, Jens: *Laser Drilled Microholes in Zirconia Coated Surfaces using Two Variants to Implement the Effusion Cooling of First Stage Turbine Blades*. In: *Advanced Engineering Materials* 7 (2005), Nr. 3, S. 145–152
- [Lug06] Lugscheider, E., Bobzin K., Zwick, J.: *Anwendungsgebiete und Entwicklungstrends für thermisch gespritzte Oberflächenbeschichtungen in der Luftfahrt*. Aachen, RWTH Aachen University, Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften. 2006
- [MYK84] MATSUNAWA, A. ; YOSHIDA, A. ; KATAYMA, S.: *Beam - plume interaction in pulsed YAG laser processing*. In: *Proc. Materials processing ICALEO '84* (1984), Vol. 44, S. 35–41
- [MP05] MAYER, H. W. ; PESTER, W.: *Laser lässt Dieselmotoren sparsamer fahren*. In: *VDI nachrichten* 49/2005 (2005-12-09), 49/2005
- [MGP04] MÜLLER, Daniel ; GIESEN, Adolf ; PASCHOTTA, Rüdiger ; KELLER, Ursula: *Ultrashort Pulse Thin-Disk Lasers and Amplifiers*, Bd. 96. In: ASCHERON, Claus E. ; KÖLSCH,

- Hans J.; SKOLAUT, Werner; DAUSINGER, Friedrich; LUBATSCHOWSKI, Holger; LICHTNER, Friedemann (Hrsg.): *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004 (Topics in applied physics), S. 55–73
- [NL00] NG, G. K. L. (Hrsg.); LI, L. (Hrsg.): *An analysis of repeatability of laser percussion drilling process*, 2000
- [Opt12] Optoskand AB: *Fiber to Fiber Coupling Unit 1239*. Mölndal, Sweden, 28.09.2012
- [Pes81] PESCHKO, W.: *Abtragung fester Targets durch Laserstrahlung*. Darmstadt, TU Darmstadt, Fachbereich Physik. Dissertation. 20. Mai 1981
- [PC94] PETZOW, Günter ; CARLE, Veronika; Borotraeger (Mitarb.): *Metallographisches, keramographisches, plastographisches ätzen*. Berlin, Stuttgart, 1994
- [Phi03] PHIPPS, C.: *Laser applications overview: the state of the art and the future trends in the United States*. In: *Riken Review* 50 (2003), S. 11–19
- [PRW78] PIRI, A. N. ; ROOT, R. G. ; WU, P.K.S.: *Plasma energy transfer to metal surfaces irradiated by pulsed lasers*. In: *AIAA Journal* (1978), Vol. 16, No. 12, S. 1296–1304
- [Pop05] POPRAWA, Reinhart: *Lasertechnik für die Fertigung : Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin : Springer, 2005 (VDI-Buch)
- [Pop11] POPRAWA, Reinhart: *Tailored Light 2 : Laser Application Technology*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011 (RWTHedition)
- [PGH08] POPRAWA, Reinhart ; GILLNER, Arnold ; HOFFMANN, Dieter ; GOTTMANN, Jens ; WAWERS, Welf ; SCHULZ, Wolfgang: *High speed high precision ablation from ms to fs*. In: PHIPPS, Claude R. (Hrsg.): *High-Power Laser Ablation 2008 : SPIE*, 2008 (SPIE Proceedings), S. 700502–700502-12
- [PBB73] PROKHOROV, A. ; BATANOV, V. ; BUNKIN, F. ; FEDOROV, V.: *Metal evaporation under powerful optical radiation*. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 9 (1973), Nr. 5, S. 503–510
- [RWF12] REININGHAUS, M. ; WORTMANN, D. ; FINGER, J. ; FALEY, O. ; POPRAWA, R. ; STAMPFER, C.: *Laser induced non-thermal deposition of ultrathin graphite*. In: *Applied Physics Letters* 100 (2012), Nr. 15, S. 151606
- [Rüd08] Rüdiger Paschotta: *Field Guide to Lasers*. Spi (15. Januar 2008) : SPIE Press, 2008
- [Ruf04] RUF, Andreas: *Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern*. Utz, Herbert. 2004
- [RMR09] RUSSBUJELDT, P. ; MANS, T. ; ROTARIUS, G. ; WEITENBERG, J. ; HOFFMANN, H. D. ; POPRAWA, R.: *400W Yb:YAG Innoslab fs-Amplifier*. In: *Optics Express* 17 (2009), Nr. 15, S. 12230–12245

- [RWT03] RWTH Aachen University: *Ergebnisbericht der zweiten Phase (2001-2004) des Sonderforschungsbereiches 561 "Thermisch hochbelastete, offenporige und gekühlte Mehrschichtsysteme für Kombikraftwerke"*, Teilprojekt B.2.2. 2003
- [Sau05] SAUMWEBER, Christian: *Filmkühlung thermisch hochbelasteter Gasturbinenschaukeln : Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Diffusorbohrungen*. Berlin : Logos-Verlag, 2005 (Forschungsberichte aus dem Institut für Thermische Strömungsmaschinen / Universität Karlsruhe (TH) Bd. 29)
- [SRW11] SCHULZ, M. ; RIEDEL, R. ; WILLNER, A. ; MANS, T. ; SCHNITZLER, C. ; RUSSBUELDT, P. ; DOKEMEYER, J. ; SEISE, E. ; GOTTSCHALL, T. ; HÄDRICH, S. ; DUESTERER, S. ; SCHLARB, H. ; FELDHAUS, J. ; LIMPET, J. ; FAATZ, B. ; TÜNNERMANN, A. ; ROSSBACH, J. ; DRESCHER, M. ; TAVELLA, F.: Yb:YAG Innoslab amplifier: efficient high repetition rate subpicosecond pumping system for optical parametric chirped pulse amplification, Vol. 36. In: *Optics Letters*. No. 13, 2011
- [Sch15] SCHULZE, M.: *Kraftwerke der Zukunft müssen kleiner und flexibler sein*. In: *VDI Nachrichten* (2015-10-30), Nr. 44, S. 7
- [SLS06] SEZER, H. K. ; LI, L. ; SCHMIDT, M. ; PINKERTON, A. J. ; ANDERSON, B. ; WILLIAMS, P.: *Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006), Nr. 15, S. 1972–1982
- [TH86] TREUSCH, H. G. ; HERZIGER, G.: Metal precision drilling with lasers. In: SCHUOECKER, Dieter (Hrsg.): *1986 International Symposium/Innsbruck* : SPIE, 1986 (SPIE Proceedings), S. 220–225
- [Uch11] Uchtmann, H.: *Vergleich von dioden- und blitzlampengepumpten Festkörperlasern zum Bohren mit Einzelpulsen*. Aachen, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Lasertechnik. Diplomarbeit. November 2011
- [Uch15] Uchtmann, H.: *Laser drilling of Cooling Holes : Using high power ultrashort pulsed laser radiation*. In: *LIA TODAY The official newsletter of the Laser Institute of America* May/June 2015 (2015), Vol. 23 No 3, S. 14–17
- [UDK12] Uchtmann, H. ; Dietrich, J. ; Kelbassa, I.: Pulse shaping during laser percussion drilling by using fiber laser radiation, Paper 201. In: Laser Institute of America (Hrsg.): *2012 ICALEO Conference Proceedings : 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics*, 2012 (LIA pub, no 615).
- [UFK14] Uchtmann, H. ; Friedrichs, M. ; Kelbassa, I.: Drilling of cooling holes by using high power ultrashort pulsed laser radiation, Paper 1302. In: Laser Institute of America (Hrsg.): *2014 ICALEO Conference Proceedings : 33rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, 2014 (LIA pub, no 617).
- [UKK15b] Uchtmann, H. ; KÜRSCHNER, D. ; Kelbassa, I.: Hybrid laser drilling of cooling holes, Paper 2008. In: Laser Institute of America (Hrsg.): *2015*

- ICALEO Conference Proceedings : 34th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics*, 2015 (LIA pub, no 618).
- [UKK15a] UCHTMANN, H. ; KÜRSCHNER, D. ; KELBASSA, I.: Hybrid laser drilling of cooling holes by using millisecond pulsed fiber laser radiation and ultrashort pulsed laser radiation, #15-115: A001 (Th4-HO-9). In: Japan Laser Processing Society (Hrsg.): *Proceedings of LAMP2015 : The 7th International Congress on laser advanced Materials Processing*, 2015
- [VC04] VOISEY, K. T. ; CLYNE, T. W.: *Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings*. In: *Surface and Coatings Technology* 176 (2004), S. 296–306
- [WH96] WAHL, J. B. ; HARRIS, K.: *Superalloys in industrial gas turbines - an overview*. In: *Proceedings 9th World Conference on Investment Casting*. San Francisco, USA, 1996
- [Wal10] WALTHER, K. G.: *Herstellung von Formbohrungen mit Laserstrahlung*. Aachen, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Lasertechnik. Dissertation. 2010
- [Wei05] WEIKERT, M.: *Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge (ISFW). Dissertation. 2005
- [WHM11] WOLYNSKI, Alexander ; HERRMANN, Thomas ; MUCHA, Patrick ; HALOUI, Hatim ; L'HUILLIER, Johannes: *Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR*. In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 292–301
- [WRF11] WORTMANN, Dirk ; REININGHAUS, Martin ; FINGER, Johannes ; DOLD, Claus ; RUSSBUJELDT, Peter ; POPRAWA, Reinhart: The physics in applications of ultrafast lasers. In: TOMÁNEK, Pavel; SENDERÁKOVÁ, Dagmar; PÁTA, Petr (Hrsg.): *Photonics Prague 2011* : SPIE, 2011 (SPIE Proceedings), S. 830603
- [Yil86] YILBAS, B. S.: *The absorption of incident beams during laser drilling of metals*. In: *Optics & Laser Technology* 18 (1986), Nr. 1, S. 27–32. URL <http://apps.isiknowledge.com/WoS/CIW.cgi?CustomersID=WoS&CustomersIP=134.130.4.46&Func=Links&ImgLogo=http%3A%2F%2Fimages.isiknowledge.com%2Fimages%2FLinks%2FWOK3%2Ftbr2xs.gif&PointOfEntry=FullRecord&PublisherID=WoS&ReturnLink=http%3A%2F%2Fapps.isikno>
- [ZR02] ZEL'DOVICH, Y. B. ; RAIZER, Y. P.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. Mineola, USA : Dover Publications, 2002
- [Zel06] ZELLMER, H.: *Der Faserlaser - Strahlquelle für viele Anwendungen : Wie funktioniert er? Und was kann er?* In: *Laser Technik Journal* 3 (2006), Nr. 2, S. 52–55
- [Zin08] ZINTZEN, Bernhard: *Untersuchung zur thermischen Gestaltung von Hochleistungsfaserlasern*. Aachen, RWTH Aachen University. Dissertation. 2008



## 8 Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Anzahl der Lastwechsel aufgetragen über der Änderung der Dehnung mit markierter Verkleinerung der Lastspielzahl bis zum Versagen von gebohrten im Vergleich zu ungebohrten CMSX-4 Proben [Kla02]	2
Bild 2:	Flussdiagramm zur Zielsetzung und Vorgehensweise	5
Bild 3:	Kriterien für den Einsatz von Laserstrahl-Bohren bei der Herstellung von Kühlluft-bohrungen in Wärmedämmschichtsystemen	8
Bild 4:	Einteilung der Bohrverfahren beim schmelzdominierten Bohrprozess nach erforderlicher Bohrdauer und erzielbarer Präzision [Pop05]	8
Bild 5:	Geätzter Längsschliff einer Bohrung in Ni-Basis Grundmaterial mit markierten Schmelzschichten und Mikrorissen, die an Korngrenzen des Grundmaterials auftreten	9
Bild 6:	Geätzter Längsschliff des Schichtsystems bestehend aus Ni-Basis Grundmaterial, MCrAlY Haftvermittlerschicht und ZrO <sub>2</sub> Wärmedämmschicht einer Bohrung mit markierten Delaminationsrissen zwischen den Schichten	10
Bild 7:	Schematische Darstellung der Prozessschritte beim schmelzdominierten Abtrag [Pop05]	11
Bild 8:	Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers [GW09]	13
Bild 9:	Schematische Darstellung der Prozessschritte beim dampfdominierten Abtrag [Pop05]	14
Bild 10:	Schematische Darstellung des Bohrfortschritts: (1) Abtrag ähnlich der Geometrie des Strahlprofils; (2) Verkleinerung der Laserfluenz auf den schrägen Bohrungswänden; (3) Brechung oder Reflexion an den Bohrungswänden; (4) Laserfluenz wird kleiner als die Abtragschwellfluenz [Fai12]	15
Bild 11:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Bohren mit Faserlaserstrahlung	21
Bild 12:	Schematische Darstellung des Faserkopplers [Opt12]	23
Bild 13:	Schematische Darstellung des optischen Aufbaus des Faserkopplers [Opt12]	23
Bild 14:	Messung des Leistungsverlusts bei Verwendung von Faserkoppler und Prozessfaser	24
Bild 15:	Schematische Darstellung der Bearbeitungsoptik YK52	25
Bild 16:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung	26
Bild 17:	Minimale Pulsdauer in Abhängigkeit der eingestellten Repetitionsrate des Seedlasers	28

Bild 18:	Strahlkaustik (links) und isometrische Darstellung des Strahlprofils (rechts) bei Verwendung des Galvo-Scanners bei einer Repetitionsrate von 1,43 MHz, einer Pulsdauer von 7,65 ps und einer mittleren Leistung von 0,3 W	29
Bild 19:	Schematische Darstellung einer Aufsicht (links) und eines Längsschliffs (rechts) von einer Bohrung. Im Rahmen der Auswertung werden der Eintrittsdurchmesser $d_{\text{Eintritt}}$ , der Austrittsdurchmesser $d_{\text{Austritt}}$ und die Schmelzschichten (Schritt 1) bzw. Schmelzrückstände (Schritt 2 & 3) $d_{\text{Schmelze}}$ gemessen	30
Bild 20:	Flussdiagramm zur experimentellen Vorgehensweise von Schritt 1	31
Bild 21:	Abhängigkeit des gemessenen Fokusdurchmessers von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern	33
Bild 22:	Abhängigkeit der gemessenen Rayleighlänge von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern	34
Bild 23:	Abhängigkeit der gemessenen Beugungsmaßzahl $M^2$ von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern	35
Bild 24:	Relative Intensitätsverteilung im Strahlfokus in Abhängigkeit vom Prozessfaserdurchmesser bei Fokussierbrennweiten von 100 mm und 300 mm	36
Bild 25:	Isometrische Darstellung der relativen Intensitätsverteilung im Strahlfokus für eine Brennweite von 100 mm gaußförmig bei einem Prozessfaserdurchmesser von 100 $\mu\text{m}$ (links) sowie tophat-förmig bei einem Prozessfaserdurchmesser von 400 $\mu\text{m}$ (rechts)	37
Bild 26:	Abhängigkeit der Eintrittsdurchmesser von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern von 50 $\mu\text{m}$ bis 400 $\mu\text{m}$	38
Bild 27:	Abhängigkeit der Austrittsdurchmesser von der Fokussierbrennweite bei sechs verschiedenen Prozessfaserdurchmessern von 50 $\mu\text{m}$ bis 400 $\mu\text{m}$	38
Bild 28:	Ein- und Austrittsdurchmesser der Bohrungen in Abhängigkeit vom gemessenen Fokusdurchmesser der Laserstrahlung	39
Bild 29:	Abhängigkeit der Konizität von Bohrungen vom Fokusdurchmesser der Laserstrahlung	40
Bild 30:	Abhängigkeit der Konizität von Bohrungen von der Beugungsmaßzahl $M^2$ der Laserstrahlung	41
Bild 31:	Abhängigkeit der Konizität von Bohrungen von der Rayleighlänge der Laserstrahlung	41

Bild 32:	Längsschliff einer Bohrung mit negativer (-2,75%, links) und positiver Konizität (10,65%, rechts) sowie schematisch dargestelltem Verlauf der Laserstrahlung	42
Bild 33:	Schematische Darstellung einer Bohrung, die mit Laserstrahlung mit großer Rayleighlänge gebohrt ist (links) sowie Projektion der Laserstrahlung an einer Bohrungswand im Winkel $\alpha$ (rechts)	43
Bild 34:	Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser von der Pulsspitzenleistung bei vier Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Prozessfaserdurchmesser ( $t_p = 0,5$ ms; $f_{rep} = 50$ Hz, Druckluft 5 bar)	45
Bild 35:	Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser von der Pulsdauer	46
Bild 36:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit Pulsdauern von 0,25 ms bis 1,25 ms gebohrt sind. Das obere Drittel der Bohrung ist aufgrund von zu großer Pulsenergie aufgeweitet bei Pulsdauern größer 0,5 ms.	47
Bild 37:	Abhängigkeit von Ein- und Austrittsdurchmesser von der Repetitionsrate	48
Bild 38:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit Pulsanzahlen von 5 bis 200 Pulsen erzielt werden	49
Bild 39:	Abhängigkeit der Ein- und Austrittsdurchmesser einer Bohrung von der Pulsanzahl	49
Bild 40:	Abhängigkeit von Ein- und Austrittsdurchmesser von der Fokusslage der Laserstrahlung bezüglich der Probenoberfläche	50
Bild 41:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit den Prozessgasen Druckluft, Sauerstoff, Argon und Stickstoff bei einem Prozessgasdruck von 5 bar erzielt werden	51
Bild 42:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen mit variiertem Prozessgasdruck von 5 bar bis 20 bar	52
Bild 43:	Zeitlicher Verlauf der Puls-spitzenleistung beim Interpulse shaping. Während der ersten 10 Pulse wird die Pulsspitzenleistung jeweils um 600 W vergrößert. Alle weiteren Pulse werden bis zur Pulsnummer n mit einer Pulsspitzenleistung von 6000 W emittiert.	53
Bild 44:	Geätzte Längsschliffe mit Makroaufnahmen von Bohrungen ohne zeitliche Anpassung der Intensität (links) und mit zeitlicher Anpassung der Intensität (rechts). Bei zeitlicher Anpassung der Intensität ist die Bohrungsgometrie zylindrisch.	54
Bild 45:	Statistische Verteilungen der Ein- (links) und Austrittsdurchmesser (mitte) sowie der Schmelzschichtdicke (rechts) für 30 Bohrungen	55
Bild 46:	REM-Aufnahme der Schmelzschicht am Bohrungseintritt (links) und EDX-Analyse der chemischen Materialzusammensetzung innerhalb der Schmelzschicht und des Grundmaterials (rechts).	

	Die Einheiten der y-Achsen der Elementverteilungen entlang der Messstrecke sind relativ und entsprechen den Messwerten in der Tabelle (unten).	56
Bild 47:	Einteilung des Bohrverfahrens von Schritt 1 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität im Vergleich zum Stand der Technik	57
Bild 48:	Flussdiagramm zur experimentellen Vorgehensweise von Schritt 2	58
Bild 49:	Schematische Darstellung einer Verfahrensbewegung bestehend aus zehn Kreisen, die nacheinander von außen nach innen verfahren werden. GX und GY sind dabei die Verfahrachsen des Galvo-Scanners	59
Bild 50:	REM-Aufnahme einer mittels ultrakurz-gepulster Laserstrahlung erzielter Bohrung (links) mit Nahaufnahme der nicht vermeidbaren, ca. 1 $\mu\text{m}$ dicken Schmelzschicht an der Bohrungswand (rechts)	60
Bild 51:	Schematische Darstellung des zeitlichen Fluenz-verlaufs von ultrakurzgepulster Laserstrahlung mit eingezeichneter Abtragschwelle	60
Bild 52:	Abhängigkeit der mittleren Laser-leistung von der Repetitionsrate. Repetitionsraten kleiner 1,43 MHz können durch Puls Picking realisiert werden. Dabei ist nicht die volle mittlere Leistung verfügbar.	61
Bild 53:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 238 kHz bei 20 -100 % mittlerer Leistung (16 - 80 W) erzielt werden	62
Bild 54:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 715 kHz bei 20 -100 % mittlerer Leistung (35 - 169 W) erzielt werden	63
Bild 55:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 1,43 MHz bei 20 - 100 % mittlerer Leistung (75 - 376 W) erzielt werden	63
Bild 56:	Vergleich der gemessenen Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelz-rückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung bei verschiedenen Repetitionsraten (a).	65
Bild 57:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die ohne Prozessgas bei mittleren Leistungen von 16 - 80 W erzielt werden	67
Bild 58:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit Druckluft als Prozessgas bei mittleren Leistungen von 16 - 80 W erzielt werden	67
Bild 59:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen mit den Prozessgasen Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Druckluft	69
Bild 60:	Abhängigkeit der Schmelzrückstände von der Prozessgasart Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Druckluft	70
Bild 61:	Abhängigkeit der Durchbohrdauer von der Prozessgasart Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Druckluft	70

Bild 62:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit des Prozessgasdrucks von 1 bis 20 bar	71
Bild 63:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit des Düsenabstands von 1,5 bis 7 mm	72
Bild 64:	Schematische Darstellung der Position der Fokusslage ohne (links) und mit dynamischer Anpassung der Fokusslage (rechts)	74
Bild 65:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände bei Variation der Verfahrbewegung (frep = 238 kHz; P = 80 W; 50 Kreise; 300 Wdh.; 147 s Bohrdauer; Druckluft)	75
Bild 66:	Aufsicht auf Bohrungseintritte, die ohne Fokussnachführung (links), mit Fokussnachführung (mitte) und zu Beginn mit einer Perkussionsbohrung (rechts) erzielt werden	75
Bild 67:	Ein- und Austrittsdurchmessersowie Schmelzrückstände und Konizität von jeweils 115 Bohrungen mit und ohne Fokussnachführung	76
Bild 68:	Einfluss der Leckleistung: Bei einem Längsschliff entlang der Verfahrbewegung der Laserstrahlung mit Leckleistung wird am Bohrungseintritt an einer Seite eine Aufweitung und Risse in der Bohrungswand festgestellt (a). Bei einem Längsschliff orthogonal zur Verfahrbewegung der Laserstrahlung wird am Bohrungseintritt keine Aufweitung festgestellt (b).	77
Bild 69:	Schematische Darstellung einer Verfahrbewegung von zehn Spiralbahnen ineinander (oben links). Aufsicht auf einen Bohrungseintritt (unten links) und geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mittels Spiralbewegungen erzielt werden (rechts).	78
Bild 70:	Schematische Darstellungen von fünf verschiedenen Spiralbewegungen. GX und GY sind dabei die Verfahrachsen des Galvo-Scanners	79
Bild 71:	Schmelzrückstände und Konizitäten von Bohrungen, die mit den fünf verschiedenen Spiralbewegungen und einer Bohrdauer von etwa 147 s erzielt werden	80
Bild 72:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelzrückstände in Abhängigkeit der Bohrdauer für die Spiralbewegung „10 Spiralbahnen (2)“	81
Bild 73:	Schematische Darstellung einer Verfahrbewegung, die die Verfahrbewegung „10 Spiralbahnen (2)“ und äußere Spiralbahnen kombiniert. GX und GY sind dabei die Verfahrachsen des Galvo-Scanners	82
Bild 74:	Vergleich der Ein- und Austrittsdurchmesser sowie der Schmelzrückstände für die Spiralbewegungen „10 Spiralbahnen (2)“ und „10 Spiralbahnen (2) + Äußere Spiralbahnen“	82

Bild 75:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mittels Spiralbewegungen bei Variation der Repetitionsrate und der mittleren Leistung erzielt werden: Bei großen Repetitionsraten werden thermische Einflüsse an den Bohrungswänden in Form von Schmelzschichten (A), Rissen (B), Einbränden (C) und Plasmaaufweitungen (D) festgestellt	84
Bild 76:	Statistische Verteilungen der Ein- (links) und Austrittsdurchmesser (mitte) sowie der Schmelzrückstände (rechts) für 55 Bohrungen	86
Bild 77:	Thermisch unbeeinflusste Bohrungswand a) und thermisch beeinflusste Bohrungswände: Schmelzrückstände b) & c), Risse d) und Einbrände e)	87
Bild 78:	Einteilung des Bohrverfahrens mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung von Schritt 2 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität im Vergleich zu Schritt 1 sowie zum Stand der Technik	87
Bild 79:	Geätzte Längsschliffe mit Makroaufnahmen einer mit Faserlaserstrahlung erzielten Bohrung (links) und einer mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung erzielten Bohrung (rechts)	88
Bild 80:	Flussdiagramm zur experimentellen Vorgehensweise von Schritt 3	89
Bild 81:	Statistische Verteilung der Ein- (links) und Austrittsdurchmesser (mitte) sowie der Schmelzschichtdicken (rechts) für 30 Bohrungen	90
Bild 82:	Geätzter Längsschliff einer Vorbohrung mit Faserlaserstrahlung (links) sowie Nahaufnahme der Bohrungswand mit bis zu 60 µm dicker Schmelzschicht (rechts)	91
Bild 83:	Schematische Darstellung der möglichen Fehler durch falsches Ausrichten der Probe: 1. Abweichung der Bohrungsmittelpunkte (links); 2. Abweichung der Bohrungswinkel (rechts); resultierende Beeinflussung der Bohrungsergebnisse dargestellt anhand eines Längsschliffs mit Markierung des bearbeiteten Bereichs (Mitte)	92
Bild 84:	Schematische Darstellung der verwendeten Spiralverfahrbewegung von außen nach innen zum Abtrag der Schmelzschichten	93
Bild 85:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit vom Spiralaußen-durchmesser	94
Bild 86:	REM-Aufnahmen eines Längsschliffs einer Bohrung, die mit $f_{rep} = 1,43$ MHz und 100 % Leistung (400 W) erzielt wird (a) sowie Nahaufnahme der rissbehafteten Bohrungswand (b); Schmelzschicht (c) einer Bohrung, die mit $f_{rep} = 1,43$ MHz und 50 % Leistung (200 W) erzielt wird. (188 Spiralen, 15 s Bearbeitungszeit, 5 bar Druckluft)	95
Bild 87:	REM Aufnahme eines Längsschliffs einer Bohrung, die mit 100 kHz und 100 % Leistung (29 W) mit 300 Spiralwiederholungen	

	(23 s) erzielt wird mit einer Nahaufnahme der Bohrungswand sowie einer Nahaufnahme von Riffelbildung an der Bohrungswand und Vermessung des Höhenprofils der Riffel	96
Bild 88:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Schmelz-rückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung	97
Bild 89:	Längsschliff sowie Nahaufnahme einer Bohrung, die mit einer Repetitionsrate von 238 kHz erzielt wird	98
Bild 90:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der mittleren Leistung	99
Bild 91:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit von der Bearbeitungsdauer	100
Bild 92:	Geätzter Längsschliff einer Bohrung mit einer Bearbeitungsdauer von 7,5 s (Mitte) sowie Nahaufnahmen aus dem oberen Bereich der Bohrung, der mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung bearbeitet ist (links) und dem unteren Bereich der Bohrung, der nicht bearbeitet ist, so dass rissbehaftete Schmelzschichten festgestellt werden (rechts)	101
Bild 93:	Einteilung des hybriden Bohprozesses von Schritt 3 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität im Vergleich zu Schritt 1 und 2 sowie zum Stand der Technik	102
Bild 94:	Einteilung der Bohrverfahren von Schritt 1 bis Schritt 3 bzgl. erreichter Produktivität und Qualität	103
Bild 95:	Ishikawa Diagramm mit Ursachen für lokal begrenzte Schmelzrückstände an der Bohrungswand bei der Bearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung	104
Bild 97:	Primes MicroSpotMonitor 35	123
Bild 97:	Messung der relativen Intensitätsverteilung im Strahlfokus in Abhängigkeit vom Prozessfaserdurchmesser und der Fokussierbrennweite	124
Bild 99:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 477 kHz bei 20 -100 % mittlerer Leistung (26 - 134 W) erzielt werden	125
Bild 100:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 1 MHz bei 20 -100 % mittlerer Leistung (32 - 150 W) erzielt werden	125
Bild 101:	Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 5,1 MHz bei 20 – 100 % mittlerer Leistung (75 - 376 W) erzielt werden	126
Bild 101:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit der mittleren Leistung bei einer Repetitions-rate von 476 kHz.	127
Bild 102:	Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit der mittleren Leistung bei einer Repetitions-rate von 715 kHz.	127



## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifikationen der Faserlaserstrahl-quelle IPG YLS-600/6000-QCW	22
Tabelle 2:	Spezifikationen der Laserstrahlquelle AMPHOS 400	27
Tabelle 3:	Variierte Prozessfaser-durchmesser sowie Fokussierbrennweiten	32
Tabelle 4:	Konstante Verfahrens-parameter zur Ermittlung des Einflusses der Strahlführung und -formung auf die Bohrungsgeometrie	37
Tabelle 5:	Potentiell geeignete Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Prozessfaser-durchmesser zur Erreichung eines Eintrittsdurchmessers von 500 µm	44
Tabelle 6:	Zusammenfassung der geeigneten Verfahrens-parameter zum Bohren mit Faserlaserstrahlung (Schritt 1)	54
Tabelle 7:	Mittelwerte und Standard-abweichungen für Ein- und Austrittsdurchmesser, Konizität sowie der Schmelzschichtdicke für 30 Bohrungen	55
Tabelle 8:	Zusammenfassung geeigneter Parameter und der gemessenen Größen bei Verwendung von Kreisbewegungen	66
Tabelle 9:	Zusammenfassung geeigneter Parameter für das Bohren mit ultrakurz-gepulster Laserstrahlung (Schritt 2)	85
Tabelle 10:	Mittelwerte und Standard-abweichungen für Ein- und Austrittsdurchmesser, Konizität sowie der Schmelzrückstände für 55 Bohrungen	86
Tabelle 11:	Mittelwerte und Standard-abweichungen für Ein- und Austrittsdurchmesser, Konizität und Schmelzschicht-dicke für 30 Bohrungen	90
Tabelle 12:	Zusammenfassung geeigneter Parameter zum Abtrag der thermisch belasteten Bereiche mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung (Schritt 3)	101



## 10 Anhang

### 10.1 Strahlkaustikmessgerät

Die Vermessung der Kaustik der Laserstrahlung erfolgt mithilfe eines MicroSpotMonitor 35 der Firma Primes (Bild 96). Hierbei wird mit einem CCD Sensorelement die Verteilung der Laserstrahlung im räumlichen Umfeld der Fokusslage bestimmt. Das Sensorelement wird in Richtung der Laserstrahlung um die Lage des Strahlfokus herum verschoben und misst die Verteilung der Laserstrahlung in einer definierten Anzahl an Messebenen. Die Kaustik wird entsprechend der Norm EN ISO 11146 vermessen. In dieser wird auch gefordert, dass die Messebenen zu beiden Seiten der Fokusslage über eine Länge in Größe der Rayleighlänge verschoben werden müssen. Da der Verfahrensweg des MicroSpotMonitor maximal 35 mm beträgt, kann Laserstrahlung mit einer Rayleighlänge von bis zu 17,5 mm normgerecht bestimmt werden.

Bild 96: Primes  
MicroSpotMonitor  
35



### 10.2 Relative Intensitätsverteilung im Fokus der Laserstrahlung

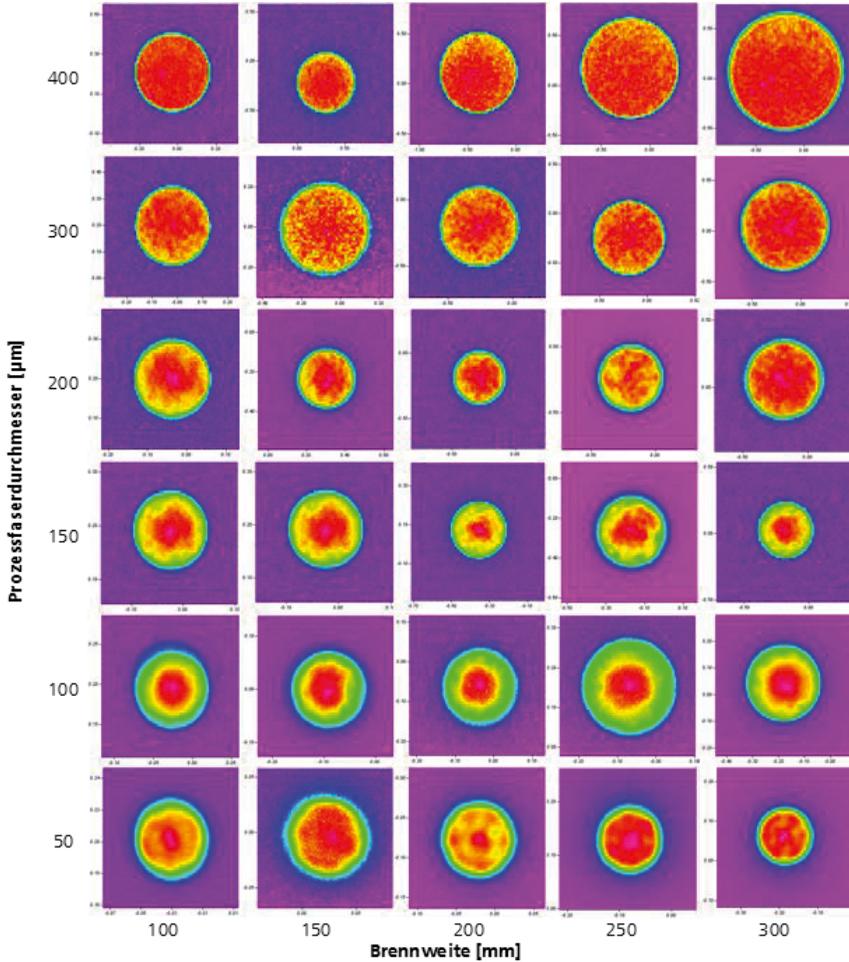


Bild 97: Messung der relativen Intensitätsverteilung im Strahlfokus in Abhängigkeit vom Prozessfaserdurchmesser und der Fokussierbrennweite

### 10.3 Längsschliffe von Bohrungen (Schritt 2) bei Repetitionsraten von 477 kHz, 1 MHz und 5,1 MHz

Bild 98: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 477 kHz bei 20 - 100 % mittlerer Leistung (26 - 134 W) erzielt werden

50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar

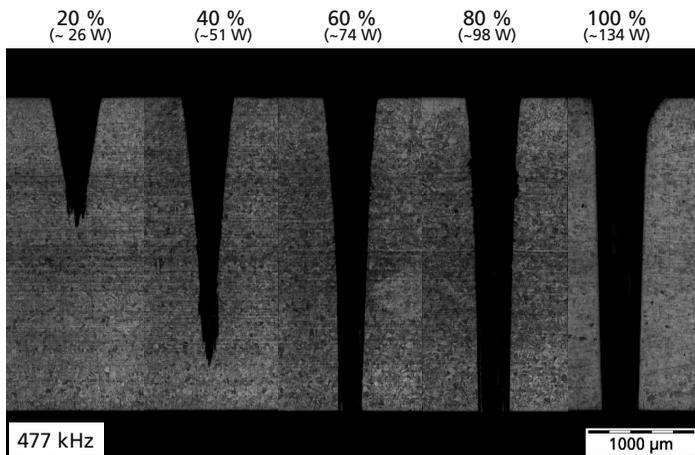
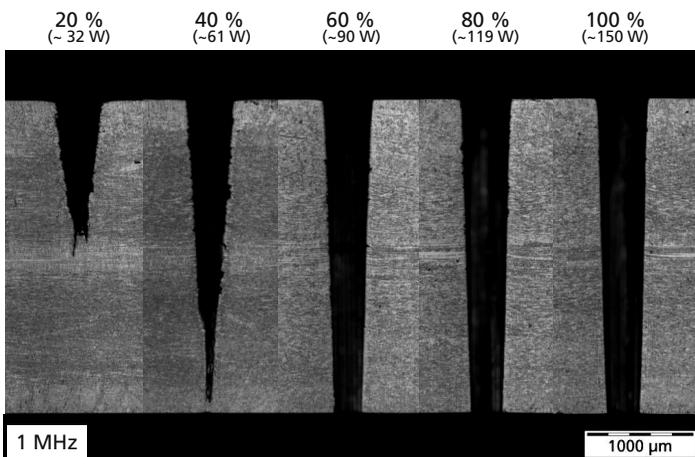


Bild 99: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 1 MHz bei 20 - 100 % mittlerer Leistung (32 - 150 W) erzielt werden

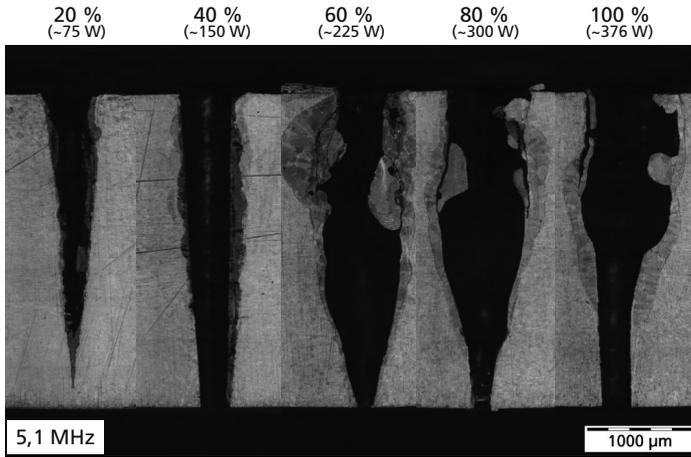
50 Kreise  
300 Wdh.  
147 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



Anhang

Bild 100: Geätzte Längsschliffe von Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 5,1 MHz bei 20 – 100 % mittlerer Leistung (75 - 376 W) erzielt werden

50 Kreise  
10 Wdh.  
5 s Bohrdauer  
Druckluft 5 bar



### 10.4 Ergebnisse des hybriden Bohrprozesses (Schritt 3) bei Repetitionsraten von 476 kHz und 715 kHz

Bild 101:  
Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit der mittleren Leistung bei einer Repetitionsrate von 476 kHz.

$f = 476$  kHz  
Anzahl Spiralen: 188  
Bearbeitungszeit: 15s  
5 bar Druckluft

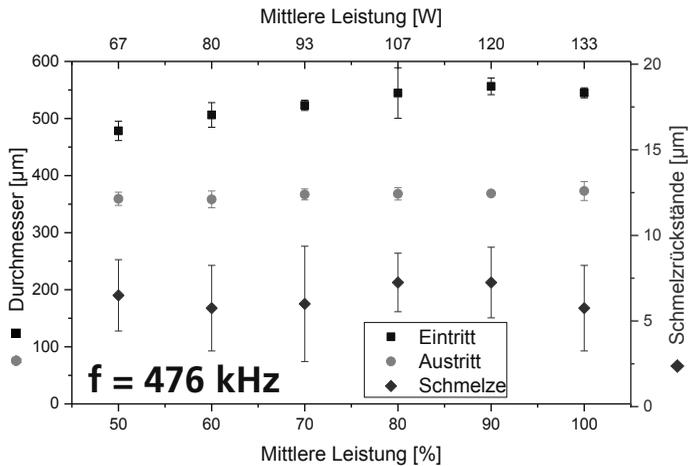
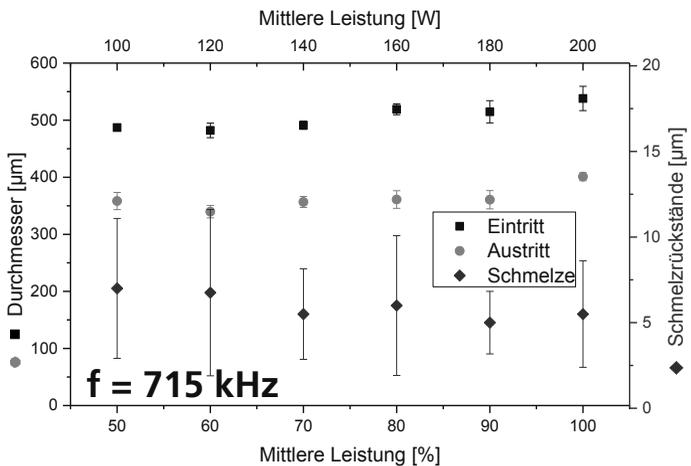


Bild 102:  
Ein- und Austrittsdurchmesser sowie Dicke der Schmelzrückstände in Abhängigkeit der mittleren Leistung bei einer Repetitionsrate von 715 kHz.

$f = 715$  kHz  
Anzahl Spiralen: 188  
Bearbeitungszeit: 15s  
5 bar Druckluft





## 11 Lebenslauf

### **Persönliche Angaben**

Geburtsdatum/-ort: 6. November 1985 in Warendorf  
Nationalität: Deutsch  
Familienstand: ledig

### **Schulbildung**

08/1992 – 07/1996 Overberg-Grundschule in Warendorf  
08/1996 – 06/2005 Gymnasium Laurentianum in Warendorf

### **Zivildienst**

07/2005 – 03/2006 Rettungsdienst des DRK OV Warendorf e. V.

### **Hochschulausbildung**

10/2006 – 11/2011 Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen University  
Studienrichtung: Produktionstechnik

### **Beruflicher Werdegang**

Seit 01/2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen University  
Seit 11/2012 Gruppenleiter Laserstrahl-Bohren am Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen University  
Seit 10/2015 Teamleiter Bohren und Präzisionstrennen am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT



## 12 Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lasertechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe als Leiter des Lehrstuhls für Lasertechnik und des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik für die Überlassung des Themas. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser für die Übernahme des Korreferats sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Adj. Prof. (RMIT) Dr.-Ing. Ingomar Kelbassa und Herrn Dr.-Ing. Arnold Gillner für das Vertrauen in meine Fähigkeiten, die Diskussionen, die maßgeblich für die Entwicklung meiner Arbeitsweise waren und die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl für Lasertechnik und am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, insbesondere bei Patrick Albus, Moritz Alkhayat, Johannes Finger, Chen Hong, Stefan Janssen, Christian Kalupka, Martin Reininghaus und Johannes Witzel.

Meinen studentischen Mitarbeitern Fabian Buse, Niklas Fögen, Jonas Hackmann, Paul Jagla, Vincent Köntges, Dorian Kürschner, Dominic Seidel, Felix ter Stein genannt Louven und Lennart Stohrer für die Unterstützung im Labor und Entlastung bei der Arbeit.

Meinen Diplom-, Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern Stefan Belitz, Alexander Bialdyga, Thomas Diekötter, Marcel Friedrichs, Dominic Gottschalk, Jonas Hackmann, Tobias Hampker, Paul Jagla, Stefan Janssen, Dorian Kürschner, Gefei Li, Robert Michels, Lennart Stohrer, Felix Uftring und Safak Yalcin für ihre Beiträge zu dieser Dissertation.

Meinen Eltern, die mir meinen Ausbildungsweg ermöglicht haben.

