

# Hybrides Laserstrahl-Bohren mit langgepulster und ultrakurzgepulster Laserstrahlung

von

Dorian Kürschner

Bachelorarbeit in Physik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

am 13.08.2015

angefertigt am

Lehrstuhl für Lasertechnik

Prof. Dr. rer. nat. R. Poprawe M. A.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik</b>	<b>2</b>
2.1	Wechselwirkung von Laserstrahlung mit kondensierter Materie	2
2.2	Laserstrahl-Bohren	6
2.3	Bohren von Kühlluftbohrungen	7
<b>3</b>	<b>Experimentelle Versuchsdurchführung</b>	<b>9</b>
3.1	Anlagen und Geräte	9
3.1.1	Faserlaserstrahlquelle	9
3.1.2	Ultrakurzgepulste Strahlquelle	10
3.1.3	Bearbeitungsoptiken	10
3.2	Vorgehensweise	11
3.3	Schritt 1: Faserlaserstrahlung	11
3.4	Schritt 2: Ultrakurzgepulste Laserstrahlung	12
3.5	Metallographische Auswertung	13
3.6	Charakterisierung der Bohrungen	13
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Versuchsdurchführung</b>	<b>14</b>
4.1	Schritt 1: Faserlaserstrahlung	14
4.1.1	Einfluss von Strahlführung und -formung	14
4.1.2	Einfluss der Verfahrensparameter	17
4.1.3	Untersuchung der Reproduzierbarkeit	24
4.2	Schritt 2: Ultrakurzgepulste Laserstrahlung	26
4.2.1	Einfluss der Abtragstrategie	27
4.2.2	Einfluss der Verfahrensparameter	29
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Erklärung</b>	<b>44</b>

# 1 Einleitung und Motivation

Das Bohren mittels Laserstrahlung ist ein Materialbearbeitungsverfahren, welches beispielsweise zum Erstellen kleiner Bohrungen in dünnen Schichten in der Photovoltaikindustrie und zur Fertigung von Kühlungsbohrungen in Gasturbinenschaufeln oder Brennkammern in der Energie- und Luftfahrtindustrie verwendet wird.

Durch die Kühlungsbohrungen wird aus dem hohlen Innenbereich der Turbinenschaufel ein kühlendes Fluid geleitet. Dies hat zur Folge, dass auf der Oberfläche der Turbinenschaufel ein Kühlfilm gebildet wird, wodurch diese einer größeren Temperatur ausgesetzt werden kann.

Konventionell werden Kühlungsbohrungen mittels Funkenerodieren (EDM), elektrochemischem Abtragen (ECM) oder blitzlampengepumpten Nd:YAG Laserstrahlquellen erzeugt [1]. Eine Optimierungsmöglichkeit dieses Fertigungsverfahrens ist das Ersetzen der Nd:YAG Laserstrahlquellen durch Faser- und ultrakurzgepulste Laserstrahlquellen. Beim Bohren mithilfe von Faserlaserstrahlung findet ein schmelzdominierter Materialabtrag statt. Daraus resultieren sowohl eine kleine Bohrdauer als auch das Ausbilden eines Schmelzfilms und Gefügeänderungen auf der Bohrungswand. Bei der Verwendung von ultrakurzgepulster Laserstrahlung ist die Bohrdauer größer als bei der Verwendung von Faserlaserstrahlung. Durch den dampfdominierten Abtragprozess beim Laserstrahlbohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung kann die thermische Belastung des Probenmaterials und die damit verbundene Schmelzfilmbildung reduziert werden.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Realisierung eines hybriden Bohrprozesses, sodass Bohrungen mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  in 3 mm dicke Proben aus Edelstahl 1.4301 hergestellt werden. Dafür wird zunächst eine Vorbohrung mittels langgepulster Faserlaserstrahlung in der Probe erzeugt. Anschließend werden die entstandenen wärmebeeinflussten Schichten mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung abgetragen. Dabei werden einerseits die große Produktivität des Bohrens mittels langgepulster Faserlaserstrahlung und die große Oberflächenqualität bezüglich Schmelzschichten an den Bohrungswänden beim Bohren mithilfe von ultrakurzgepulster Laserstrahlung andererseits miteinander kombiniert.

Durch eine Variation der verfahrensspezifischen Prozessparameter werden die Bohrungen bezüglich der Konizität und Schmelzfilmbildung optimiert.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Wechselwirkung von Laserstrahlung mit kondensierter Materie

Wird eine hinreichend dicke Probe kondensierter Materie Laserstrahlung ausgesetzt, wird die Strahlung bis auf einen reflektierten Teil absorbiert. Das Absorptionsverhalten ist materialspezifisch und hängt zusätzlich von den räumlichen sowie zeitlichen Strahlungseigenschaften ab. Die absorbierten Photonen erreichen eine optische Eindringtiefe, welche sich aus dem Lambert-Beer'schen Gesetz mit einem material- und wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  bestimmen lässt:

$$2.1 \quad I(r) = I_0 \cdot e^{-\alpha r}$$

Demnach ist der Betrag der an das Material übertragenden Energie sowohl von den Materialeigenschaften, der Wellenlänge der einfallenden Photonen  $\lambda$  und der Pulsdauer  $\tau$  des einfallenden Laserpulses abhängig. In Metallen basiert der Energieübertrag zwischen elektromagnetischer Strahlung und dem Festkörpergitter auf der Elektron-Photon-Wechselwirkung. Dabei geben die Photonen ihre Energie durch inverse Bremsstrahlung an die freien Elektronen im Material ab [2].

Maßgebend für die optischen Eigenschaften von Metallen ist die Elektronendichte  $N_e$ . Daraus kann die Plasmafrequenz  $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / (m_e \epsilon_0)}$  bestimmt werden. Ist  $\omega_p$  größer als die Frequenz  $\omega$  der einfallenden Laserstrahlung wird die Strahlung zu einem großen Teil absorbiert. Für Frequenzen  $\omega > \omega_p$  ist der Absorptionsgrad klein, da die Elektronen nicht schnell auf die einfallende Strahlung reagieren und diese abschirmen können [3].

Die Wechselwirkung der freien Elektronen mit der einfallenden Laserstrahlung hat zur Folge, dass zwischen der Elektronentemperatur und der Temperatur des Gitters eine Differenz entsteht. Die Relaxation in das thermische Gleichgewicht geschieht über die Elektron-Phonon-Wechselwirkung innerhalb der Wechselwirkungszeit  $\tau_{e-ph}$  mit der Größenordnung  $10^{-10}$  s bis  $10^{-12}$  s.

Durch eine Intensität größer als eine materialabhängige Schwellintensität, kann ein Materialabtrag erfolgen. Für Stahl liegt die zum Aufschmelzen benötigte Intensität in der Größenordnung von  $10^5$  W/cm<sup>2</sup>. Zum Verdampfen des

Probenmaterials ist eine Intensität von einigen  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> erforderlich [4]. Die für einen Materialabtrag benötigte Schwellfluenz für Eisen<sup>1</sup> ist 0,15 J/cm<sup>2</sup> [5].

Konventionell werden zum Laserstrahl-Bohren blitzlampengepumpte Festkörperlaser- oder Faserlaserstrahlquellen verwendet. Letztere emittieren Laserpulse mit einer Pulsdauer im Bereich von  $10^{-4}$  s. Dies ist um einige Größenordnungen größer als die Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit. Somit erfolgt der Energieübertrag der Elektronen an das Kristallgitter bereits während der Laserpulse mit dem Probenmaterial wechselwirkt. Die Folge ist ein Abtragprozess, bei dem das Probenmaterial sowohl aufgeschmolzen als auch verdampft wird. Sobald der in der Bohrung entstehende Dampfdruck den Detonationsdruck erreicht, wird das aufgeschmolzene Probenmaterial aus der Bohrung ausgetrieben. Dies ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

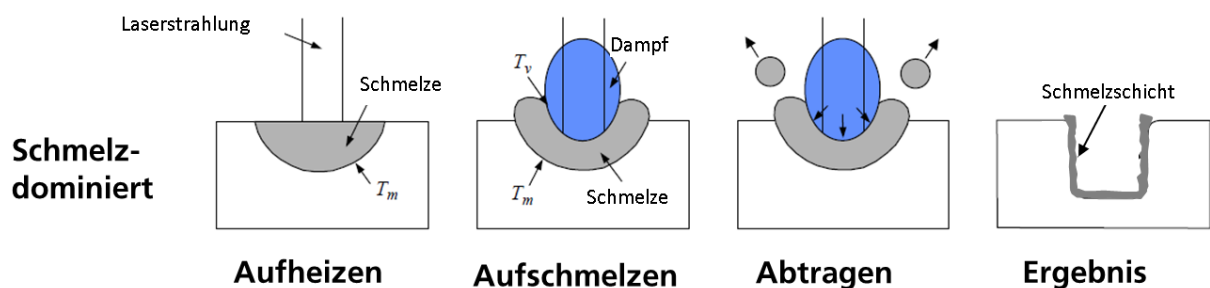


Bild 1: Schematische Darstellung des schmelzdominierten Abtragprozesses. Dabei sind  $T_m$  die Schmelz- und  $T_v$  die Verdampfungstemperatur [6]

Zur Abschätzung der Materialtiefe, welche durch einen Laserpuls thermisch belastet wird, kann die maximale thermische Eindringtiefe  $l_T$  verwendet werden.  $l_T$  ergibt sich mit der materialspezifischen Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$  zu

2.2

$$l_T \approx 4\sqrt{\kappa\tau_p} [4]$$

Für die in dieser Arbeit verwendeten Pulsdauern der Faserlaserstrahlung maximale thermische Eindringtiefe<sup>2</sup> zu  $l_T \approx 50$   $\mu\text{m}$ . Bei der Verwendung der ultrakurzgepulsten Laserstrahlung ist  $l_T \approx 6$  nm.

<sup>1</sup> Eisen ist der Hauptbestandteil von Edelstahl

<sup>2</sup> Die Temperaturleitfähigkeit von Edelstahl ist  $k=0,04$  cm<sup>2</sup>/s [4]. Die verwendete Pulsdauer für Faserlaserstrahlung beträgt 0,5 ms. Die verwendete Pulsdauer für ultrakurzgepulste Laserstrahlung ist 7,65 ps.

Am Laserpulsende ist die Temperatur  $T(z)$  des Probenmaterials abhängig von der Materialtiefe  $z$ .

2.3

$$T(z) = T_0 + \frac{I_{abs}}{\lambda} l_T \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{l_T}\right)$$

Dabei ist  $T_0$  die Materialtemperatur vor dem Laserpuls,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials und  $I_{abs}$  die absorbierte Intensität des Laserpulses [7]. Zur Reduzierung der thermischen Eindringtiefe  $l_T$  kann nach Formel 2.2 die Pulsdauer  $\tau_p$  verkleinert werden. Bei der Verwendung ultrakurzer Laserpulse findet ein dampfdominierter Materialabtrag statt (Bild 2).

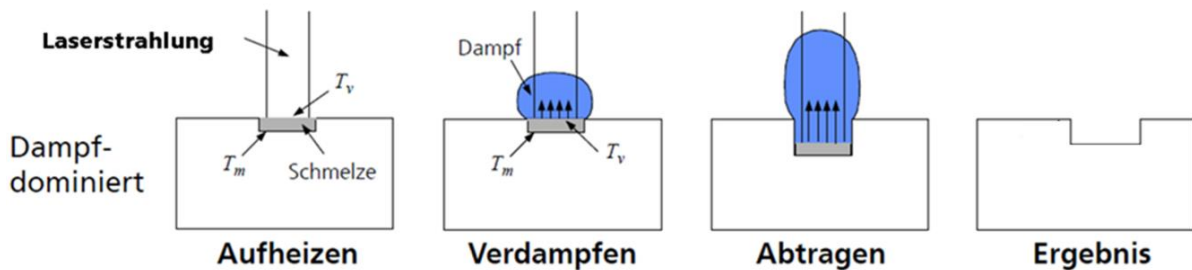


Bild 2: Schematische Darstellung des dampfdominierten Abtragprozesses Dabei sind  $T_m$  die Schmelz- und  $T_v$  die Verdampfungstemperatur [6]

Da bei ultrakurzen Pulsen die Pulsdauer in oder unterhalb der Größenordnung von  $\tau_{e-ph}$  liegt, entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen der Elektronen- und der Gittertemperatur. Dies kann mit dem Zwei-Temperatur-Modell beschrieben werden, worauf in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

Unter Berücksichtigung von Wärmeleiteffekten kann für eine Zeit  $t$  nach dem Laserpuls die Oberflächentemperatur  $\Delta T$  der Probe mit Formel 2.4 angenähert werden.

2.4

$$\Delta T(t) \approx \frac{I_a \omega_0^2 \tau_p}{4\lambda t \sqrt{\pi \kappa t}}$$

Dabei ist  $I_a = AE_p / (t \omega_0^2 \pi)$  die absorbierte Intensität<sup>3</sup> und  $\omega_0$  der Fokusradius<sup>4</sup> [4]. Wird die Probenoberfläche mit einer Repetitionsrate  $f_{rep}$  bestrahlt, vergrößert sich die Oberflächentemperatur mit jedem Puls um  $\Delta T(1/f_{rep})$ .

Bei langgepulsten Laserstrahlquellen wird zur Charakterisierung der maximal vom Laser übertragenen Energie pro Pulsdauer  $\tau_p$  die Pulsspitzenleistung  $P$  verwendet.

<sup>3</sup> A entspricht dem Absorptionsgrad

<sup>4</sup> Der Radius eines gaußförmigen Laserstrahls bezieht sich auf den Abstand zum Mittelpunkt, an dem die Intensität auf den 1/e<sup>2</sup>-ten Teil abgefallen ist.

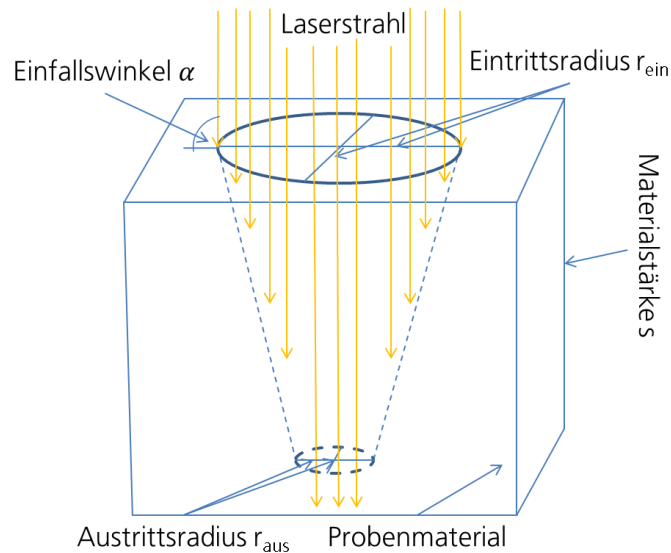
Mithilfe der bestrahlten Fläche  $A$  ergibt sich für die Intensität  $I$

2.5

$$I = \frac{P}{A}$$

Für einen Einfallswinkel  $\alpha = 90^\circ$  zur Probenoberfläche ist der Fokus eines gaußförmigen Laserstrahls kreisförmig mit dem Radius  $\omega_0$ . Trifft ein Laserpuls mit einem Radius  $\omega_0 = r_{ein}$  auf eine bereits vorhandene Bohrung mit dem Eintrittsradius  $r_{ein}$  wird der kreisförmige Fokus auf einen Kegelstumpf projiziert (siehe Bild 3). Das Intensitätsmaximum des Laserstrahls liegt in der Mitte der Bohrung. Folglich werden die Wände mit einer Intensität kleiner als die maximale Intensität bestrahlt.

Bild 3:  
Schematische  
Darstellung der  
Projektion des  
kreisförmigen Fokus  
auf einen  
Kegelstumpf



Für das Leistungsprofil gilt:

2.6

$$P(r) = P_0 \cdot e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}}$$

Durch Einsetzen der Formel **2.6** in **2.5** ergibt sich mit der Mantelfläche  $A$  des Kegelstumpfs die Intensität<sup>5</sup>

2.7

$$I = \frac{P_0 \cdot \left( e^{-\frac{r_{aus}^2}{\omega_0^2}} - e^{-\frac{r_{ein}^2}{\omega_0^2}} \right)}{\pi(r_{ein} + r_{aus})\sqrt{s^2 + (r_{ein} - r_{aus})^2}}$$

<sup>5</sup> Dabei wird angenommen, dass die Strahlung zu 100% absorbiert wird und keine Reflektionen stattfinden

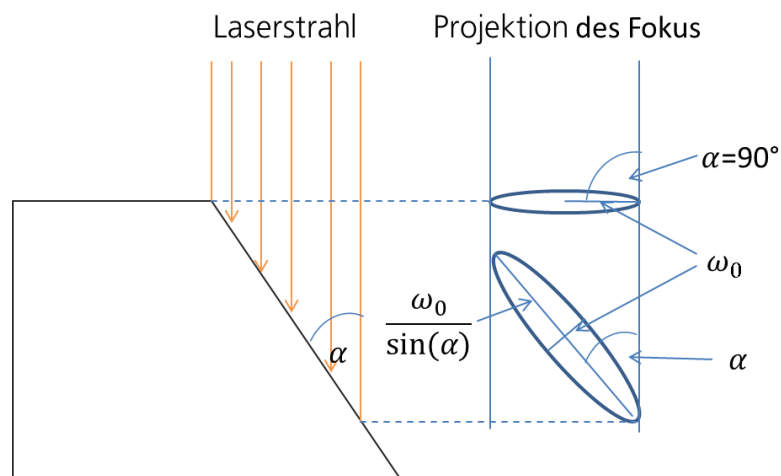
Bei ultrakurzgepulsten Laserstrahlquellen wird aufgrund der kleinen Einwirkzeit der Laserstrahlung auf die Probe die Fluenz  $F$  zur Bestimmung der in eine Fläche  $A$  eingebrachten Energie verwendet.  $F$  kann mit der mittleren Leistung  $P_{mittel}$  der Repetitionsrate  $f_{rep}$  bestimmt werden zu:

$$2.8 \quad F = \frac{P_{mittel}}{f_{rep} \cdot A}$$

Trifft der Fokus mit einem Fokusradius  $\omega_0 \ll r$  auf die Bohrungswand kann die Krümmung der Wand näherungsweise vernachlässigt werden. Für eine Neigung der Fläche um einen Winkel  $(90^\circ - \alpha)$  wird der kreisförmige Fokus auf eine Ellipse projiziert. Dies ist schematisch in Bild 4 dargestellt. Die Länge der großen Halbachse ist  $r/\sin(\alpha)$ . Folglich ist die Fluenz  $F$ :

$$2.9 \quad F \leq \frac{P_{mittel} \cdot \sin(\alpha)}{f_{rep} \cdot \pi \omega_0^2}$$

Bild 4:  
Schematische  
Darstellung der  
Projektion eines  
Kreises auf eine  
Ellipse



## 2.2 Laserstrahl-Bohren

Im Allgemeinen wird beim Laserstrahlbohren zwischen vier Bohrverfahren differenziert: Einzelpuls-, Perkussions-, Trepanier- und Wendelbohren. Beim Einzelpuls- und Perkussionsbohren wird keine Relativbewegung zwischen Laserfokus und Probe durchgeführt, während beim Trepanier und Wendelbohren eine Relativbewegung zwischen Probe und Laserstrahlung realisiert wird.



Beim Einzelpulsbohren wird die Bohrung durch einen einzelnen Laserpuls hergestellt. Dabei können Bohrungstiefen bis zu 2 mm erreicht werden [8]. Der Bohrungsdurchmesser hängt dabei vom Fokusbereich ab.

Analog zum Einzelpulsbohren ist der Bohrungsdurchmesser beim Perkussionsbohren vom Fokusbereich abhängig. Allerdings wird hier eine Pulsfolge zum Materialabtrag verwendet. Daraus resultiert eine größere maximale Bohrungstiefe. Durch Reflektionen der Laserstrahlung an den Bohrungswänden können Bohrungstiefen bis zu 20 mm erreicht werden.

Im Gegensatz zu unbewegten Laserbohrverfahren wird beim Trepanierbohren eine Relativbewegung zwischen Probe und Laserstrahlung durchgeführt. Somit können größere Bohrungsdurchmesser in Abhängigkeit von der Relativbewegung realisiert werden.

Beim Wendelbohren wird eine Bohrung durch spiralförmiges Abtragen des Probenmaterials erzeugt. Dabei wird der Fokus entsprechend der erreichten Bohrungstiefe nachgeführt [9].

In dieser Arbeit wird in Kapitel 4.1 perkussionsbohren verwendet. In Kapitel 4.2 wird der Abtrag des Probenmaterials durch eine Spiralbewegung des Fokus mithilfe eines Galvoscanners realisiert. Dabei wird die Laserstrahlung auf die Probenoberfläche fokussiert.

### 2.3 Bohren von Kühlluftbohrungen

Zur Optimierung von Kühlluftbohrungen wurden bereits einige Arbeiten durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst werden.

Mittels einer Variation der Fokussierbrennweite, des Kerndurchmessers der Prozessfaser und der Pulsspitzenleistung konnte für das Perkussionsbohren mit Faserlaserstrahlung gezeigt werden, dass Bohrungseintrittsdurchmesser zwischen 130  $\mu\text{m}$  und 1250  $\mu\text{m}$  und Durchmesser der Bohrungsausgänge von 130  $\mu\text{m}$  bis 685  $\mu\text{m}$  realisierbar sind. Dabei wurden 3 mm dicke Proben aus Edelstahl 1.4301 verwendet. Weiterhin konnte keine Abhängigkeit der Fokusslage bezüglich der Probenoberfläche auf die Konizität der Bohrungen festgestellt werden. Die Wahl der Prozessgasart hat einen Einfluss auf die geometrische Form der Bohrung, da mittels reaktiven Gasen zusätzliche Energie in den Bohrprozess eingebracht und somit größere Bohrungstiefen erreicht werden können. Des Weiteren treibt das Prozessgas die entstehende Schmelze aus der Bohrung aus, was eine Verkleinerung der thermischen Belastung der Bohrungsoberfläche sowie der Schmelzfilmdicken zufolge hat [10].

Die durch das Prozessgas ausgetriebene Schmelze erkaltet auf der Oberfläche und muss nach dem Bohrprozess entfernt werden. Das Entfernen der Schmelzschicht wird durch Verwendung von Interpulsshaping erleichtert [11].

Bei der Verwendung inerte Gase wird im Vergleich zu reaktiven Gasen eine vermehrte Schmelzentwicklung in der Bohrung nachgewiesen [12]. Folglich werden in dieser Arbeit reaktive Gase verwendet.

Beim Laserstrahl-Bohren mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung werden aufgrund des dampfdominierten Abtragprozesses Bohrungen mit einer großen metallographischen Qualität der Bohrungswände hergestellt. Analog zum Laserstrahl-Bohren mit Faserlaserstrahlung eignen sich inerte Gase nur begrenzt zum Bohren zylindrischer Bohrungen. Zudem wurden verschiedene Verfahrensbewegungen des Galvoscaners untersucht. Die Bohrungen mit der kleinsten Konizität können mithilfe von Spiralbewegungen erzeugt werden. Bei der Verwendung inerte Gase im Bohrprozess werden sanduhrähnliche Bohrungsgeometrien nachgewiesen. Somit eignen sich inerte Gase nicht für einen Bohrprozess mit ultrakurzgepulster Strahlung, bei dem zylindrische Bohrungen entstehen sollen [13].

## 3 Experimentelle Versuchsdurchführung

### 3.1 Anlagen und Geräte

#### 3.1.1 Faserlaserstrahlquelle

Die Generierung der langgepulsten Laserstrahlung erfolgt in dieser Arbeit mithilfe einer Faserlaserstrahlquelle der Firma IPG – Photonics. Die spezifischen Daten der verwendeten Laserstrahlquelle sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1:  
Übersicht über die  
spezifischen Daten  
der verwendeten  
Faserlaserstrahlquelle

Kenngröße	IPG - Photonics
<b>Bezeichnung</b>	Ytterbium Laser System: YLS-600/6000-QCW-AC
<b>Aktives Medium</b>	Ytterbium
<b>Wellenlänge</b>	1070 nm
<b>Pulsdauer</b>	0,2 – 10 ms
<b>Repetitionsrate</b>	10 – 500 Hz
<b>Kerndurchmesser der Strahlführungsfaser</b>	50 $\mu\text{m}$
<b>Maximale Pulsspitzenleistung</b>	6000 W

Die erzeugte Laserstrahlung wird durch eine Strahlführungsfaser mit einem Kerndurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  an die verwendete Bearbeitungsoptik weitergeleitet.

Zur Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Kerndurchmessern der Prozessfaser wird die Strahlführungsfaser mit einer Faser mit größerem Kerndurchmesser zu verbunden. Dies geschieht mit einem Faserkoppler der Firma Optoskand. Innerhalb des Faserkopplers wird die eintreffende Laserstrahlung mit einem Kollimator parallel aufgeweitet, anschließend mit einer Linse gebündelt und in die Faser mit der gewünschten Dicke überführt. Diese wird mit der Bearbeitungsoptik verbunden. Eine schematische Darstellung des verwendeten Aufbaus ist in Bild 32 (Anhang) gezeigt.

### 3.1.2 Ultrakurzgepulste Strahlquelle

Zur Erzeugung von ultrakurzgepulster Laserstrahlung wird eine Laserstrahlquelle der Firma Amphos verwendet. Eine Übersicht über die spezifischen Daten der Laserstrahlquelle ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2:  
Übersicht über die  
spezifischen Daten  
der verwendeten  
ultrakurzgepulster  
Laserstrahlquelle

Kenngröße	Amphos
<b>Bezeichnung</b>	Amphos 400
<b>Aktives Medium</b>	Ytterbium
<b>Wellenlänge</b>	1030 nm
<b>Pulsdauer</b>	0,69 - 7,65 ps
<b>Repetitionsrate (Seedlaser)</b>	1,4 - 56.8 MHz
<b>Mittlere Leistung</b>	400 W
<b>Maximale Pulsenergie</b>	285 $\mu$ J

Der modengekoppelte Seedlaser (Master Oszillator) erzeugt Laserpulse mit kleinen Pulsenergien. Diese werden im Power Amplifier verstärkt, sodass bei 1,43 MHz Pulsenergien von bis zu 285  $\mu$ J erzeugt werden können. Durch die Verwendung eines elektrooptischen Modulators (EOM) kann die Repetitionsrate mittels Pulspicking verkleinert werden. Daraus resultiert eine kleinere mittlere Leistung bei einer unveränderten Pulsenergie von maximal 285  $\mu$ J.

Aufgrund der großen Pulsspitzenleistungen würde eine Strahlführungsfaser beschädigt werden. Darum werden zur Strahlführung hochreflektierende Spiegel verwendet. Eine schematische Darstellung des verwendeten Strahlengangs ist in Bild 33 (Anhang) gezeigt.

### 3.1.3 Bearbeitungsoptiken

Zum Bohren mittels Faserlaserstrahlung wird die Bearbeitungsoptik YK52 der Firma Precitec mit einer Kollimationsbrennweite von 100 mm verwendet. Die Fokussierbrennweite kann durch Austauschen der Fokussierlinse in 50 mm - Schritten von 150 mm bis 300 mm variiert werden. In die Bearbeitungsoptik ist eine Prozessgasdüse integriert. Der Abstand zwischen der Prozessgasdüse und der Probenoberfläche beträgt 4 mm.

Zum Bohren mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung wird ein Galvoscaner der Firma Aerotec verwendet. Die Brennweite der fokussierenden Linse beträgt 163 mm. Ein Galvoscaner besteht aus zwei Spiegeln, welche durch elektrische

Ströme gedreht werden können. Somit kann eine Verfahrbewegung des Laserfokus auf der Probenoberfläche erfolgen. Unterhalb des Galvoscaners ist eine Prozessgasdüse mit einem ungefähren Abstand von 5 mm zur Probenoberfläche angebracht. Durch die Düse wird ein Prozessgas geleitet, welches das geschmolzene und verdampfte Probenmaterial aus der Bohrung austreibt und das Probenmaterial kühlt.

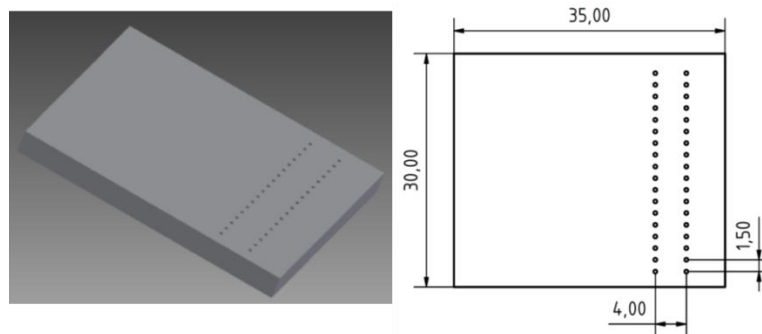
### 3.2 Vorgehensweise

Zunächst wird eine Bohrung mit langgepulster Faserlaserstrahlung gebohrt und daraufhin die wärmebeeinflussten Schichten der bereits vorhandenen Bohrung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung abgetragen. Die experimentelle Durchführung ist in zwei Schritte unterteilt:

- Schritt 1: Bohren mithilfe langgepulster Faserlaserstrahlung
- Schritt 2: Abtragen der wärmebeeinflussten Schichten der Bohrungswände mithilfe ultrakurzgepulster Laserstrahlung

Die hergestellten Bohrungen werden metallographisch ausgewertet und hinsichtlich Schmelzfilmdicke, Geometrie und Änderungen im Metallgefüge untersucht. Die genaue Probengeometrie ist in Bild 5 gezeigt.

Bild 5  
CAD-Zeichnung der  
verwendeten  
Probengeometrie.  
Die Materialstärke  
beträgt 3 mm.



Für jeden untersuchten Parametersatz werden jeweils drei Bohrungen hergestellt. Diese werden bezüglich der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte sowie der Schmelzfilmdicke vermessen. Anschließend werden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung aus den gemessenen Werten gebildet.

### 3.3 Schritt 1: Faserlaserstrahlung

Zuerst werden Bohrungen mit langgepulster Faserlaserstrahlung erzeugt. Dabei soll der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Bohrung untersucht werden. Die variierbaren Parameter können der Tabelle 3 entnommen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Kombinationen der jeweiligen Parameter untersucht.

Tabelle 3:  
Übersicht über die  
variierten  
Prozessparameter  
der  
Faserlaserstrahlung

Parameter	Formelzeichen	Wert	Einheit
<b>Prozessfaserdurchmesser</b>	$d_F$	50, 100, 150, 200, 250, 300, 400	$\mu\text{m}$
<b>Fokussierbrennweite</b>	$f_{foc}$	150, 200, 250, 300	mm
<b>Pulsspitzenleistung</b>	P	600 – 6000	W
<b>Pulsdauer</b>	$\tau_p$	0,2 – 0,8	ms
<b>Repetitionsrate</b>	$f$	20 – 100	Hz
<b>Prozessgasart</b>		Druckluft, Sauerstoff	
<b>Prozessgasdruck</b>		5, 7.5, 10	bar

Ziel dieses Arbeitsschritts ist das Erstellen zylindrischer Bohrungen mit einem Durchmesser von 450  $\mu\text{m}$  sodass diese in Schritt 2 aufgeweitet werden können.

### 3.4 Schritt 2: Ultrakurzgepulste Laserstrahlung

Analog zu Kapitel 3.3 soll der Einfluss der Prozessparameter auf die Bohrungsgeometrie und Schmelzfilmbildung der Bohrungen untersucht werden, die durch das Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung entstehen. Tabelle 4 enthält die in dieser Arbeit variierten Prozessparameter der ultrakurzgepulsten Laserstrahlung.

Tabelle 4:  
Übersicht über die  
variierten  
Prozessparameter  
der  
ultrakurzgepulsten  
Laserstrahlung

Parameter	Formelzeichen	Wert	Einheit
<b>Repetitionsrate</b>	$f$	1430, 715, 476, 358, 238, 200, 100	kHz
<b>Leistung</b>	P	100, 90, 80, 70, 60, 50	%
<b>Spiraldurchmesser</b>	$d$	440, 450, 460, 470, 480	$\mu\text{m}$
<b>Bohrdauer</b>	$t$	1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15	s

Der Spiraldurchmesser bezieht sich auf den Außendurchmesser der vom Galvoscaner durchgeführten Spiralbewegung (vgl. Bild 19). Ziel der Variation der Prozessparameter ist die Aufweitung der in Schritt 1 erstellten Bohrungen um 50  $\mu\text{m}$ . Dabei soll der thermisch beeinflusste Bereich der Bohrungen abgetragen werden.

### 3.5 Metallographische Auswertung

Zunächst werden die durch den Bohrprozess entstandenen Ablagerungen des ausgetriebenen Materials auf der Probenoberfläche mit Schleifpapier entfernt. Daraufhin wird die Probe in einen Schleifblock eingespannt und durch Nassschleifen bis zur Bohrungsmitte abgetragen. Längsschliff wird anschließend mit einer Diamantsuspension (Körnung 1 µm) poliert und 12 Sekunden mit 50-prozentigen Ätzmittel nach Adler geätzt. Dies hat zur Folge, dass Gefügeänderungen und Korngrenzen sichtbar gemacht werden.

Die Auswertung der präparierten Proben erfolgt durch mikrostrukturelle Untersuchungen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX). Dabei werden sowohl die erzielten Bohrungsgeometrien und Schmelzfilmdicken als auch Änderungen im Gefüge, wie beispielsweise Risse, analysiert.

### 3.6 Charakterisierung der Bohrungen

Zur Charakterisierung der Bohrungen werden die Durchmesser der Bohrungsein- und austritte sowie Schmelzfilmdicken gemessen. Bei der Ermittlung der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Messung in einem Abstand von 10 Prozent der Probendicke zur Probenoberfläche durchzuführen. Somit werden die beim Bohrprozess entstehenden Abrundungen an den Bohrungseintritten nicht berücksichtigt [5].

Ein Kriterium zur Bewertung der Bohrungsgeometrie ist die Konizität. Diese lässt sich aus dem Durchmesser der Eintritte  $D_{Ein}$  und der Austritte  $D_{Aus}$  sowie der Probendicke  $s$  bestimmen:

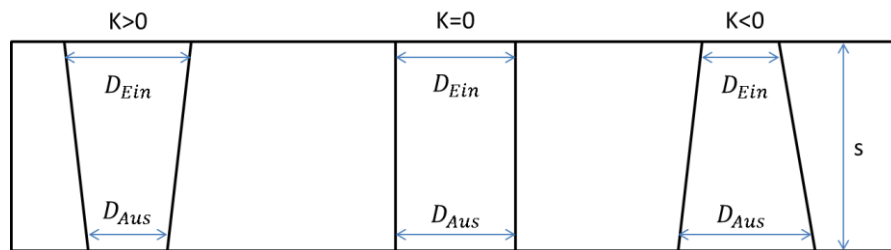
$$3.1 \quad K = \frac{D_{Ein} - D_{Aus}}{s} \cdot 100 [\%]$$

Die verschiedenen Bohrungsgeometrien mit den zugehörigen Konizitäten sind schematisch in Bild 6 dargestellt. Ziel dieser Arbeit ist das Erstellen von möglichst zylindrischen Bohrungen<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Dies entspricht einer Konizität  $K=0$ .

Bild 6:  
Schematische  
Darstellung der  
Bohrungsgeometrien  
sowie deren  
Konizitäten K



## 4 Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Versuchsdurchführung

### 4.1 Schritt 1: Faserlaserstrahlung

#### 4.1.1 Einfluss von Strahlführung und -formung

Zunächst wird der Einfluss der Fokussierbrennweite und des Prozessfaserdurchmessers auf die Durchmesser der Bohrungsein- und austritte untersucht.

Die Größe des Probenvolumens, in welchem eine Wechselwirkung zwischen Material und Laserstrahlung stattfinden kann, ist vom Fokussierdurchmesser abhängig. Eine Abschätzung des Fokussierdurchmessers erfolgt mithilfe der Strahlenoptik mit der nachfolgenden Formel **4.1**.

4.1

$$d_{Fokus} \approx \frac{1}{f_{col}} \cdot f_{foc} \cdot d_{Faser}$$

Dabei entspricht  $f_{col}$  der Brennweite der Kollimation<sup>7</sup>,  $f_{foc}$  der Fokussierbrennweite und  $d_{Faser}$  dem Kerndurchmesser der Prozessfaser.

<sup>7</sup> Die im folgenden verwendete Bohroptik enthält eine Kollimationslinse mit der Brennweite  $f_{col}=100$  mm



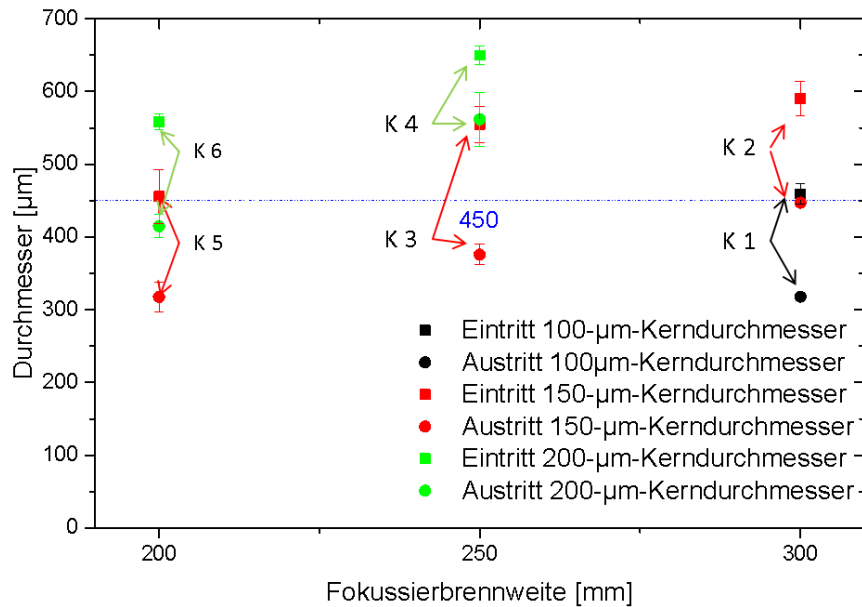
Zuerst wird ein Parametersatz ermittelt, mit dem zylindrische Bohrungen mit einem Eintrittsdurchmesser in der Größenordnung von 450  $\mu\text{m}$  erzeugt werden. Dies kann mithilfe verschiedener Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Kerndurchmessers der Prozessfaser erreicht werden. Die möglichen Kombinationen mit denen Bohrungen mit einem Durchmesser der Bohrungseintritte in der Größenordnung von 450  $\mu\text{m}$  hergestellt werden können, sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei werden die Fokussierbrennweite mithilfe der Formel **4.1** bestimmt.

Tabelle 5:  
Zusammenfassung  
möglicher  
Kombinationen von  
Fokussierbrennweite  
und  
Kerndurchmesser  
der Prozessfaser mit  
denen Bohrungen  
hergestellt werden  
können deren  
Durchmesser der  
Bohrungseintritte in  
der Größenordnung  
von 450  $\mu\text{m}$  liegen

Kombination K	Fokussierbrennweite [mm]	Kerndurchmesser der Prozessfaser [ $\mu\text{m}$ ]	Fokussier- durchmesser [mm]
<b>1</b>	300	100	300
<b>2</b>	300	150	450
<b>3</b>	250	150	375
<b>4</b>	250	200	500
<b>5</b>	200	150	300
<b>6</b>	200	200	400

Die experimentell ermittelten Daten für die in Tabelle 5 aufgeführten Kombinationen aus Fokussierbrennweite und Kerndurchmesser der Prozessfaser sind in Bild 7 gezeigt. Bei Vergrößerung der Kerndurchmesser der Prozessfaser ist bei konstanter Fokussierbrennweite eine Vergrößerung der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte zu beobachten.

Bild 7:  
Abhängigkeit der  
Durchmesser der  
Bohrungsein- und  
austritte von der  
Fokussierbrennweite  
und dem  
Kerndurchmesser  
der Prozessfaser. Die  
blau gestrichelte  
Linie entspricht dem  
geforderten  
Durchmesser der  
Eintritte. Die  
Verwendeten  
Prozessparameter  
sind: P= 6000 W,  
F= 50 Hz, t= 0,5 ms,  
Gasart: Sauerstoff,  
Gasdruck= 5 bar.



Aus den gemessenen Durchmessern der Bohrungseintritte ergeben sich eine Fokussierbrennweite von 300 mm mit einem Kerndurchmesser der Prozessfaser von 100 µm (Kombinationen 1) sowie eine Fokussierbrennweite von 200 mm mit einem Kerndurchmesser der Prozessfaser von 150 µm (Kombination 5) als mögliche Prozessparameter. Die Konizitäten sind innerhalb der Fehlergrenzen mit  $(4,7 \pm 0,1) \%$  von Kombination 1 und  $(4,6 \pm 1,4) \%$  von Kombination 5 in der gleichen Größenordnung.

Ein direkter Vergleich der Längsschliffe der Bohrungen ist in Bild 8 dargestellt. Bei den mit Kombination 5 hergestellten Bohrungen sind im Mittel 17 µm größere Schmelzfilmdicken und 10 µm tiefere Einbrände erkennbar als bei den Bohrungen, die mit Kombination 1 erstellt werden. Deshalb werden für alle weiteren Versuche eine Fokussierbrennweite von 300 mm und ein Kerndurchmesser der Prozessfaser von 100 µm verwendet.

Bild 8:  
Vergleich der Längsschliffe der Bohrungen, die mit den Kombinationen 1 und 5 aus Tabelle 5 hergestellt werden. Es sind Einbrände (rot) und Schmelzfilme (grün) erkennbar.



Die für die im Folgenden verwendete Kombination gemessene Strahlkaustik ist in Bild 9 dargestellt. Das Strahlprofil kann als Gaußförmig angenommen werden. Der gemessene Fokaldurchmesser beträgt  $308 \mu\text{m}$ . Aufgrund der Rayleighlänge von ungefähr  $8,7 \text{ mm}$  können kleine Fokuslagenabweichungen vernachlässigt werden.

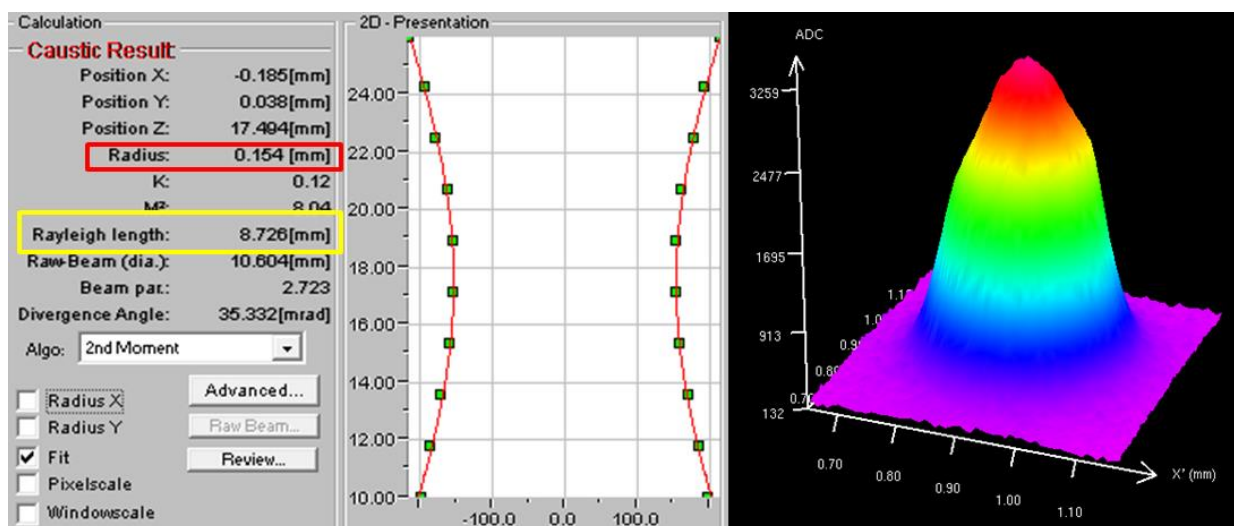


Bild 9: Gemessene Strahlkaustik für einen Kerndurchmesser der Prozessfaser von  $100 \mu\text{m}$  und einer Brennweite von  $300 \text{ mm}$  (links) und räumlich aufgelöste Intensitätsverteilung im Fokus (rechts)

#### 4.1.2 Einfluss der Verfahrensparameter

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Verfahrensparameter auf die Durchmesser der Bohrungsein- und austritte sowie die Schmelzfilmdicken an den Bohrungswänden untersucht. Als Prozessgas wird in den ersten drei

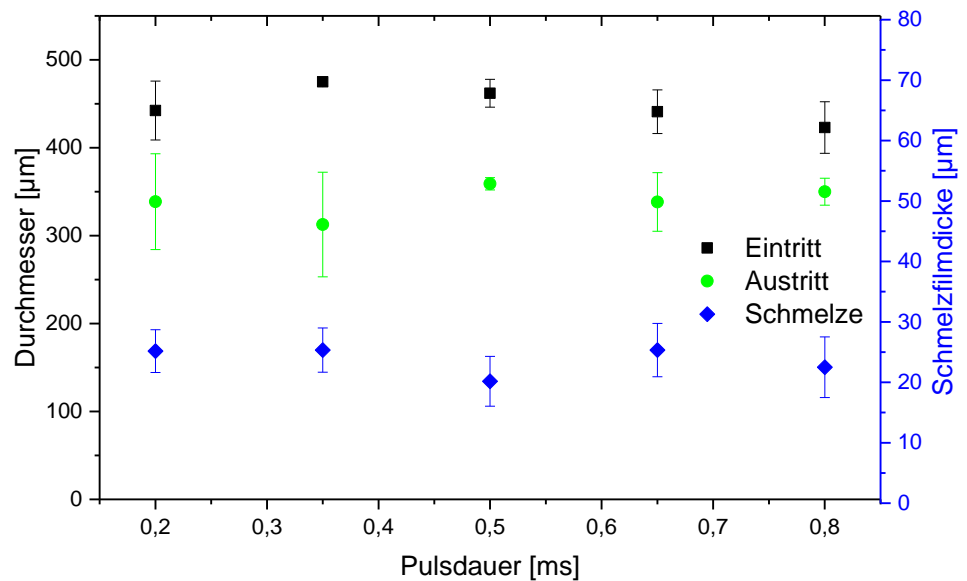
Versuchsreihen Sauerstoff mit einem Prozessgasdruck von 5 bar verwendet. Die variierten Verfahrensparameter sind:

- Pulsdauer
- Repetitionsrate
- Pulsspitzenleistung
- Prozessgas

### Einfluss der Pulsdauer

Durch Variation der Pulsdauer kann bei konstanter Pulsspitzenleistung und Repetitionsrate die mittlere Leistung der Laserstrahlung beeinflusst werden. Die experimentellen Ergebnisse für Pulsspitzenleistungen von 6 kW, einer Repetitionsrate von 50 Hz und den Pulsdauern von 0,2 ms, 0,35 ms, 0,5 ms, 0,65 ms und 0,8 ms sind in Bild 10 dargestellt.

Bild 10:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw. Austritte sowie der Schmelzfilmdicke von der Pulsdauer. Die verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{roc}=300$  mm,  $d_{Faser}=100$   $\mu$ m,  $P=6000$  W,  $F=50$  Hz, Gasart: Sauerstoff, Gasdruck= 5 bar.



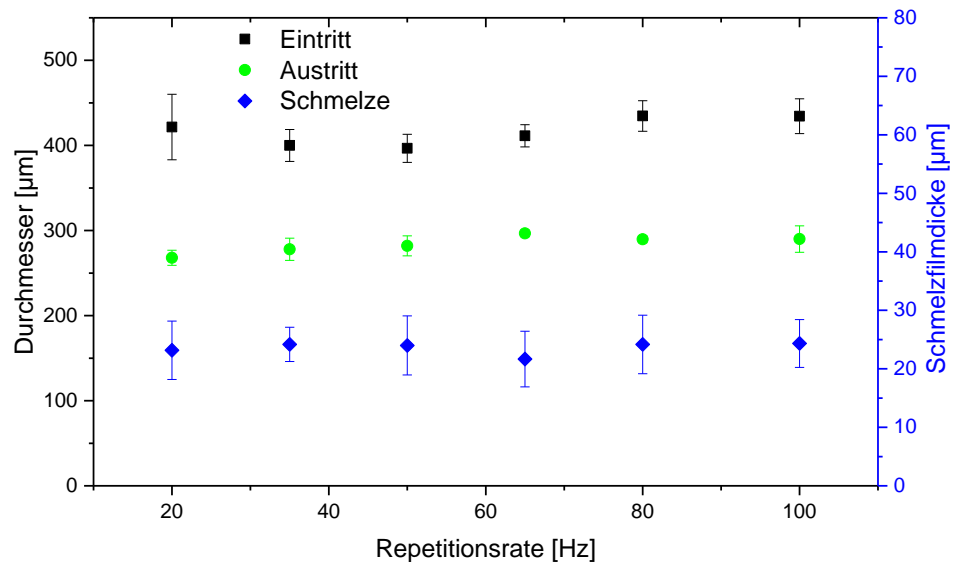
Die größten Durchmesser der Bohrungseintritte mit  $(462 \pm 13)$   $\mu$ m, werden mit Pulsdauern von 0,35 ms erzeugt. Bei kleineren Pulsdauern werden die Durchmesser der Bohrungseintritte kleiner und die Prozesszeit größer. Bei größeren Pulsdauern ist eine Verkleinerung der Durchmesser der Bohrungseintritte erkennbar. Die mittleren Durchmesser der Bohrungsastritte und die Schmelzfilmdicken sind bei den untersuchten Pulsdauern mit  $(340 \pm 17)$   $\mu$ m und  $(24 \pm 5)$   $\mu$ m annähernd konstant. Somit ist keine Abhängigkeit von der Pulsdauer nachweisbar.

Aufgrund der größten Durchmesser der Bohrungsaustritte und der kleinsten Standardabweichung bei diesen Bohrungen wird im Folgenden eine Pulsdauer von 0,5 ms zum Erstellen der Bohrungen verwendet.

### Einfluss der Repetitionsrate

Im Folgenden wird der Einfluss der Repetitionsrate der Laserpulse mit einer Pulsspitzenleistung von 6000 W und einer Pulsdauer von 0,5 ms auf die Bohrung untersucht. Die experimentell gemessenen Werte für die Durchmesser der Bohrungsein- bzw. austritte sowie die Schmelzfilmdicke bei der Verwendung der Repetitionsraten 20 Hz, 35 Hz, 50 Hz, 65 Hz, 80 Hz und 100 Hz sind in Bild 11 abgebildet.

Bild 11:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw. Austritte sowie der mittleren Schmelzfilmdicke von der Repetitionsrate. Die verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{roc}=300$  mm,  $d_{Faser}=100$   $\mu$ m,  $P=6000$  W,  $t=0,5$  ms, Gasart: Sauerstoff, Gasdruck= 5 bar.



Wird die Repetitionsrate vergrößert, verkleinert sich der zeitliche Puls-zu-Puls-Abstand. Somit wird die Anzahl der in einem konstanten Zeitintervall auf das Material treffende Laserpulse größer. Daraus resultiert eine größere Wärmeentwicklung in der Probe.

Eine Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte von der Repetitionsrate kann aus den gemessenen Werten nicht abgeleitet werden. Durch eine Vergrößerung der Repetitionsrate wird die Bohrdauer verkürzt. Die Bohrungen mit der kleinsten Konizität von  $(3,8 \pm 0,4)$  % werden mit einer Repetitionsrate von 50 Hz erzeugt. Darum wird letztere für alle weiteren Versuche verwendet.

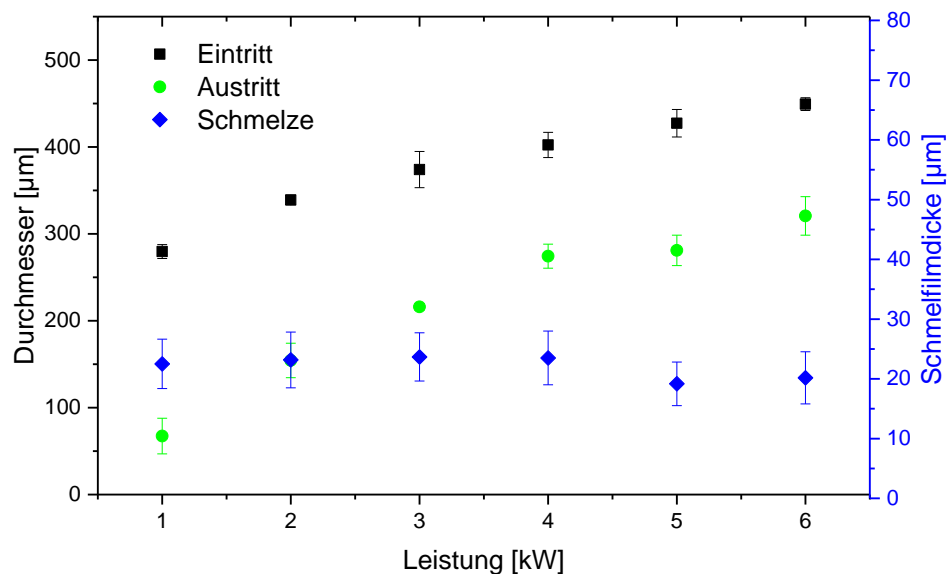
## Einfluss der Pulsspitzenleistung

Eine Vergrößerung der Pulsspitzenleistung entspricht bei gleicher Repetitionsrate und Pulsdauer einer Steigerung der mittleren Leistung und Intensität. Damit ein Materialabtrag stattfinden kann, muss die Intensität der einfallenden Laserstrahlung größer sein als eine materialabhängige Schwellintensität.

Die Abhängigkeit der Durchmesser des Bohrungsein- und austritte von der maximalen Pulsspitzenleistung ist in Bild 12 aufgetragen. Verwendet werden Leistungen von 1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW, 5 kW und 6 kW.

Wie zu erwarten ist, kann bei steigender Pulsspitzenleistung eine Vergrößerung der Bohrungsein- und Austritte beobachtet werden. Die größten Durchmesser werden mit einer Pulsspitzenleistung von 6 kW erstellt. Dabei ist die Konizität mit  $(4,27 \pm 0,45) \%$  am kleinsten. Die mittleren Schmelzfilmdicken sind mit  $(24 \pm 5) \mu\text{m}$  und  $(22 \pm 4) \mu\text{m}$  ähnlich groß.

Bild 12:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw. Austritte von der maximalen Pulsspitzenleistung. Die verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{\text{foc}}=300 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{Faser}}=100 \mu\text{m}$ ,  $t=0,5 \text{ ms}$ ,  $F=50 \text{ Hz}$ , Gasart: Sauerstoff, Gasdruck= 5 bar.



Ausschlaggebend für die große Differenz zwischen den Durchmessern der Ein- und Austritte bei den Leistungen von 1 kW, 2 kW und 3 kW ist die kleiner werdende Intensität bei größeren Bohrungstiefen.

Aus den gemessenen Durchmessern der Bohrungsein- und austritte bei verschiedenen Pulsspitzenleistungen kann die Schwellintensität  $I_s$  für Edelstahl 1.4301 mit Formel **2.9** ermittelt werden, die zum Aufschmelzen des

Probenmaterials benötigt wird. Durch mitteln über die Schwellintensitäten der verschiedenen Pulsspitzenleistungen ergibt sich

4.2

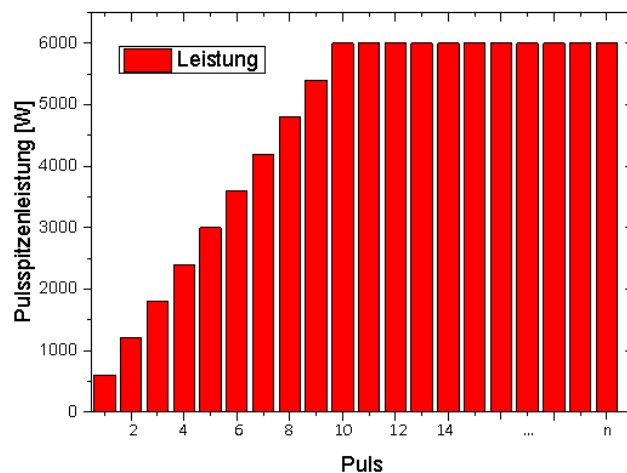
$$I_s = (3,79 \pm 0,47) \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$$

Dies liegt in der Größenordnung der in Kapitel 2.1 aufgeführten Schwellintensität.

### Interpulsshaping

Alternativ zu statischen Versuchsparametern können Prozessparameter wie beispielsweise die Pulsspitzenleistung während des Bohrprozesses dynamisch variiert werden. Schematisch ist das Interpulsshaping für eine Variation der Pulsspitzenleistung innerhalb der ersten 10 Pulse in Bild 13 dargestellt.

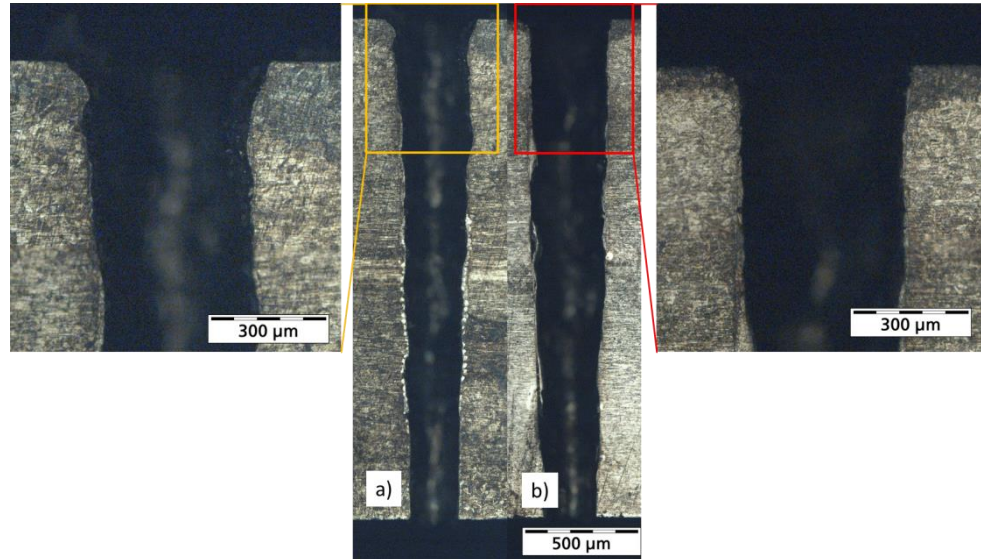
Bild 13:  
Schematische  
Darstellung der  
Pulsspitzenleistung  
beim  
Interpulsshaping



Da bereits in früheren Arbeiten [14] gezeigt wurde, dass mittels Interpulsshaping die auf der Oberfläche ablagernde Schmelze reduziert und deren Beseitigung erleichtert werden kann, wird diese Abtragstrategie im Folgenden angewendet. Eine Untersuchung verschiedener Parameter<sup>8</sup> ergibt, dass die in Bild 13 gezeigte Variation der Pulsspitzenleistung zu Bohrungen mit der kleinsten Konizität von  $(4,3 \pm 0,7) \%$  führt.

<sup>8</sup> Die Untersuchten Parameter sind in Tabelle 10 im Anhang aufgelistet.

Bild 14:  
Längsschliff einer  
Bohrung, welche mit  
 $f_{roc}=300$  mm,  
 $d_{Faser}=100$   $\mu$ m,  
 $t=0,5$  ms,  $F= 50$  Hz,  
Gasart: Sauerstoff,  
Gasdruck= 5 bar  
und a)  $P=6000$  W  
Pulsspitzenleistung  
sowie b) mit  
Interpulsshaping  
(600 W – 6000 W)  
in den ersten 10  
Pulsen, erstellt  
werden



In Bild 14 sind Längsschliffe der Bohrungen dargestellt, die mit einer konstanten Pulsspitzenleistung (a) und mit Interpulsshaping (b) gebohrt werden. Bei der Verwendung von Interpulsshaping werden scharfkantige Bohrungseintritte erzeugt. Dies ist für die weitere Bearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung vorteilhaft, da daraus eine größere Fluenz resultiert. Darum wird in allen weiteren Versuchen die Pulsspitzenleistung während der ersten 10 Pulse von 600 W auf 6000 W erhöht.<sup>9</sup>

### Einfluss des Prozessgases

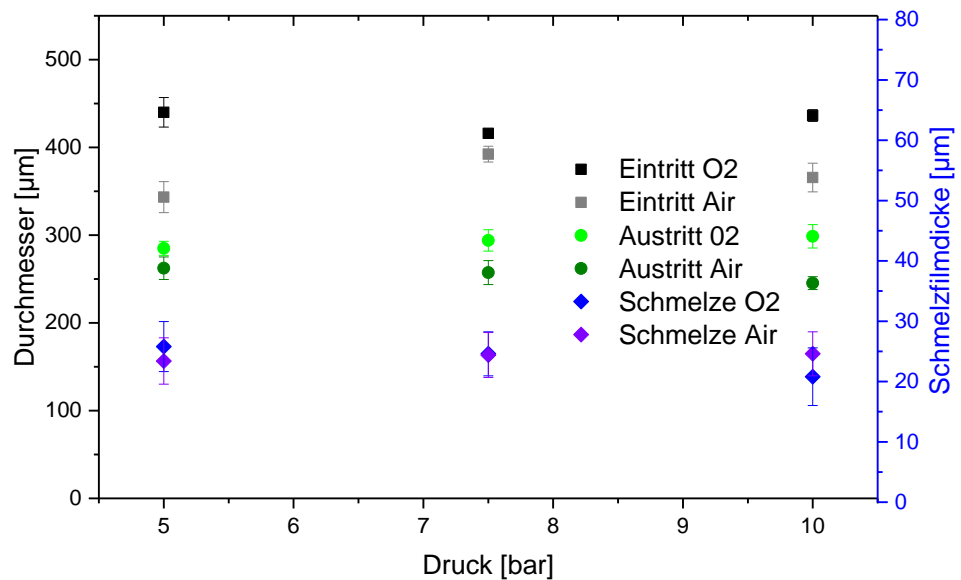
Die Art des Prozessgases hat einen Einfluss auf die Bohrungsgeometrien, da das Gas das aufgeschmolzene Material aus der Bohrung austreibt, die Probe kühlt und chemisch mit dem Probenmaterial reagieren kann. Im Folgenden soll der Einfluss der Gasart bei verschiedenen Drücken auf die Geometrie der Bohrung sowie auf das Entstehen von Schmelzfilmen an den Bohrungswänden untersucht werden.

Die verwendeten Gase sind Druckluft und Sauerstoff. Getestet werden Drücke von 5 sowie 7,5 und 10 bar. Die experimentell ermittelten Werte für den Durchmesser der Bohrungsein- und Austritte sowie der Schmelzfilmdicke sind in Bild 15 dargestellt.

<sup>9</sup> Dies entspricht einer Vergrößerung der Pulsspitzenleistung um 600 W pro Puls



Bild 15:  
Abhängigkeit der  
Durchmesser der  
Bohrungsein- bzw.  
austritte vom  
Prozessgas (und  
Druck). Die  
Schmelzfilmdicke ist  
bei Sauerstoff und  
Druckluft annähernd  
gleich groß. Die  
Verwendeten  
Prozessparameter  
sind:  $f_{\text{foc}}=300$  mm,  
 $d_{\text{Faser}}=100$   $\mu\text{m}$ ,  
 $t=0,5$  ms,  $F= 50$  Hz,  
Leistung,  
Interpulsshaping über  
die ersten 10 Schritte  
mit jeweils 600 W.



Bei der Verwendung von Sauerstoff werden im Vergleich zu Druckluft im Mittel 60  $\mu\text{m}$  größere Bohrungseintritte erzielt. Dies liegt daran, dass Sauerstoff ein exothermes Reaktionsverhalten besitzt. Dadurch steht beim Bohrprozess zusätzliche Energie für den Materialabtrag zur Verfügung.

Druckluft ist ein Gasgemisch, welches aus 80% Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und 20% Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) besteht. Der darin enthaltene Stickstoff ist ein inertes Gas welches den exothermen Eigenschaften des Sauerstoffs entgegen wirkt.

Eine Vergrößerung des Drucks bei der Verwendung von Druckluft hat eine größere Kühlung der Probe durch das Prozessgas sowie eine potentielle Entstehung turbulenter Strömungen zufolge. Somit werden die jeweiligen Durchmesser der Bohrungsaustritte bei einer Druckerhöhung von 5 auf 7,5 bar beziehungsweise 7,5 auf 10 bar um 15  $\mu\text{m}$  kleiner. Im Gegensatz werden die Durchmesser der Austritte bei der Verwendung von Sauerstoff bei gleichen Druckerhöhungen von 5 auf 7,5 bar und von 7,5 auf 10 bar im Mittel 9  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$  größer. Dies ist ebenfalls auf die exothermen Eigenschaften des Sauerstoffs zurückzuführen.

Eine EDX-Untersuchung der bei der Verwendung von Sauerstoff entstehenden Schmelze ergibt einen 33 prozentigen Massengehalt von Sauerstoff. Dem zufolge oxidiert die Schmelze während des Bohrprozesses. Um den Bohrungsaustritt sind keine Ablagerungen zu beobachten. Die oxidierten Reste lassen sich mittels manuellem Kratzen von der Probenoberfläche entfernen,

während sich die beim Druckluft-Bohrprozess entstandene Schmelze wieder mit der Probenoberfläche verbindet und nur durch Schleifen entfernt werden kann.

Somit wird im Folgenden Sauerstoff mit einem Prozessgasdruck von 5 bar zum Erstellen weiterer Bohrungen verwendet.

### 4.1.3 Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Die in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 ermittelten geeigneten Parameter zum Erstellen von Bohrungen mit einem Durchmesser von 450  $\mu\text{m}$  sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6  
Zusammenfassung  
geeigneter  
Parameter zum  
Bohren mit  
Faserlaserstrahlung

Parameter	Formelzeichen	Wert	Einheit
<b>Prozessfaserdurchmesser</b>	$d_F$	100	$\mu\text{m}$
<b>Brennweite</b>	$f_{foc}$	300	mm
<b>Pulsspitzenleistung</b>	P	(Interpulsshaping 10 Schritte) 600-6000	W
<b>Pulsdauer</b>	$\tau_p$	0,5	ms
<b>Repetitionsrate</b>	$f$	50	Hz
<b>Prozessgasart</b>		Sauerstoff	
<b>Gasdruck</b>		5	bar

Im Folgenden wird die Reproduzierbarkeit der Bohrungen, welche mit den in Tabelle 6 zusammengefassten Parametern gebohrt werden, überprüft. Dazu werden 30 Bohrungen bezüglich der Durchmesser der Bohrungsein- und Austritte sowie die mittlere Schmelzfilmdicke untersucht. Die mittlere Schmelzfilmdicke wird durch das arithmetische Mittel aus jeweils drei Messungen an unterschiedlichen Stellen innerhalb einer Bohrung bestimmt.

In Bild 16 werden die statistischen Verteilungen der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte sowie die ermittelten Schmelzfilmdicken gezeigt.

Bild 16:  
Verteilungen der  
Durchmesser der  
Bohrungsein- bzw  
Austritte (links)  
sowie der Schmelze  
(rechts) für 30  
Bohrungen.

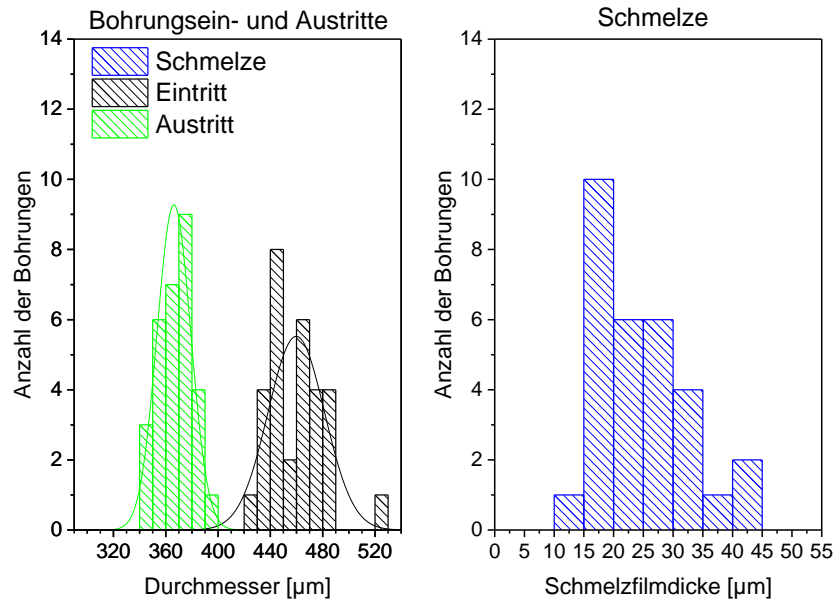


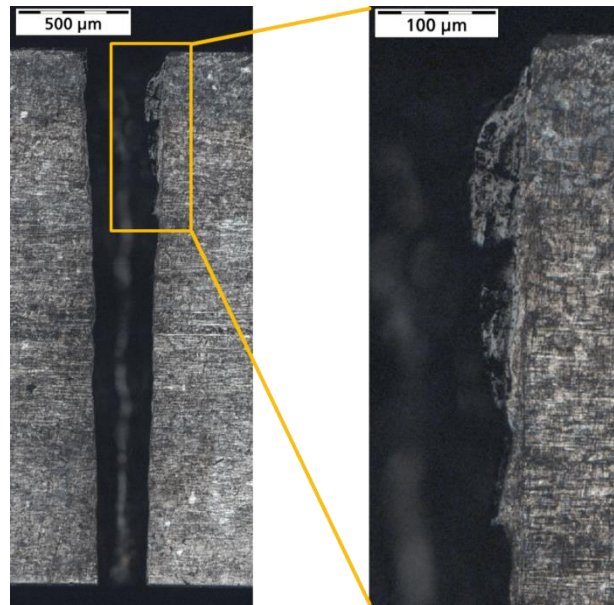
Tabelle 7 enthält die Mittelwerte und Standardabweichungen der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte.

Tabelle 7:  
Zusammenfassung der  
Mittelwerte und  
Standardabweichungen  
der Durchmesser der  
Bohrungsein- und  
austritte sowie der  
Schmelzfilmdicke für  
30 Bohrungen

Größe	Durchmesser der Bohrungseintritte [µm]	Durchmesser der Bohrungsaustritte [µm]	Schmelzfilmdicke [µm]
<b>Mittelwert</b>	459	366	25
<b>Standardabweichung</b>	22	13	7

Der Mittelwert der Durchmesser der Bohrungseintritte ist  $(459 \pm 22)$  µm und der Bohrungsaustritte ist  $(366 \pm 13)$  µm groß. Daraus ergibt sich eine mittlere Konizität von  $(3,1 \pm 0,9)\%$ . Durchschnittlich ist die Schmelzfilmdicke an den Bohrungswänden  $(25 \pm 7)$  µm dick. In manchen Bohrungen werden bis zu 45 µm dicke oxidierte Schmelzschichten im oberen Teil der Bohrung abgelagert. Diese beispielhaft in Bild 17 gezeigten Schmelzschichten können aus einem nicht symmetrischen Strömungsverhalten des Prozessgases innerhalb der Bohrung resultieren.

Bild 17:  
Längsschliff einer  
Bohrung die mit den  
Parametern in  
Tabelle 6 erzeugt  
wird (links).  
Nahaufnahme der  
Schmelzschicht, die  
durch das Bohren  
eines benachbarten  
Loches entsteht  
(rechts).



## 4.2 Schritt 2: Ultrakurzgepulste Laserstrahlung

Im Folgenden werden die in Schritt 1 (siehe Kapitel 4.1) entstehenden thermisch beeinflussten Schichten mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung abgetragen.

Während der Versuchsdurchführung muss zwischen der Bearbeitungsoptik für die Faserlaserstrahlung und dem Galvoscaner für die ultrakurzgepulste Laserstrahlung gewechselt werden. Bedingt durch den Wechsel können zwei Fehler entstehen, durch die das Ergebnis beeinflusst wird:

Zum einen können die Bohrungsmittelpunkte, der durch Faserlaserstrahlung und ultrakurzpuls-Laserstrahlung hergestellten Bohrungen, nicht identisch sein. Schematisch ist dies in Bild 18 (links) gezeigt. Weiterhin kann durch fehlerhaftes Ausrichten der Probe die Laserstrahlung nicht genau senkrecht auf den Bohrungseintritt treffen. Somit wird die bestrahlte Fläche auf einer Seite der Bohrung kleiner, während die gegenüberliegende Seite stärker bestrahlt wird (Bild 18 rechts). Daraus folgt ein ungleichmäßiger Materialabtrag an gegenüberliegenden Bohrungswänden. Darum werden alle im Folgenden betrachteten Schmelzfilmdicken ausschließlich in dem Bereich des Bohrungslängsschliffs gemessen, der von der ultrakurzgepulsten Laserstrahlung bearbeitet wurde (Bild 18 mitte). In den Versuchsreihen wird eine Pulsdauer von

7,65 ps und als Prozessgas Druckluft<sup>10</sup> mit einem Gasdruck von 5 bar  
verwendet. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Galvoscaners beträgt 200 mm/s

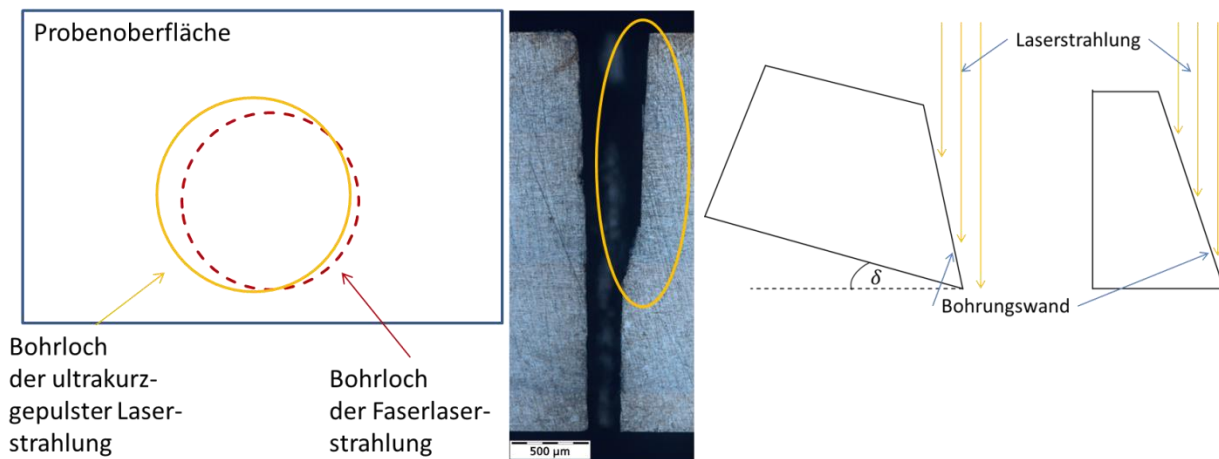


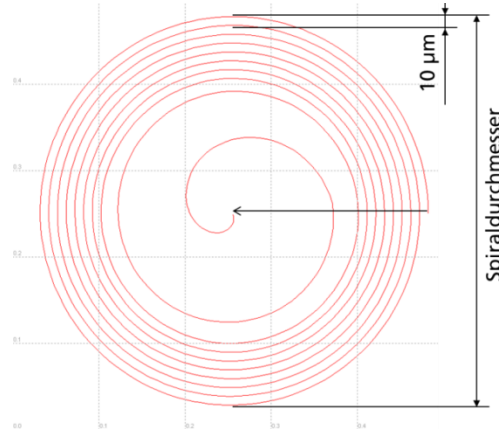
Bild 18: Schematische Darstellung der Bohrungspositionen der ultrakurzgepulsten und der Faserlaserstrahlung (links). Längsschliff einer Bohrung für verschobene Kreismittelpunkte. Der Bereich, der mit UKP-Laserstrahlung bearbeitet wurde ist gelb markiert (mitte). Schematische Darstellung der Verkleinerung durch Laserstrahlung bestrahlten Fläche durch Kippen der Probe.

#### 4.2.1 Einfluss der Abtragstrategie

Auf der Basis der Ergebnisse von früheren Arbeiten [13] werden im Folgenden nur Bohrungen mittels Spiralbewegungen des Galvoscaners bearbeitet. Durch einen Vergleich zwischen der Verfahrensbewegung von innen nach außen und der Verfahrensbewegung von außen nach innen wird gezeigt, dass letztere aufgrund einer kleineren Wärmeakkumulation zu einer kleineren thermischen Belastung der Bohrungswände führt. Darum wird in allen weiteren Experimenten eine Spiralbewegung von außen nach innen mit der in Bild 19 gezeigten Geometrie verwendet.

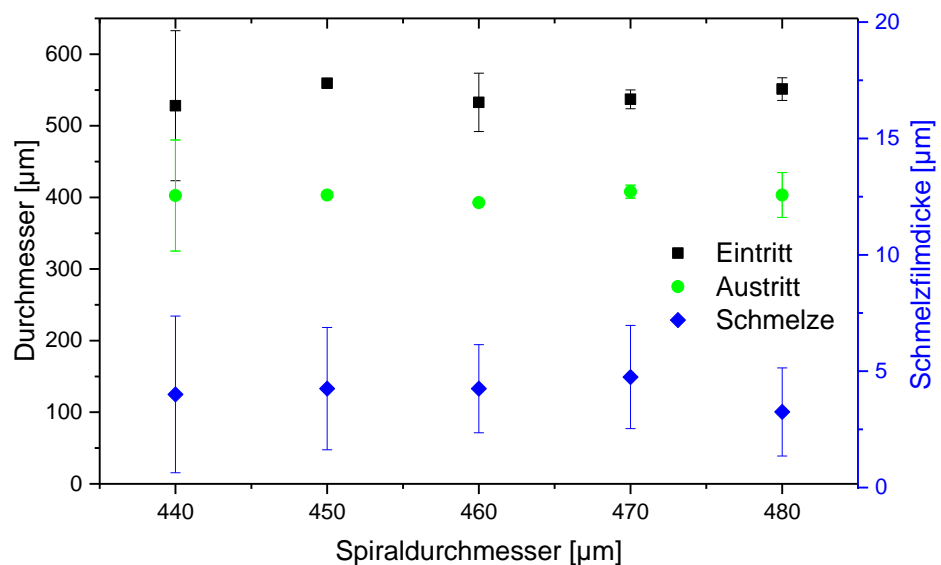
<sup>10</sup> Druckluft eignet sich nach [13] am besten zum Bohren von zylindrischen Bohrungen

Bild 19:  
Schematische  
Darstellung der in  
dieser Arbeit  
verwendeten  
Spiralgeometrie



In Bild 20 sind die Durchmesser der Bohrungsein- und austritte gezeigt, die mit Spiraldurchmessern von 440 µm, 450 µm, 460 µm, 470 µm und 480 µm bei einer Repetitionsrate von 715 kHz und einer mittleren Leistung von 200 W (100%) erzeugt werden. Die mittlere Schmelzfilmdicke ist bei allen untersuchten Spiraldurchmessern annähernd konstant ( $4 \pm 3$ ) µm groß. Somit ist die mittlere Schmelzfilmdicke unabhängig vom Spiraldurchmesser.

Bild 20:  
Abhängigkeit der  
Durchmesser der  
Bohrungsein- bzw.  
austritte und der  
Schmelzfilmdicke  
vom  
Spiraldurchmesser.  
Die verwendeten  
Prozessparameter  
sind:  $f_{rep} = 715$  kHz,  
Leistung  $P = 100\%$   
(200 W), Anzahl der  
Spiralwiederhol-  
ungen = 100 ( $\pm 8$  s)



Für alle weiteren Versuche wird im Folgenden ein Spiraldurchmesser von 450 µm verwendet, da bei diesem Spiraldurchmesser die größten Austritte mit ( $403 \pm 4$ ) µm erzeugt werden.

## 4.2.2 Einfluss der Verfahrensparameter

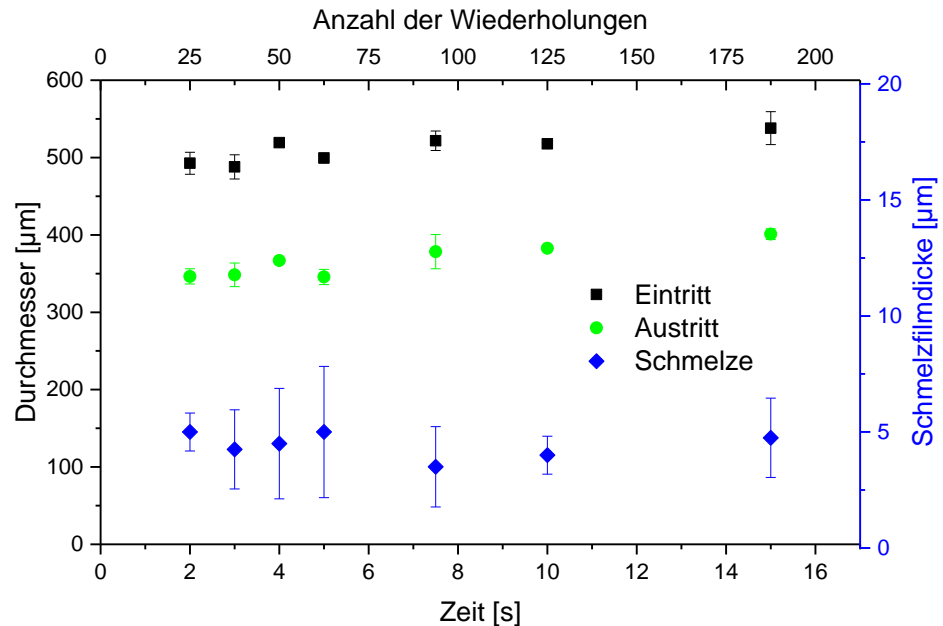
Im Folgenden sollen die Einflüsse der Verfahrensparameter auf den Bohrprozess mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung diskutiert werden. Untersucht wird der Einfluss der nachstehenden Verfahrensparameter

- Bohrdauer
- Repetitionsrate
- mittlere Leistung.

### Einfluss der Bohrdauer

In Bild 21 ist die Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte sowie der mittleren Schmelzfilmdicke von der Bohrdauer beziehungsweise der Anzahl der Spiralwiederholungen bei einer Repetitionsrate von 715 kHz und 100 % Leistung (200 W) dargestellt. Untersucht werden Bohrdauern von 2 s, 3 s, 4 s, 5 s, 7.5 s, 10 s und 15 s. Dabei erfolgen 25 Spiralwiederholungen innerhalb von 2 s.

Bild 21:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- und austritte sowie der Schmelzfilmdicke von der Bohrdauer. Die verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{rep} = 715$  kHz, Leistung  $P = 100\%$  (200 W), Spiraldurchmesser  $d = 450$   $\mu\text{m}$ .



Eine Vergrößerung der Bohrdauer von 2 s auf 15 s führt zu einer Vergrößerung der mittleren Durchmesser der Bohrungseintritte um 25  $\mu\text{m}$  und der Bohrungsaustritte um 35  $\mu\text{m}$ .

Im Bereich zwischen 2 s und 5 s ist ein Abtrag des Schmelzfilms, der beim Bohrprozess mit Faserlaserstrahlung entsteht, von bis zu 22  $\mu\text{m}$  messbar. Dies entspricht einer Verkleinerung der mittleren Schmelzfilmdicke um 88 %. Allerdings werden bestimmte Bereiche der Bohrungswand bei Bohrdauern kleiner als 10 s nicht bearbeitet. In Bild 22 (links) ist beispielhaft ein Längsschliff einer Bohrung gezeigt, welche bei einer Bohrdauer von 7,5 s erstellt wird. Dabei werden die wärmebeeinflussten Schichten im unteren Bereich der Bohrung nicht abgetragen (Bild 22 rechts).

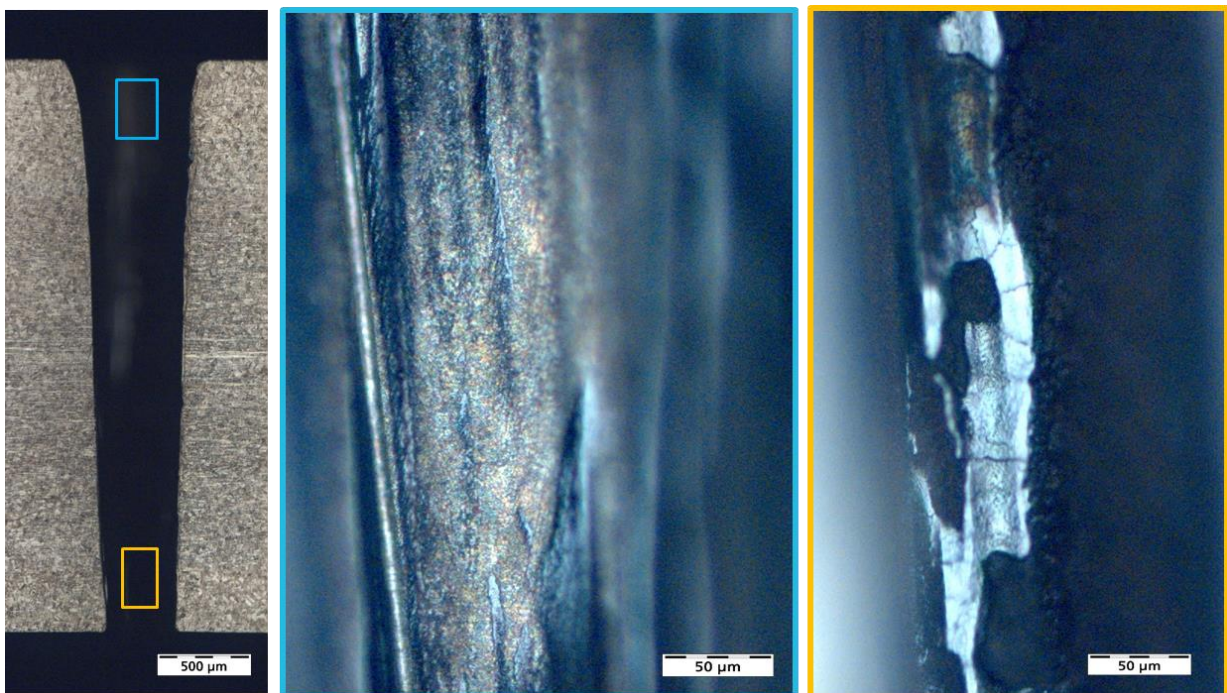


Bild 22: Längsschliff einer Bohrung für  $f_{\text{rep}}$  715 kHz, Leistung P 100% (200 W) und eine Bohrdauer von 7,5 s (links) sowie Nahaufnahmen aus dem oberen Bereich der Bohrung, die mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung bearbeitet wird (blau) und dem unteren Bereich der Bohrung, die nur durch Faserlaserstrahlung erzeugt wird (gelb)

In allen weiteren Versuchen wird eine Bohrdauer von 15 s<sup>11</sup> zur Herstellung der Bohrungen genutzt, sodass ein möglichst großer Durchmesser der Bohrungsaustritte sowie Abtrag der in Kapitel 4.1 entstandenen wärmebeeinflussten Schichten erwartet wird.

### **Einfluss von Repetitionsrate und mittlerer Leistung**

Die Repetitionsrate und die Leistung haben einen Einfluss auf die, durch die Wärmeakkumulation bedingte, thermische Belastung der Bohrungswände. Im Folgenden soll der Einfluss auf die Durchmesser der Bohrungsein- und austritte

<sup>11</sup> Diese Bohrdauer ist um einen Faktor 9 kleiner als die Bohrdauer, welche zum Bohren mit ausschließlich ultrakurzgepulster Laserstrahlung benötigt wird.



sowie die Schmelzfilmdicke und Rissbildung untersucht werden. Die untersuchten Repetitionsraten sind im Bereich zwischen 100 kHz und 1,4 MHz. Für jede Repetitionsrate wird eine Leistungsvariation zwischen 50 % und 100 % durchgeführt.

Bei der Verwendung einer Repetitionsrate von 1,4 MHz und 100 % Leistung (400 W) ist nahezu die gesamte Bohrungswand von bis zu 60  $\mu\text{m}$  tiefen Rissen durchzogen. Die mittlere Schmelzfilmdicke ist bei den Bohrungen, die mit 100 % Leistung erzeugt werden ( $7 \pm 2$ )  $\mu\text{m}$  groß. Zudem beträgt die mittlere Konizität dieser Bohrungen ( $9,4 \pm 0,8$ ) %. Eine Verkleinerung der Leistung auf 50 % resultiert in einer Verkleinerung der Konizität auf ( $5,6 \pm 0,6$ ) % sowie in der Vergrößerung der Schmelzschichten auf bis zu 20  $\mu\text{m}$ . Bei kleineren Repetitionsraten von 715 kHz beziehungsweise 476 kHz sind unabhängig von der Leistung stellenweise ebenfalls bis zu 20  $\mu\text{m}$  tiefe Risse in der Bohrungswand vorhanden.

In Bild 23 werden Ausschnitte aus REM-Aufnahmen für Längsschliffe von Bohrungen gezeigt, die mit einer Repetitionsrate von 1,4 MHz bei a), b) einer Leistung von 100 % (400 W) und c) einer Repetitionsrate von 715 kHz und einer Leistung von 50 % (100 W) bearbeitet werden.

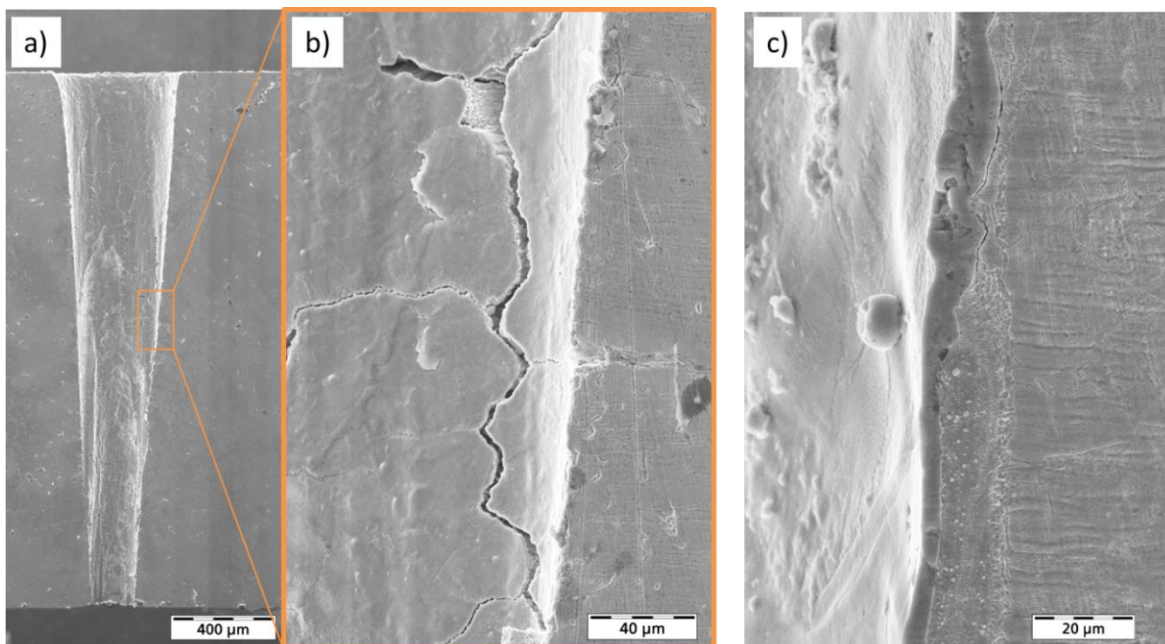


Bild 23: REM-Aufnahmen (a) , (b) eines Längsschliffs einer Bohrung bzw. eines Ausschnitts der Bohrungswand, die mit  $f_{\text{rep}} = 1,4$  MHz und 100 % Leistung hergestellt wird und (c) eines Schmelzfilms einer Bohrung, die mit  $f_{\text{rep}} = 715$  kHz und 50 % Leistung erzeugt wird

Unabhängig von der untersuchten Repetitionsrate werden die mittleren Durchmesser der Bohrungseintritte bei Vergrößerung der Leistung von 50 %

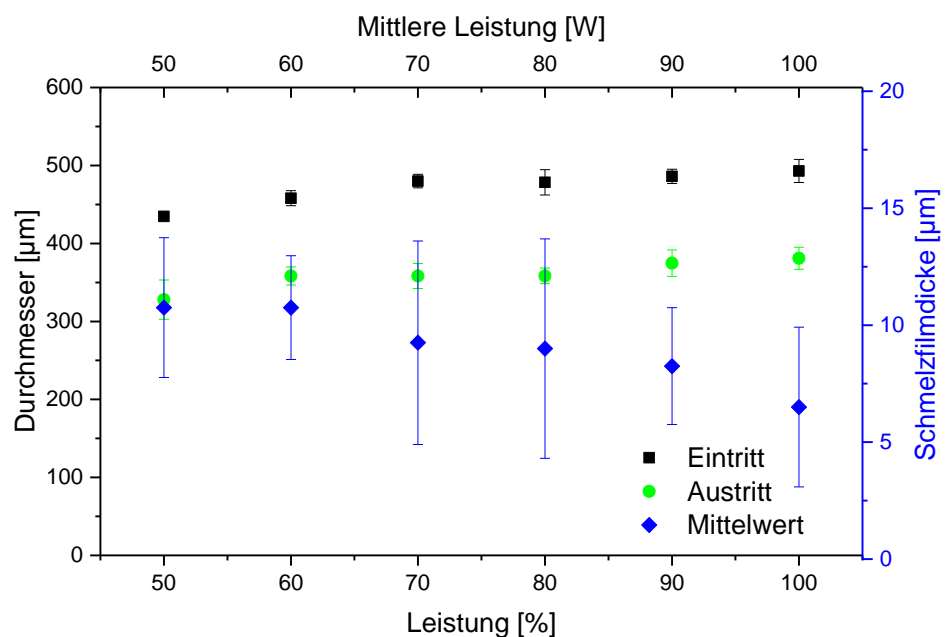
auf 100 % um 60  $\mu\text{m}$  größer (vgl. Bild 25, Bild 24, Bild 35 und Bild 36). Dabei werden die maximalen Durchmesser der Bohrungsein- und austritte bei allen Repetitionsraten mit 100 % Leistung erzielt. Dies ist eine Konsequenz aus der durch die Leistungssteigerung hervorgerufenen Vergrößerung der Fluenz.

Da bei der Verwendung von Repetitionsraten kleiner als 476 kHz keine Risse in der Bohrungswand nachgewiesen werden können, wird im Folgenden näher auf die Repetitionsraten 358 kHz, 238 kHz und 100 kHz eingegangen.

### 358 kHz

Die mittlere Schmelzfilmdicke der Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 358 kHz erstellt werden, ist bei Leistungen zwischen 50 % (67 W) und 90 % (120 W) bis zu  $(11 \pm 3) \mu\text{m}$  groß (vgl. Bild 24).

Bild 24:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw. Austritte von der Leistung. Die verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{\text{rep}}=358 \text{ kHz}$ , Spiraldurchmesser  $d=450 \mu\text{m}$ .

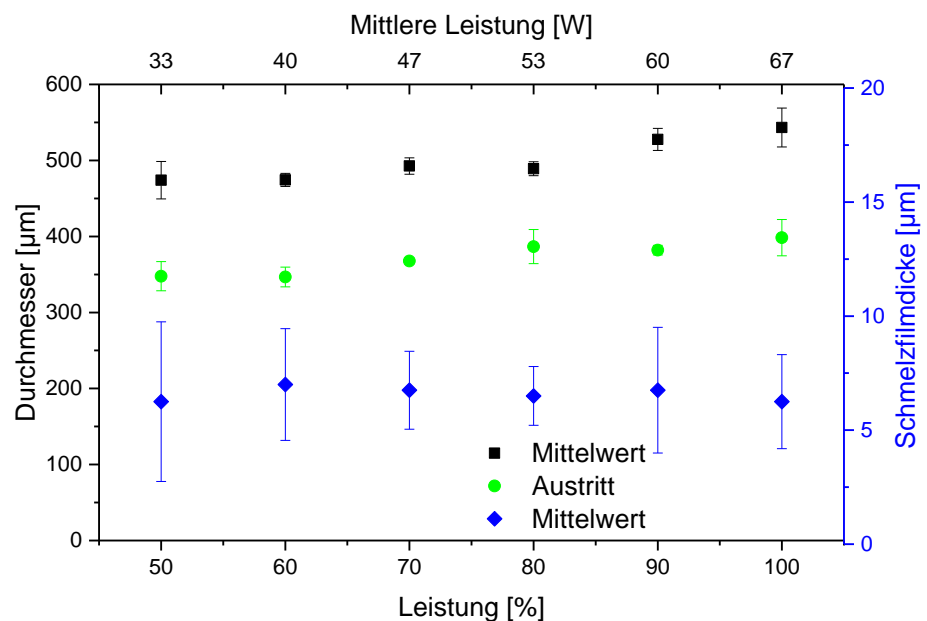


Die Schmelzfilmbildung resultiert aus einer größeren Wärmeentwicklung in den Bohrungen als beim Bohrprozess mit 238 kHz (vgl. Bild 25). Des Weiteren wird die entstehende Schmelze in Einbränden in der Bohrungswand, die durch das Bohren mit Faserlaserstrahlung entstehen, abgelagert. Falls die Einbrände zu tief sind, um von der ultrakurzgepulsten Laserstrahlung abgetragen zu werden, wird die im Abtragprozess entstehende Schmelze in den Einbränden angesammelt (siehe Bild 26 c). Die kleinsten mittleren Schmelzfilmdicken werden mit  $(6 \pm 4) \mu\text{m}$  bei 100 % Leistung (100 W) erreicht, da aus der größten Fluenz der größte Materialabtrag resultiert.

## 238 kHz

Die experimentell ermittelten Daten für die Bohrungen, die bei der Verwendung von einer Repetitionsrate von 238 kHz entstehen, sind in Bild 25 dargestellt.

Bild 25:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw. Austritte von der Leistung. Die verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{rep}=238$  kHz, Spiraldurchmesser  $d=450$   $\mu\text{m}$ .



Die mittlere Schmelzfilmdicke ist mit  $(6 \pm 2)$   $\mu\text{m}$  bei allen getesteten Leistungen näherungsweise gleich groß. Die kleinsten Konizitäten mit  $(3,4 \pm 0,7)$  % können mit einer Leistung von 80 % erreicht werden. Ein Längsschliff dieser Bohrung ist in Bild 26 (a) dargestellt. Aufgrund der kleinen Konizität und Schmelzfilmdicke eignet sich eine Repetitionsrate von 238 kHz mit 80 % Leistung (53 W) zum Bohren von zylindrischen Bohrungen mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$ .

Bild 26:  
Längsschliffe der  
Bohrungen in denen  
die mittlere  
Schmelzfilmdicke  
minimal ist. a)  
238 kHz 80 %  
Leistung und b)  
358 kHz und 50 %  
Leistung sowie c)  
358 kHz und 100 %  
Leistung. Einbrände,  
die durch das  
Bohren mit  
Faserlaserstrahlung  
entstehen (gelb). In  
einem Einbrand  
abgelagerte  
Schmelze (grün).



### 100 kHz

Im Gegensatz zu den bereits untersuchten Repetitionsraten wird während der getesteten Bohrdauer von 15 s (188 Spiralwiederholungen) bei der Verwendung von einer Repetitionsrate von 100 kHz nicht die gesamte Bohrungswand bearbeitet. Die erreichte Bearbeitungstiefe beträgt  $(1320 \pm 10) \mu\text{m}$ .

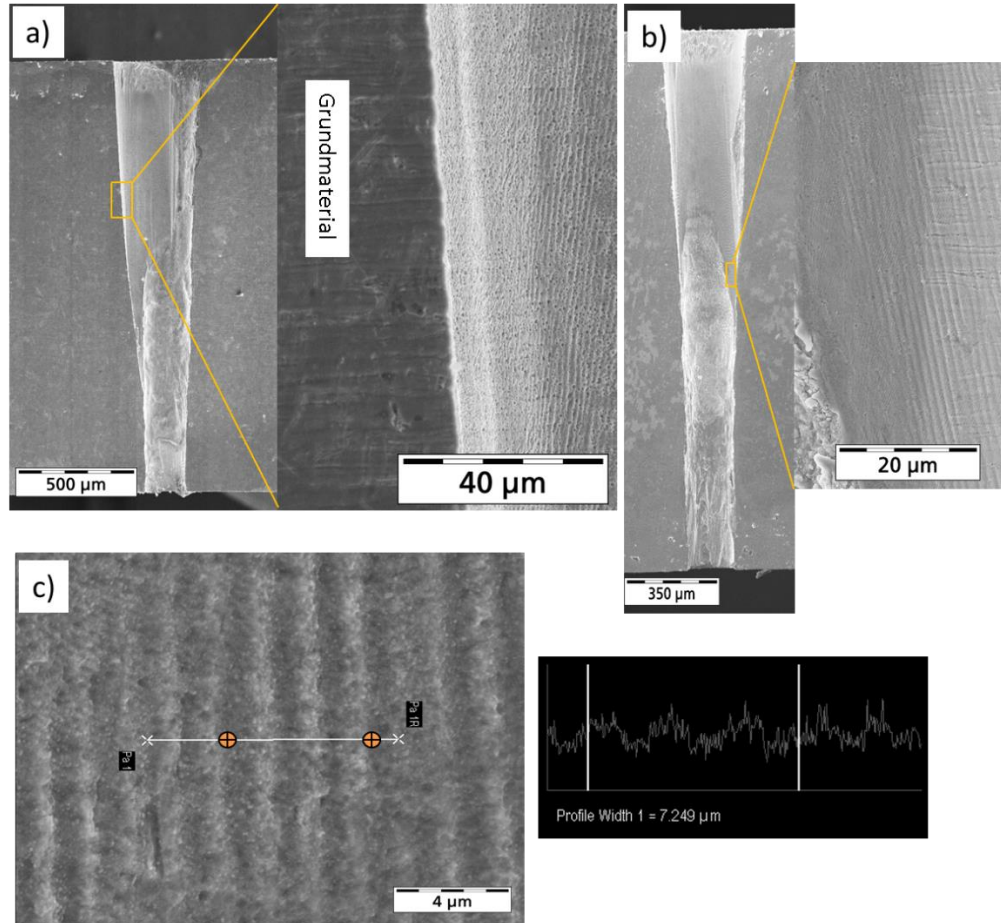
Beim Bohrprozess mit 100 kHz und 100 % Leistung (29 W) entstehen nahezu auf der gesamten Bohrungswand rillenartige Strukturen. Diese sind in Bild 27 beispielhaft gezeigt. Der gemessene Abstand zwischen der in Bild 27 (a) und (c) gezeigten Rillen beträgt  $(1,81 \pm 0,1) \mu\text{m}$ . Dies ist in der Größenordnung der Länge  $l \mu\text{m}$  in welcher der Fokus durch den Galvoscaner verfahren wird<sup>12</sup>.

4.3

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

<sup>12</sup> Dabei sind die Verfahrensgeschwindigkeit des Galvoscaners  $v=200 \text{ mm/s}$  und die Repetitionsrate  $f= 100 \text{ kHz}$

Bild 27:  
REM-Aufnahmen der  
Riffelbildung in mit  
100 kHz und 100 %  
Leistung erzeugten  
Bohrungsrück-  
wänden bei (a) 400  
Spiralwiederhol-  
ungen, (b) 300  
Spiralwiederhol-  
ungen sowie (c) der  
gemessene Abstand  
zwischen drei Rillen  
bei 300  
Spiralwiederhol-  
ungen



Bei einer Vergrößerung der Anzahl der Spiralwiederholungen auf 400 ist stellenweise eine Vergrößerung des Abstands der Rillen auf bis zu 10 µm beobachtbar (siehe Bild 34 im Anhang). Diese Messung wurde in einer kleineren Bohrungstiefe durchgeführt. Des Weiteren ist der Einfallswinkel  $\alpha$  der Laserstrahlung bezüglich der Bohrungswand (siehe Bild 4) in dieser Bohrung größer als bei der Bohrung, die mit 300 Spiralwiederholungen erzeugt wird. Aufgrund der größeren Fluenz (Formel **2.9**) erfolgt eine größere Wärmeentwicklung in der Probe. Dies könnte dazu führen, dass das mehr Material aufgeschmolzen oder verdampft wird. Durch die in der Bohrung entstehende Strömung des Prozessgases könnten diese Strukturen beim Erkalten der flüssigen Schmelzschicht entstehen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein hybrider Bohrprozess mit langgepulster und ultrakurzgepulster Laserstrahlung realisiert. Dabei sollen die spezifischen Vorteile der jeweiligen Bohrverfahren miteinander kombiniert werden. Beim Bohren mit langgepulster Laserstrahlung werden die Bohrungswände aufgrund des schmelzdominierten Abtragprozesses thermisch belastet. Die Folge sind Schmelzfilme, und Einbrände in den Bohrungswänden, durch welche die Rissbildung begünstigt wird. Die Bohrdauer für eine Bohrung beträgt weniger als 1 s. Aufgrund des dampfdominierten Materialabtrags beim Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung erfolgt an den Bohrungswänden eine kleine thermische Belastung. Somit sind die entstehenden Schmelzfilmdicken im Mittel um  $(19 \pm 3) \mu\text{m}$  kleiner, als bei Bohrungen, welche mit Faserlaserstrahlung erzeugt werden. Dies entspricht einer Verkleinerung der Schmelzfilmdicken um 76 %. Die Bohrdauer der in dieser Arbeit mit dem hybriden Bohrprozess erstellten Bohrungen beträgt 15 s. Somit ist die Gesamtbohrdauer um einen Faktor 9 kleiner als die Bohrungen welche ausschließlich mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung gebohrt werden.

Die in dieser Arbeit ermittelten geeigneten Parametersätze zum hybriden Laserstrahl-Bohren ist in Tabelle 8 und Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 8:  
Zusammenfassung  
geeigneter  
Parameter zum  
Bohren mit  
Faserlaserstrahlung

Parameter	Wert	Einheit
<b>Prozessfaserdurchmesser</b>	100	$\mu\text{m}$
<b>Brennweite</b>	300	mm
<b>Pulsspitzenleistung</b>	(Interpulsshaping 10 Schritte) 600 - 6000	W
<b>Pulsdauer</b>	0,5	ms
<b>Repetitionsrate</b>	50	Hz
<b>Prozessgasart</b>	Sauerstoff	
<b>Gasdruck</b>	5	bar
<b>Bohrdauer</b>	<1	s

Tabelle 9:  
Zusammenfassung  
geeigneter  
Parameter zum  
Abtragen der  
thermisch belasteten  
Bereiche mit  
ultrakurzgepulster  
Laserstrahlung

Parameter	Wert	Einheit
<b>Repetitionsrate</b>	238	kHz
<b>Leistung</b>	70 (47)	% (W)
<b>Prozessgasart</b>	Druckluft	
<b>Prozessgasdruck</b>	5	Bar
<b>Spiraldurchmesser</b>	450	$\mu\text{m}$
<b>Scangeschwindigkeit</b>	200	mm/s
<b>Spiralwiederholungen</b>	188 ( $\pm 15$ s)	

In Bild 28 sind Längsschliffe der Bohrungen gezeigt, welche mit den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten geeigneten Parametersätzen hergestellt werden. Dabei wird a) mit langgepulster und b) mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung erzeugt.

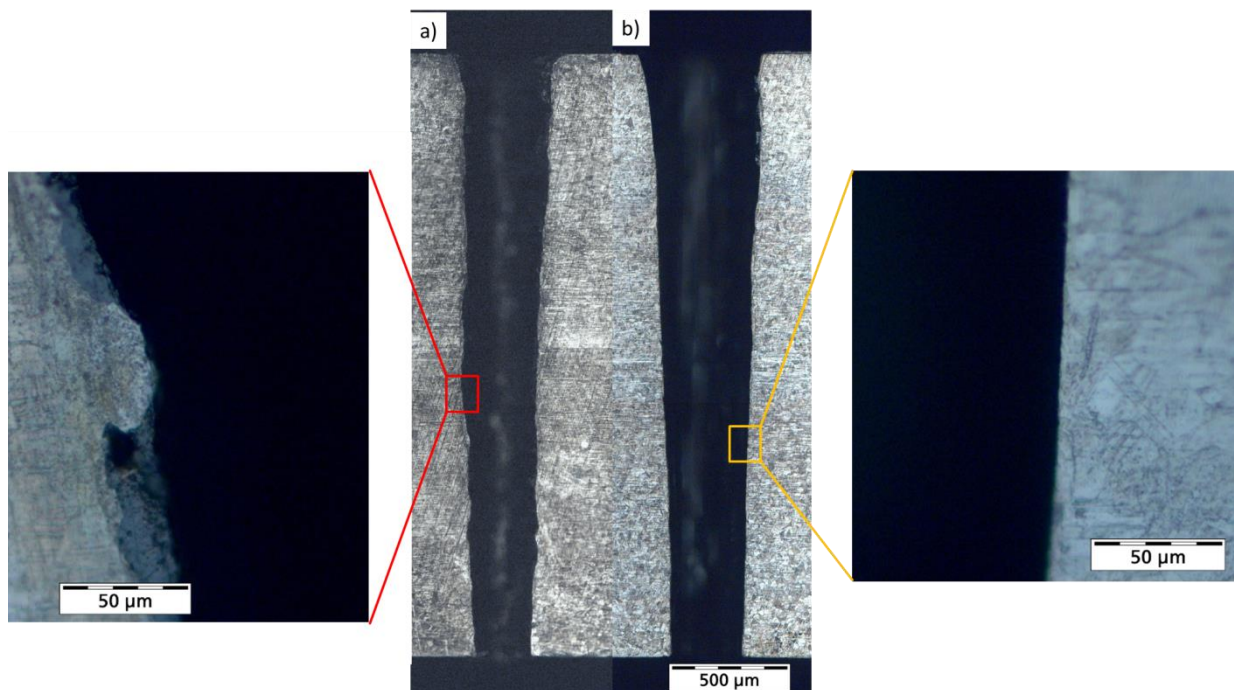
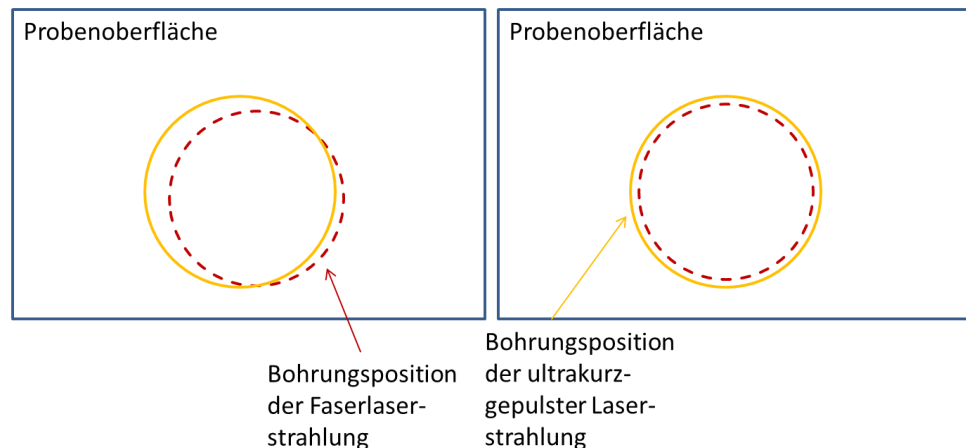


Bild 28: Längsschliffe sowie Nahaufnahmen der Bohrungen, die beim Laserstrahl-Bohren unter Verwendung der in dieser Arbeit ermittelten geeigneten Parameter entstehen. Dabei wird a) mittels Faserlaserstrahlung und b) mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung bei 238 kHz (70 %) Leistung erzeugt.

Um den Bohrprozess zu optimieren, sollte eine Bohroptik verwendet werden, in die beide Laserstrahlen eingekoppelt werden. Somit entfällt das erneute

Ausrichten unterhalb des Galvoscanners und die Bohrlöcher, welche mit den beiden Laserstrahlarten erzeugt werden, liegen übereinander (siehe Bild 29).

Bild 29:  
Schematische  
Darstellung der  
Bohrungspositionen  
der Faserlaser- und  
der  
ultrakurzgepulsten  
Laserstrahlung



Des Weiteren ist die Verwendung von Laserstrahlquellen mit höheren Pulsspitzenleistungen in beiden Arbeitsschritten sinnvoll. Aus der größeren Leistung resultiert eine größere Intensität bzw. Fluenz, sodass ein Materialabtrag in größeren Bohrungstiefen induziert werden kann. Infolgedessen wird die Konizität der erzeugten Bohrungen kleiner. Durch eine Verkleinerung der Pulsdauer auf einige  $10^{-15}$  s könnte die thermische Belastung der Bohrungswände reduziert werden.

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben bestehen aus Edelstahl 1.4301. Um das hybride Laserstrahl-Bohren für Kühlluftbohrungen in Turbinenschaufeln anzuwenden, sollten die ermittelten Prozessparameter auf Mehrschichtsysteme wie Nickelbasislegierungen mit Wärmedämmschichten transferiert werden.

Weiterhin könnte das Entstehen der rillenartigen Strukturen bei 100 kHz näher untersucht werden. Diese Strukturen könnten das Strömungsverhalten des durch Kühlungsbohrungen geleiteten Fluids beeinflussen. Durch gezieltes Einbringen der Rillen in die Bohrungswand könnten Turbulenzen des Fluids innerhalb der Bohrung reduziert werden.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] *Steen, W., Watkins, K. G., Mazumder, J.:* Laser material processing: Springer Science & Business Media 2010.
- [2] *Chichkov, B. N., Momma, C., Nolte, S., Alvensleben, F. von, Tünnermann, A.:* Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Appl.Phys.A* 63 (1996), S. 109–115.
- [3] *Sugioka, K., Meunier, M., Piqué, A.:* Laser precision microfabrication. Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2010.
- [4] *Bäuerle, D.:* Laser Processing and Chemistry. With 332 figures. Berlin: Springer 2011.
- [5] *Mingareev, I.:* Ultrafast dynamics of melting and ablation at large laser intensities. Göttingen: Cuvillier 2009.
- [6] *Poprawe, R.:* Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Berlin: Springer 2005.
- [7] *Poprawe, R.:* Tailored Light 2. Laser Application Technology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [8] *Föhl, C.:* Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen. München: Utz, Wiss. 2011.
- [9] *Barz, A., Bliedtner, J., Müller, H.:* Lasermaterialbearbeitung. Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Beispiele ; mit 110 Tabellen. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.; Hanser 2014.
- [10] *Hampker, T.:* Untersuchung des Einflusses von Prozessfaserdurchmesser und Fokussierbrennweite beim Bohren mit Faserlaserstrahlung. Bachelorarbeit. Aachen 2014.
- [11] *Diekötter, T., Gottschalk, D., Jagla, P.:* Dynamische Prozessführung beim Laserstrahl-Bohren. Projektarbeit. Aachen 02.09.2013.
- [12] *Belitz, S., Michels, R., Stohrer, L.:* Ermittlung geeigneter Prozessfenster zum Trepanieren mit Faserlaserstrahlung. Projektarbeit. Aachen 2015.
- [13] *Friedrichs, M.:* Verfahrenstechnische Grundlagen für das Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung. Masterarbeit. Aachen 2014.
- [14] *Uftring, F., Hackmann, J. Li, G.:* Steigerung der geometrischen Qualität beim Perkussionsbohren mittels Pulse shaping. Projektarbeit. Aachen 19.09.2012.
- [15] *Uchtmann, H.:* Modulares, hybrides Laserstrahl-Bohren. Dissertation (unveröffentlicht). Aachen 2015.

## 7 Anhang

Bild 30:  
Schematische  
Darstellung des  
Strahlengangs zum  
Bohren mit  
Faserlaserstrahlung  
[15]

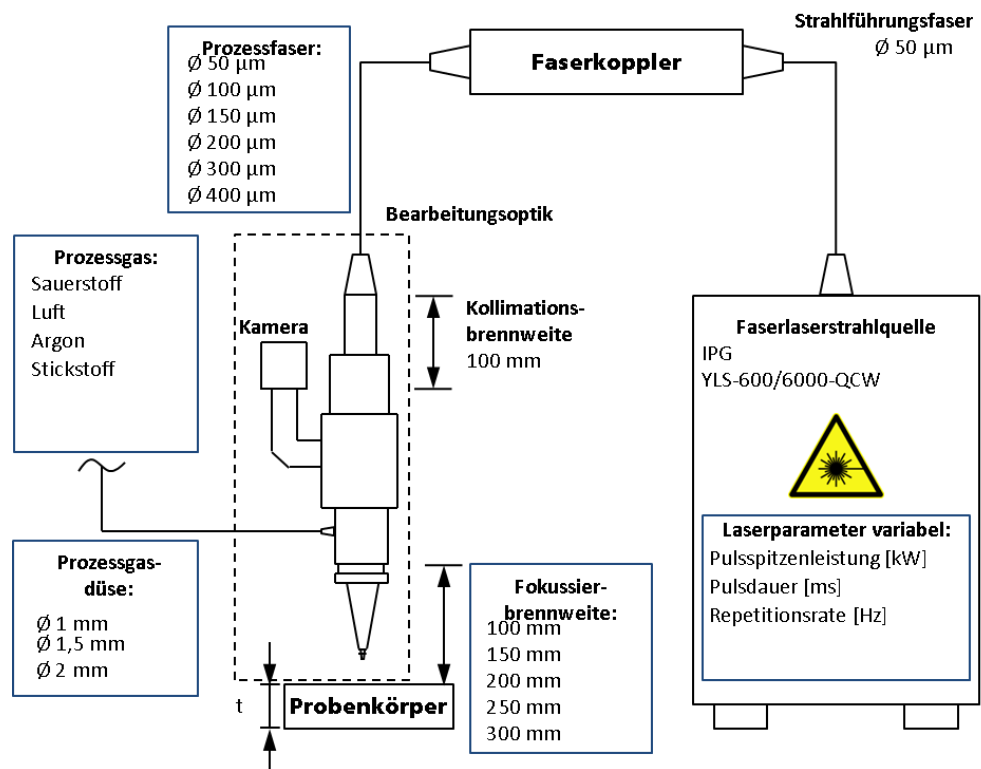


Bild 31:  
Schematische  
Darstellung des  
Strahlengangs des  
zum Bohren mit  
ultrakurzgepulster  
Laserstrahlung[15]

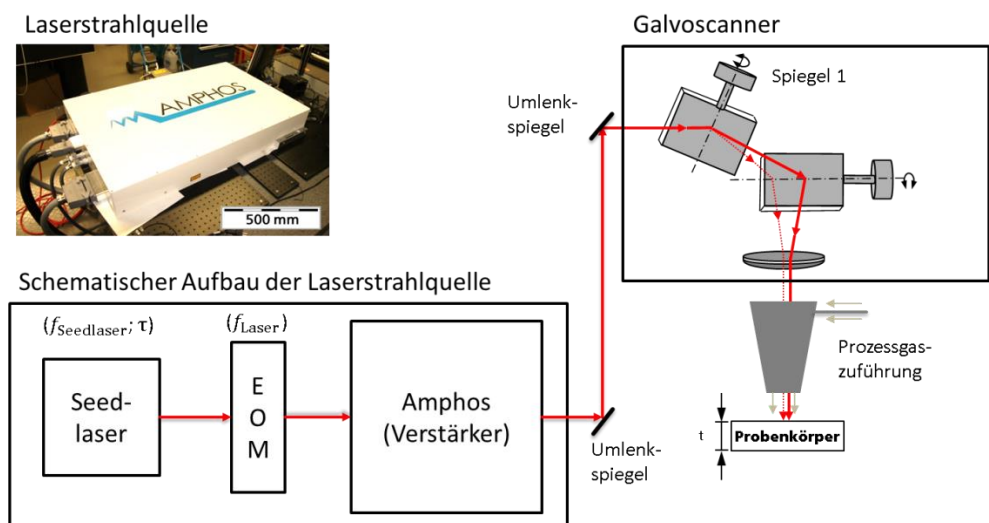


Bild 32:  
Aufbau zum Bohren  
mit  
Faserlaserstrahlung

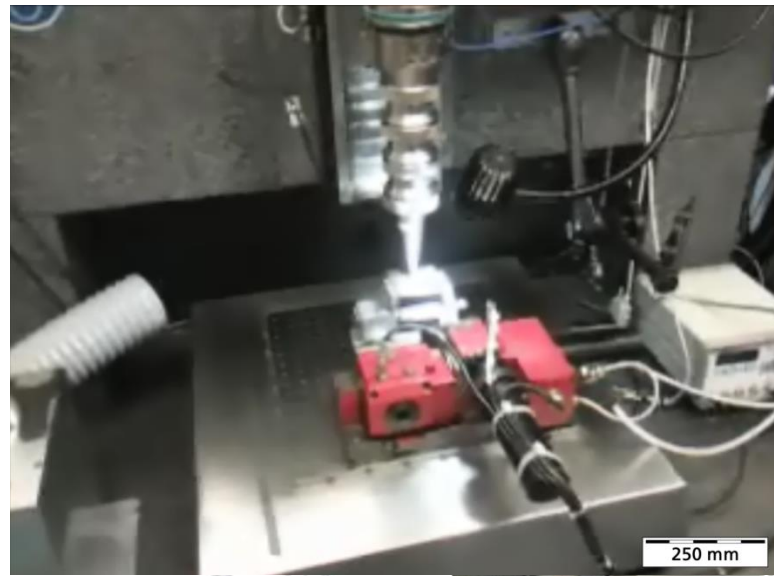


Bild 33:  
Aufbau zum Bohren  
mit  
ultrakurzgepulster  
Laserstrahlung

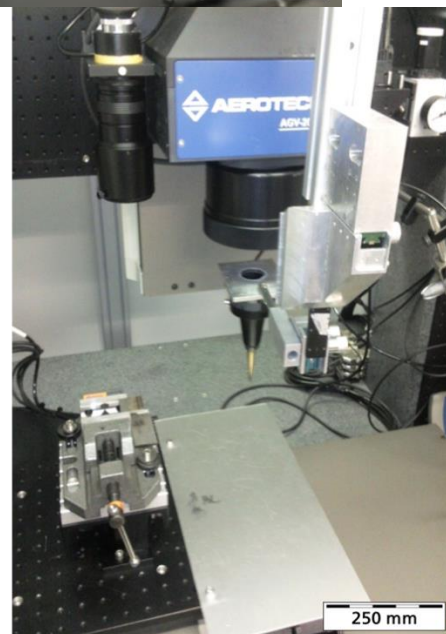
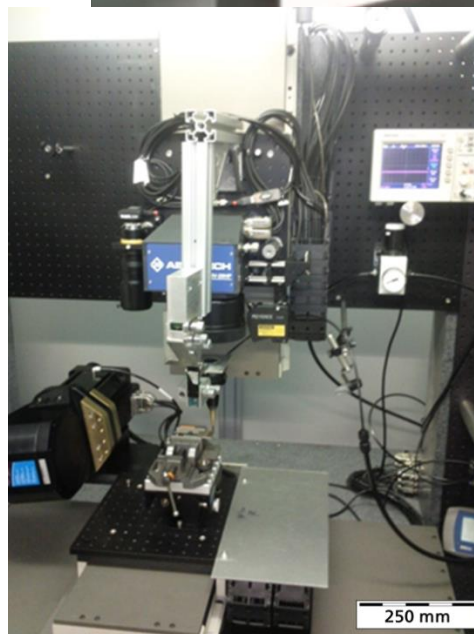
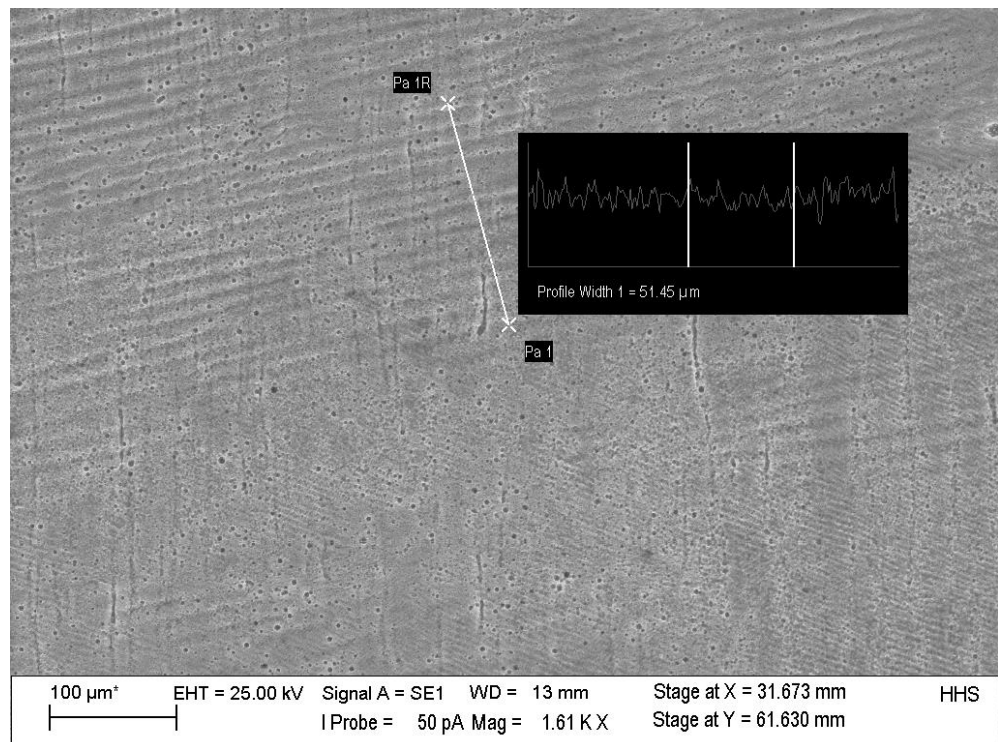


Tabelle 10:  
Übersicht über die  
variierten Parameter  
beim Rampen

Nummer	Parameter
1	10 Schritte jeweils 600W mehr Leistung
2	20 Schritte, jeweils 270W mehr Leistung
3	10 Schritte jeder 2. Puls 0,1 ms länger
4	20 schritte jeder Puls 0,25 ms länger
5	1+2 kombiniert
6	3+4 kombiniert

Bild 34:  
REM-Aufnahme der  
Rillen die beim  
Bohren mit 100 kHz,  
100% Leistung und  
400 Spiralwiederhol-  
ungen entstehen



### Graphische Darstellung der ultrakurzpuls-Bohrungen

Bild 35:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw Austritte von der Leistung. Die Verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{rep}=476$  kHz, Spiraldurchmesser  $d=450$   $\mu\text{m}$ .

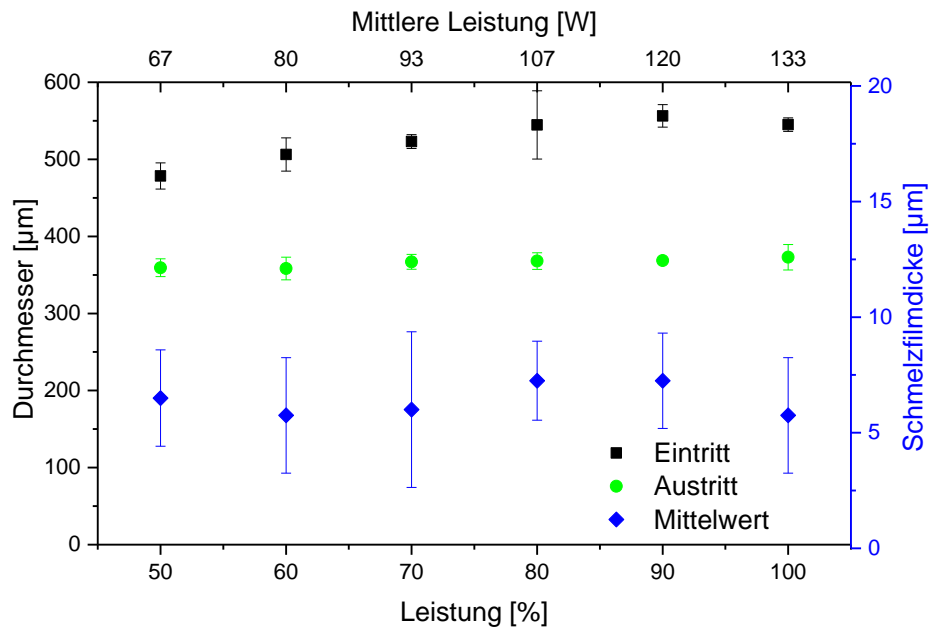
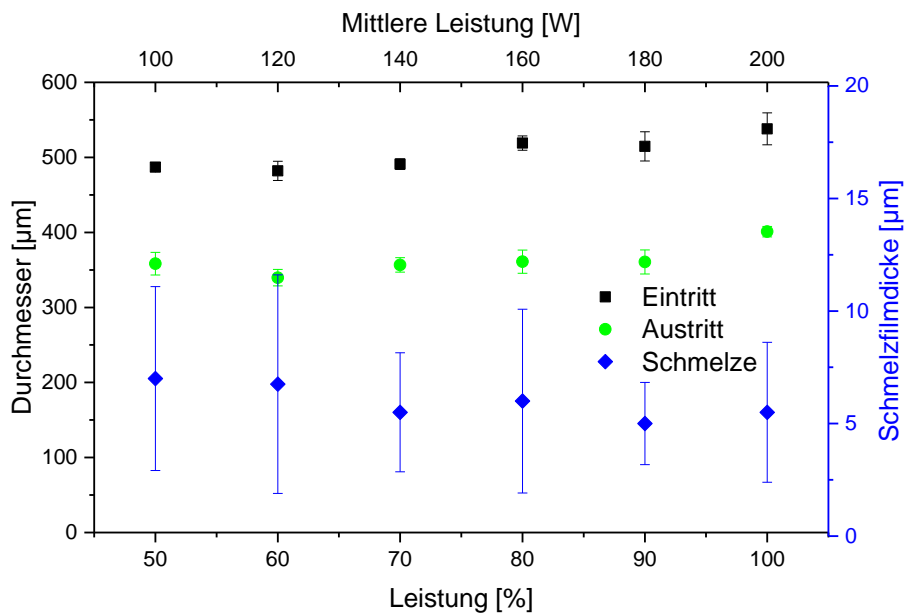


Bild 36:  
Abhängigkeit der Durchmesser der Bohrungsein- bzw Austritte von der Leistung. Die Verwendeten Prozessparameter sind:  $f_{rep}=715$  kHz, Spiraldurchmesser  $d=450$   $\mu\text{m}$ .



## 8 Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Aachen, den 13.08.2015