
BACHELORARBEIT

Herr
Fabian Knebel

Untersuchungen zur Erzeugung von optischen Bauelementen bestehend aus dielektrischen Materialien für die VUV- Laserbearbeitung mittels Femtosekunden Laserstrahlung

Mittweida, 2018

BACHELORARBEIT

Untersuchungen zur Erzeugung von optischen Bauelementen bestehend aus dielektrischen Materialien für die VUV- Laserbearbeitung mittels Femtosekunden Laserstrahlung

Autor:
Herr

Fabian Knebel

Studiengang:
Lasertechnik

Seminargruppe:
LT14w1-B

Erstprüfer:
Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. (FH) Manuel Pfeiffer

Einreichung:
Mittweida, 08.01.2018

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2018

BACHELORTHESIS

Investigations on the fabrication of optical components consisting of dielectric materials for VUV laser processing by femtosecond laser radiation

author:

Mr.

Fabian Knebel

course of studies:

Lasertechnik

seminar group:

LT14w1-B

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

second examiner:

Dipl.-Ing. (FH) Manuel Pfeiffer

submission:

Mittweida, 08.01.2018

defence/ evaluation:

Mittweida, 2018

Bibliografische Beschreibung:

Fabian, Knebel:

Untersuchungen zur Erzeugung von optischen Bauelementen bestehend aus dielektrischen Materialien für die VUV- Laserbearbeitung mittels Femtosekunden Laserstrahlung. - 2018 – Verzeichnisse 6 S., Inhalt 29 S, Anhänge 6 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2018

Referat:

In dieser Arbeit wird das Abtragsverhalten und die Strukturierbarkeit von Dielektrischen Materialien hoher Bandlücke unter Verwendung von ultrakurz gepulster Laserstrahlung im Nahinfraroten Wellenlängenbereich untersucht. Anschließend werden Strukturen erzeugt, als Maske eingesetzt und getestet.

Inhalt

Inhalt	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Formelzeichen- und Einheitenverzeichnis	7
1 Einleitung.....	8
2 Grundlagen	9
2.1 Abtragsmechanismen	9
2.2 Inkubation	10
2.3 Eigenschaften der verwendeten Materialien	12
2.3.1 Eigenschaften von Calciumfluorid	12
2.3.2 Eigenschaften von Magnesiumfluorid	12
2.3.3 Eigenschaften von Lithiumfluorid	12
3 Grundlagenuntersuchungen und Versuchsaufbau.....	13
3.1 Versuchsaufbau	13
3.2 Erzeugung von Abträgen zur Bestimmung der Schwellwerte	14
3.2.1 Calciumfluorid	15
3.2.2 Magnesiumfluorid	16
3.2.3 Lithiumfluorid.....	17
4 Ermittlung der Abtragsparameter	19
4.1 Erzeugung von Linienabträgen	19
4.2 Erzeugung der Maskenstrukturen.....	22
4.2.1 Erzeugung eines Beugungsgitters	22
4.2.2 Erzeugung eines Phasengitters	25
4.2.3 Erzeugung einer Fresnel Zonenplatte.....	29
5 Einsatzuntersuchung der Masken.....	31
5.1 Maskenprojektion.....	31

5.2	Abbildung der Masken.....	32
6	Zusammenfassung	35
7	Ausblick.....	36
	Literatur	37
	Anlagen.....	39
	Anhang A: Übersicht Schwellwertermittlung.....	40
	Selbstständigkeitserklärung	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Elektronendichte im Leitungsband – Zeitlicher Verlauf des Laserpulses	9
Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau	13
Abbildung 3: Schema Testfeld zur Bestimmung der Abtragsschwellwerte	14
Abbildung 4: Calciumfluorid Abtragsdurchmesser - Schwellfluenz.....	15
Abbildung 5: Calciumfluorid Schwellfluenz - Pulsanzahl	15
Abbildung 6: Magnesiumfluorid Abtragsdurchmesser - Schwellfluenz	16
Abbildung 7: Calciumfluorid Schwellfluenz - Pulsanzahl	16
Abbildung 8: Lithiumfluorid Abtragsdurchmesser - Schwellfluenz	17
Abbildung 9: Lithiumfluorid Schwellfluenz - Pulsanzahl	17
Abbildung 10: Schema Testfeld Parametervariation	19
Abbildung 11: Abtragsbreite - Fluenz - Puls-zu-Puls Distanzvariation	20
Abbildung 12: Linienabstand - Linienabtrag.....	21
Abbildung 13: Ausschnitt Beugungsgittermaske	22
Abbildung 14: Einstich Beugungsgitterlinien	23
Abbildung 15: Beugungsgitterlinien	23
Abbildung 16: Ende Beugungsgitterlinien	23
Abbildung 17: Probendefekt Beugungsgitter.....	24
Abbildung 18: Ausplatzungsfortpflanzung.....	24
Abbildung 19: Ausplatzung Beugungsgitter	24
Abbildung 20: Probendefekt Beugungsgitter.....	24

Abbildungsverzeichnis	4
Abbildung 21: Pixelstruktur ohne Außenlinie	25
Abbildung 22: Schema Strukturierung.....	26
Abbildung 23: Pixel mit Außenkontur ohne Korrektur der Anfahrsstrecke	26
Abbildung 24: Pixel mit Außenkontur mit Korrektur der Anfahrsstrecke.....	27
Abbildung 25: Pixel Test Punkt- und Kantennachbarschaft.....	27
Abbildung 26: Ausschnitt Phasengitter.....	28
Abbildung 27: Ausschnitt Phasengitter kritische Kontur.....	28
Abbildung 28: Ausschnitt Phasengitter Kantenqualität	28
Abbildung 29: Ausschnitt Phasengitter hohe Pixeldichte	28
Abbildung 30: Schema Strukturierung Fresnel-Linse	29
Abbildung 31: Fresnel-Zonenplatte Debris	30
Abbildung 32: Fresnel-Zonenplatte Ausschnitt	30
Abbildung 33: Fresnel-Zonenplatte Strukturqualität.....	30
Abbildung 34: Fresnel-Zonenplatte Kantenqualität.....	30
Abbildung 35: Schema der Maskenprojektion	31
Abbildung 37: Projiziertes Beugungsgitter.....	32
Abbildung 36: Projiziertes Phasengitter.....	33
Abbildung 38: Projizierte Fresnel - Zonenplatte.....	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von Calciumfluorid	12
Tabelle 2: Eigenschaften von Magnesiumfluorid	12
Tabelle 3: Eigenschaften von Lithiumfluorid	12
Tabelle 4: Parametersätze für Strukturierung	21
Tabelle 5: Bewertung der Gittermaske	23
Tabelle 6: Bewertung der Defekte	24
Tabelle 7: Bewertung der Phasengittermaske	28
Tabelle 8: Bewertung der Fresnel-Zonenplatte-Maske	30
Tabelle 9: Bilder Abtragsuntersuchungen Calciumfluorid	40
Tabelle 10: Bilder Abtragsuntersuchungen Magnesiumfluorid	42
Tabelle 11: Bilder Abtragsuntersuchungen Lithiumfluorid	44

Abkürzungsverzeichnis

UV Ultraviolett

PD Puls-zu-Puls Distanz

Formelzeichen- und Einheitenverzeichnis

eV	Elektronenvolt
J	Joule
W	Watt
fs	Femtosekunde
τ_p	Pulsdauer
cm	Zentimeter
mm	Millimeter
μm	Mikrometer
nm	Nanometer
°C	Grad Celsius
k	Inkubationskoeffizient
e	Eulersche Zahl
H_{th}	Schwellfluenz
N	Pulsanzahl
n₀	Brechungsindex für den ordentlichen Strahl
n_e	Brechungsindex für den außerordentlichen Strahl
f	Brennweite

1 Einleitung

In dieser Arbeit werden die dielektrischen Materialien Calciumfluorid, Magnesiumfluorid und Lithiumfluorid untersucht, welche aufgrund ihrer hohen Bandlücken eine große Bedeutung als Materialien optischer Bauelemente, wie z.B. Linsen, Blenden und Masken für Laserstrahlung im ultravioletten Wellenlängenbereich haben. Herkömmlich werden Blenden und Masken für diesen Wellenlängenbereich hergestellt, indem Dielektrika an den Bereichen, wo der Strahl nicht abgebildet werden soll, mit Chrom bedampft werden. Hier wird der Strahl durch Absorption abgeschattet, was jedoch den Nachteil hat, dass sich die Chromschicht erhitzt und es durch das unter der Chromschicht liegende Dielektrikum, welches eine geringe Wärmeleitung besitzt, dazu führt, dass die Wärme nicht gut abgeleitet werden kann, sich diese staut und somit die Chromschicht verschleißt. Zusätzlich kommt es durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu Spannungen zwischen Dielektrikum und Chromschicht. Eine andere Möglichkeit ist, Metallfolien, wie zum Beispiel Tantalfolie, zu verwenden, welche ebenfalls den Strahl durch Absorption abschatten. Diese haben im Vergleich zu chrombedampften Dielektrika zwar den Vorteil, die Wärme besser ableiten zu können, sind jedoch mechanisch kaum belastbar und bei kleinen Strukturgrößen von schlechterer Kantenqualität [1]. Außerdem ist es mit Metallfolien nicht möglich innenliegende Strukturen zu erzeugen, da immer Stege gebraucht werden, um diese zu halten [1]. Die Stege sind sehr dünn und somit extrem empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen, so dass sie mitunter schon beim Einbringen in den Strahlengang zerstört werden können oder die Stege durch die Bestrahlung beschädigt und letztendlich zerstört werden [1]. Um diese Probleme zu lösen, können sogenannte Streumasken verwendet werden. Diese Masken streuen Anteile des aufgeweiteten Strahles dadurch, dass sie an diesen Stellen aufgeraut wurden, aus dem Strahlengang, so dass diese beim späteren Fokussieren nicht mit abgebildet werden. In den Bereichen, wo der Strahl auf der Probe abgebildet werden soll, muss die Maske die Strahlung möglichst unbeeinflusst transmittieren. Um möglichst genau abbilden zu können, ist die Kantenqualität der streuend wirkenden Bereiche von großer Bedeutung. Probleme die bei herkömmlich hergestellten Masken auftreten, sind bei den Streumasken nicht vorhanden, da sich diese kaum erhitzen, weil sie nur einen geringen Anteil der Strahlung absorbieren und den größten Anteil diffus transmittieren oder zurückstreuen. Des Weiteren sind innenliegende Strukturen ohne Nachteile erzeugbar. Die Strukturierung dieser Masken mittels Laserstrahlung soll im Folgenden untersucht werden.

2 Grundlagen

Bei dielektrischen Materialien befinden sich alle Elektronen in starker Bindung zum Kern. Um die Bindung der am schwächsten gebundenen Elektronen zu überwinden, welche Valenzelektronen genannt werden, sind Energien nötig, die bei den untersuchten Materialien zwischen 10 eV bis hin zu 12,6 eV liegen. Die Energie eines einzelnen Photons bei der verwendeten Wellenlänge von 1028 nm [2] beträgt 1,21 eV. Daraus geht hervor, dass ein Photon nicht ausreicht, um ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband zu heben und die Photonen transmittieren durch das Medium. Somit sind die untersuchten Materialien für diese Wellenlänge transparent.

2.1 Abtragsmechanismen

Bei einer Bestrahlung des Mediums mit hoher Intensität kommt es zu den nichtlinearen Effekten Multiphotonabsorption [3,4,5], Tunnelionisation [3,4,5], Avalanche-Ionisation [3,4,5], welche in Quelle [6] zusammengefasst sind. Aufgrund dieser Effekte werden Photonen absorbiert und trotz der hohen Bandlücke ein Abtrag oder eine Modifikation des Materials erzeugt.

Wenn ein Laserpuls ein Material mit hoher Bandlücke trifft, generiert dieser, zunächst nichtlinear, freie Ladungsträger, bevor die Avalanche-Ionisation einsetzt. In nachstehender Abbildung wird schematisch dargestellt, wie die einzelnen Effekte bei der Wechselwirkung eines Pulses mit dem Material zusammenwirken.

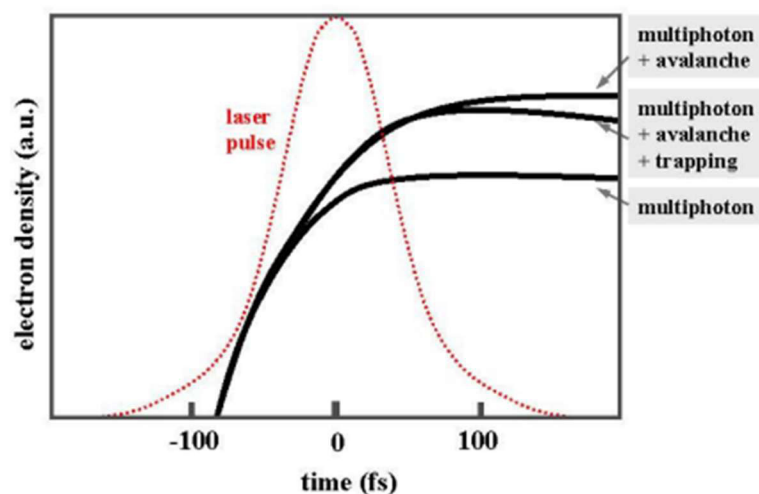


Abbildung 1 : Elektronendichte im Leitungsband – Zeitlicher Verlauf des Laserpulses [3]

Abbildung 1 stellt die Dichte der Elektronen im Leitungsband in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufes eines Laserpulses dar. Die Ordinate ist logarithmisch skaliert. Der betrachtete Laserpuls ist ca. 200 Femtosekunden lang und entspricht in seinem zeitlichen Verlauf einem Gauß-Profil. Zu erkennen ist, dass zu Beginn noch keine freien Ladungsträger durch den Puls generiert werden, da hier die Leistungsflussdichte zu gering ist. Dieser Anteil des Pulses wird nahezu vollständig transmittiert. Steigt nun die Leistungsflussdichte auf einen materialabhängigen Wert an, so treten nichtlineare Effekte auf, welche zur Generierung freier Ladungsträger führen. Sobald freie Ladungsträger vorhanden sind bzw. sich Elektronen im Leitungsband befinden, absorbieren diese weiterhin Photonen und es kommt zur Avalanche-Ionisation. Zusätzlich werden Elektronen weiterhin durch Multiphotonabsorption und Tunnelionisation in das Leitungsband gehoben, solange die Leistungsflussdichte den Schwellwert nicht unterschreitet. Im Diagramm ist zu sehen, dass die auf diese Weise erzeugte Ladungsträgerdichte, die durch die Kurve „multiphoton“ dargestellt wird, nach Erreichen eines bestimmten Wertes stagniert, was bedeutet, dass kaum noch neue Ladungsträger ins Leitungsband gehoben werden, sobald der Schwellwert unterschritten ist. Die nichtlineare Kurve „multiphoton + avalanche“ steigt jedoch weiter, bis keine Leistungsflussdichte mehr vorhanden ist und stagniert danach. Real kommt es jedoch zusätzlich zum "Trapping – Effekt", bei dem Elektronen, welche sich bereits im Leitungsband befinden, spontan wieder in das Valenzband zurückfallen, wodurch bei der Kurve "multiphoton + avalanche + trapping" ab einer bestimmten Leistungsflussdichte wieder sinkt, da weniger Elektronen angeregt werden als spontan zurückfallen. Befinden sich ausreichend viele Elektronen im Leitungsband, spricht man vom "Optical Breakdown" und es werden alle Photonen von Elektronen im Leitungsband linear absorbiert durch Resonanz-Absorption, bei der sich die Frequenz des Plasmas an die des einfallenden elektrischen Feldes annähert. Auf diese Weise wird Energie im Material deponiert, welche letztendlich, aufgrund von starker Erwärmung zum Verdampfen, oder durch thermisch induzierte Verspannungen zum Ausplatzen des Materials und somit zum Abtrag führt.

2.2 Inkubation

Generell wird die Zerstörschwelle durch Materialdefekte herabgesetzt. Diese können durch unterschiedliche Effekte zustande kommen und unterschiedliche Auswirkungen haben. Sie können mechanisch, in Form von Kratzern oder Poren im Material oder Einschlüssen von Verunreinigungen vorkommen, die teilweise gezielt eingebracht werden, um die Zerstörschwelle zu senken und somit eine Bearbeitung möglich zu machen oder zu vereinfachen. Die Defekte können aber auch elektronisch sein, so dass sich die Bandlücke von Halbleitern oder Dielektrika partiell verringert oder zusätzliche erlaubte Elektronenzustände möglich werden. Wenn diese innerhalb der Bandlücke liegen, können manche Elektronen bei der Bestrahlung mit weniger Photonen, als für das Material bei der Bestrahlung mit dieser Wellenlänge üblich, in das Leitungsband gehoben werden. Es können aber auch Inkubationseffekte sein, Defekte im Material, die durch eine Bestrahlung mit mehreren Pulsen erzeugt wurden. Durch Inkubation können Zerstörungen bei der Bestrahlung des Materials mit mehreren Pulsen erzielt werden, obwohl deren Fluenzen

unterhalb der Einzelpuls- Zerstörschwelle liegen. Grund dafür sind durch vorangegangene unterschwellige Pulse erzeugte Modifizierungen des Materials. Inkubationseffekte in dielektrischen Materialien können durch die Erregung und Erzeugung von Leitungsbandelektronen stark beeinflusst werden, was schließlich zu einer Anhäufung von Fehlstellen führt [8]. Die primäre (resonant verstärkte) Multi-Photonen-Erregung führt zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren auf einer Sub-100-fs-Zeitskala. Diese Zustände haben eine Lebensdauer zwischen 150 Femtosekunden und mehreren Pikosekunden vor der Bildung von „self-trapped“ Exzitonen und Frenkel-Paaren. Ein kleiner Bruchteil dieser Frenkel-Paare rekombiniert und stabilisiert sich nicht, wodurch F-Zentren entstehen und damit auch zusätzliche Energieniveaus und Anregungswege für den nächsten Puls eingeführt werden [9]. Die relative Änderung der laserinduzierten Defektkonzentration nimmt mit zunehmender Pulsanzahl ab, bis schließlich ein Sättigungspunkt im Dielektrikum erreicht wird. Die Verringerung der Schadensschwelle ist daher bei höheren Pulsanzahlen weniger ausgeprägt. In solch einem Fall würde eine Bestrahlung unterhalb eines Mindestniveaus eine unendliche Anzahl von Pulsen erfordern, um die Defektakkumulation zu initiieren und somit makroskopische Schäden zu erzeugen. Das bedeutet, die Bestrahlung unter einem minimalen Niveau würde eine unendliche Anzahl von Impulsen erfordern, um makroskopische Schäden einzuleiten.

Berechnet werden kann die Abhängigkeit der Schadensschwelle von der Pulsanzahl mit folgender Gleichung [8]:

$$H_{th}(N, \tau_p, \lambda) = H_{th}(\infty, \tau_p, \lambda) + [H_{th}(1, \tau_p, \lambda) - H_{th}(\infty, \tau_p, \lambda)] \cdot e^{-k(N-1)} \quad (1)$$

H_{th} - Schwellfluenz

N - Pulsanzahl

τ_p - Pulsdauer

λ - Wellenlänge

k - Inkubationskoeffizient

$H_{th}(1, \tau_p, \lambda)$ ist die Schadensschwelle für einen Einzelpulsabtrag bei der verwendeten Pulsdauer und Wellenlänge. k ist ein empirischer Koeffizient, welcher in diesem Modell unabhängig von N ist. Je größer k ist, desto geringer ist die Änderung der Schadensschwelle mit steigender Pulsanzahl.

2.3 Eigenschaften der verwendeten Materialien

2.3.1 Eigenschaften von Calciumfluorid

Tabelle 1: Eigenschaften von Calciumfluorid [10]

Schmelztemperatur	1418 °C
Bandlücke	10 eV
Brechungsindex für 1028 nm	1,4289

2.3.2 Eigenschaften von Magnesiumfluorid

Tabelle 2: Eigenschaften von Magnesiumfluorid [10]

Schmelztemperatur	1263 °C
Bandlücke	11,8 eV
Brechungsindex für 1028 nm	$n_o = 1,3737$ $n_e = 1,3853$

2.3.3 Eigenschaften von Lithiumfluorid

Tabelle 3: Eigenschaften von Lithiumfluorid [10]

Schmelztemperatur	870 °C
Bandlücke	12,6 eV
Brechungsindex für 1028 nm	1,3871

3 Grundlagenuntersuchungen und Versuchsaufbau

3.1 Versuchsaufbau

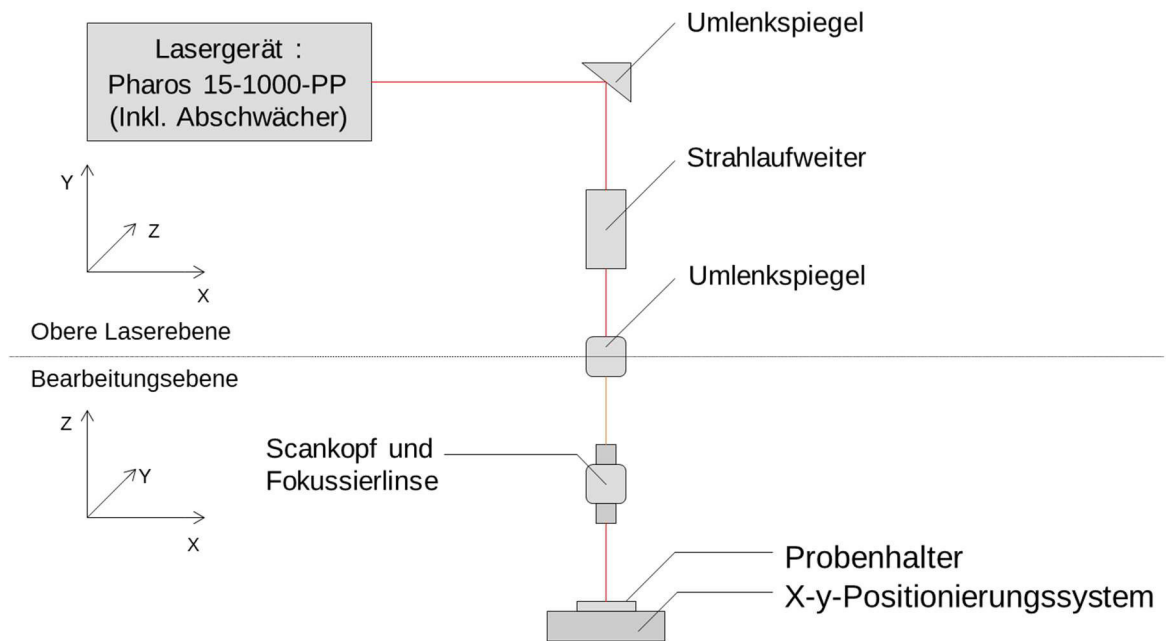


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau

Verwendet wurde das Lasergerät Pharos 15-1000-PP. Dies ist ein Femtosekundenlaser mit einer Grundwellenlänge von 1028 nm. Im Gerät befindet sich ein Abschwächer, der mittels Polarisation die Ausgangsleistung, welche maximal 12,5 W beträgt, zwischen 0 und 100 % variieren kann. Die Brennweite der Fokussierlinse betrug 100 mm.

3.2 Erzeugung von Abträgen zur Bestimmung der Schwellwerte

Die im Weiteren beschriebenen Abtragsuntersuchungen bilden die Grundlage für die Strukturierung, da für die Bearbeitung die Abtragsschwellen und das Abtragsverhalten der zu verwendenden Materialien bekannt sein müssen. Zusätzlich musste der Einfluss der Inkubation untersucht werden, um dieses Verhalten ebenfalls mit einbeziehen und die Eignung der Materialien für den Abtragsprozess abschätzen zu können. Zur Ermittlung der Schwellwerte wurden zunächst Abtragsuntersuchungen an den verwendeten Materialien durchgeführt, welche nach folgendem Schema durchgeführt wurden.

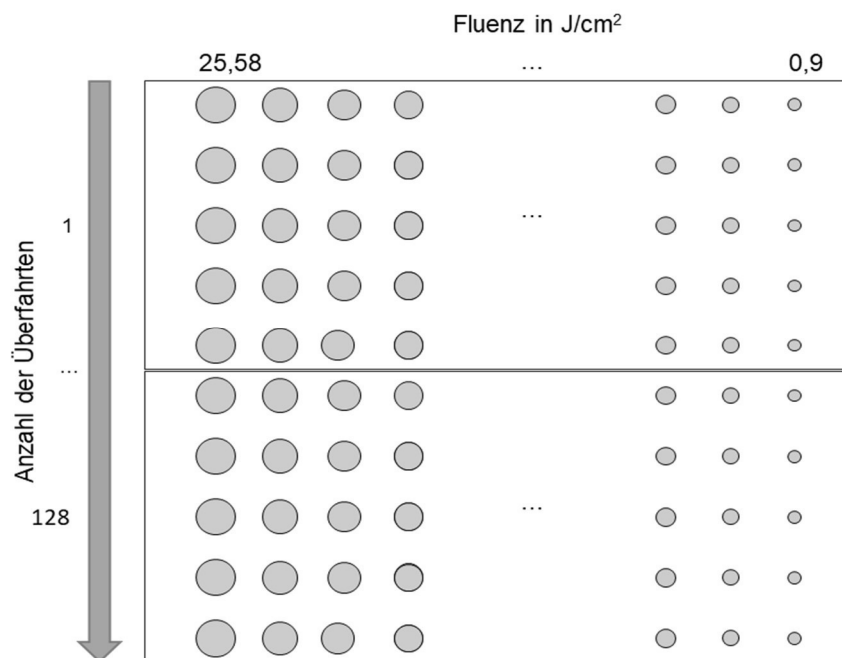


Abbildung 3: Schema Testfeld zur Bestimmung der Abtragsschwellwerte

Die Abträge wurden mit einer Pulsdauer von 230 Femtosekunden durchgeführt. Der Abschwächer diente zur Variation der Fluenz bzw. Intensität. Es wurden in 0,9 J/cm² - Schritten Abträge mit unterschiedlich vielen Überfahrten erzeugt. Die Anzahl der Überfahrten wurde von 1 beginnend schrittweise verdoppelt bis hin zu 128. Die Durchmesser der erzeugten Abträge wurden optisch ausgemessen und nach dem Liu-Plot [11] in einem Diagramm mit logarithmisch skaliertem x-Achsenwert (Fluenz) und y-Achsenwert (Abtragsdurchmesserquadrat) dargestellt. Die so dargestellten Werte der Durchmesser in Abhängigkeit von der Schwellfluenz ergeben Geraden, deren Schnittpunkt mit der x-Achse die Abtragsschwellfluenz des jeweils verwendeten Materials bei den verwendeten Parametern ergibt. Diese ermittelten Abtragsschwellfluenzen können in einem Diagramm in Abhängigkeit von der Pulsdauer dargestellt werden, um das Verhalten der Schwellfluenzen bei mehrfacher Bestrahlung des Materials darzustellen. Die auf diese Weise ermittelten Werte sollen nun für die verwendeten Materialien dargestellt werden.

3.2.1 Calciumfluorid

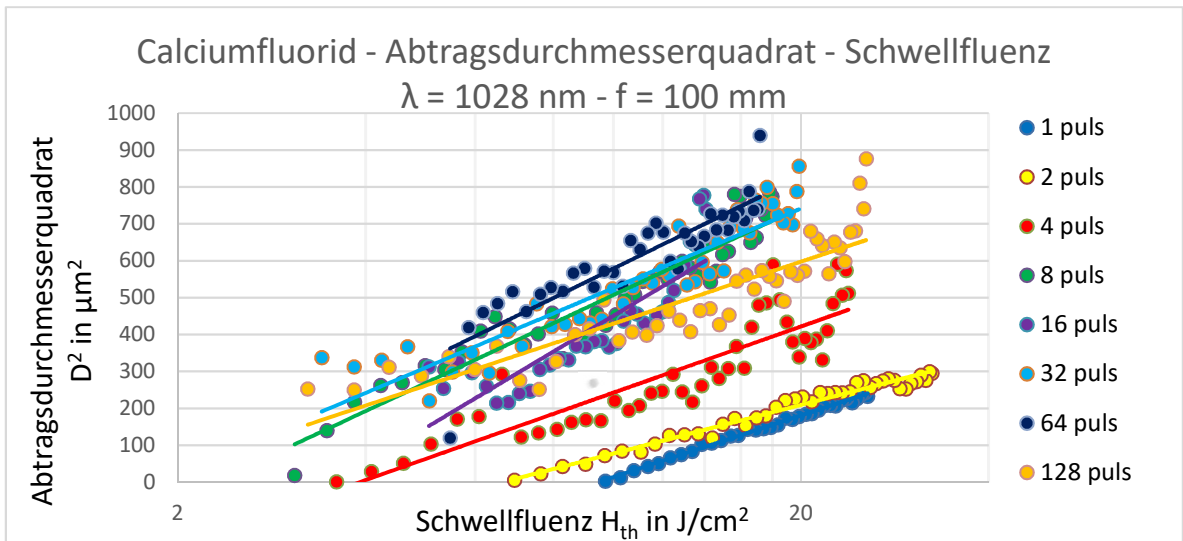


Abbildung 4: Calciumfluorid Abtragsdurchmesser - Schwellfluenz

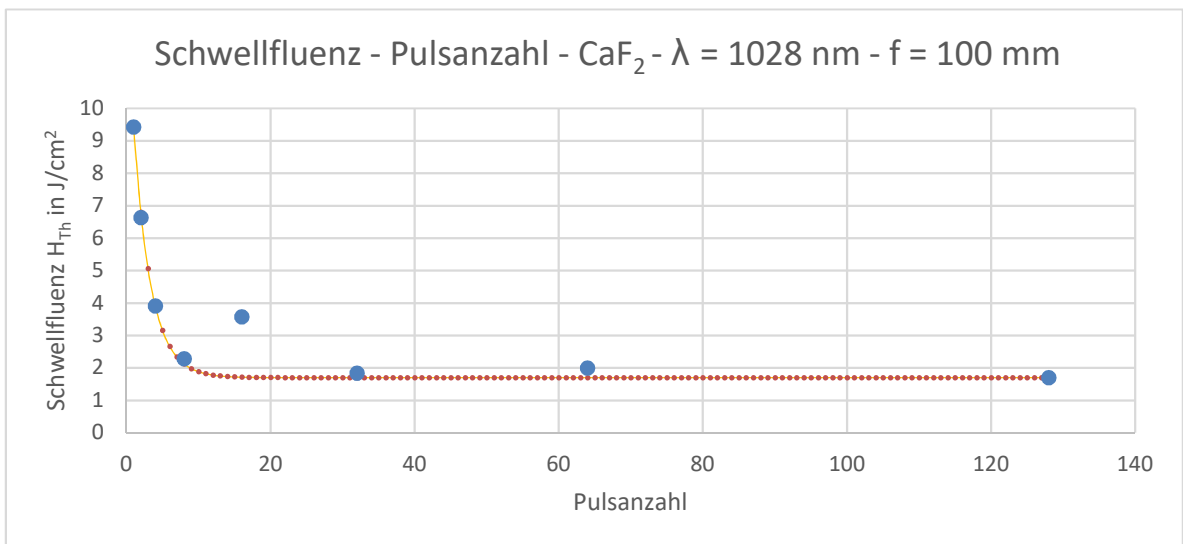


Abbildung 5: Calciumfluorid Schwellfluenz - Pulsanzahl

Abbildung 6 stellt die anhand des in Abbildung 5 dargestellten Liu-Plots ermittelten Schwellfluenzen in Abhängigkeit von der Pulsanzahl dar. Zu erkennen ist, dass die Schwellfluenzen mit steigender Pulsanzahl zunächst sehr stark fallen und sich ab einer Pulsanzahl von 32 kaum noch ändern. Die Schwellfluenz von Pulsanzahl 16 weicht stark von der mit Gleichung (1) ermittelten Trendkurve ab, was auf einen Fehler der Strahlpositionierung durch den verwendeten Scanner zurückgeführt werden könnte. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Schwellfluenz ohne diesen Fehler ähnlich gut in der Trendkurve liegen würde.

3.2.2 Magnesiumfluorid

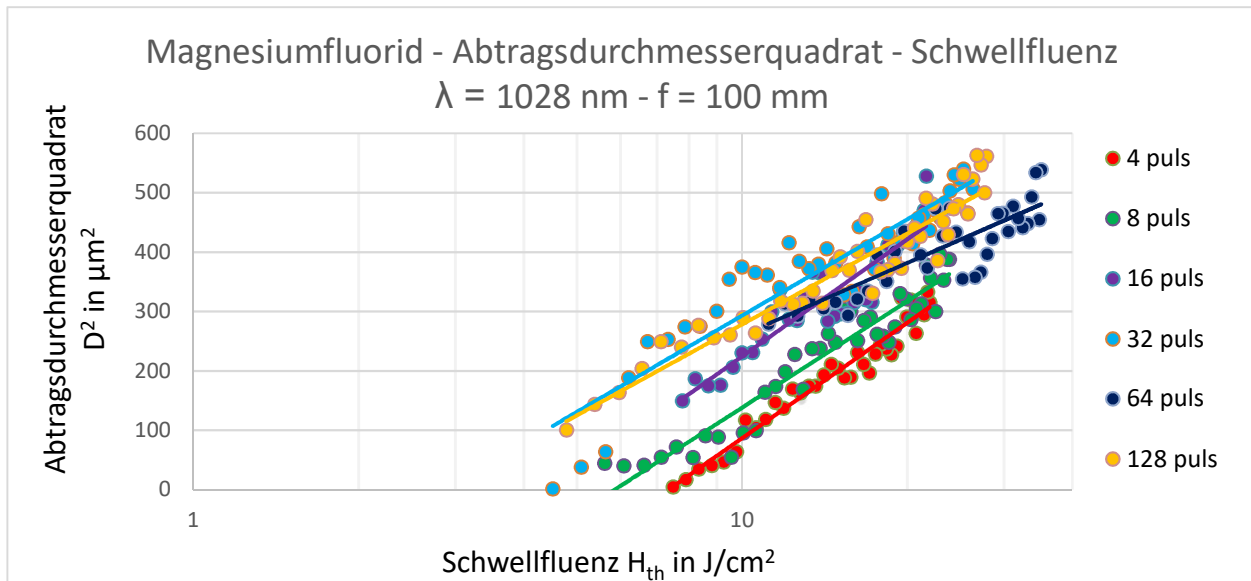


Abbildung 6: Magnesiumfluorid Abtragsdurchmesser - Schwellfluenz

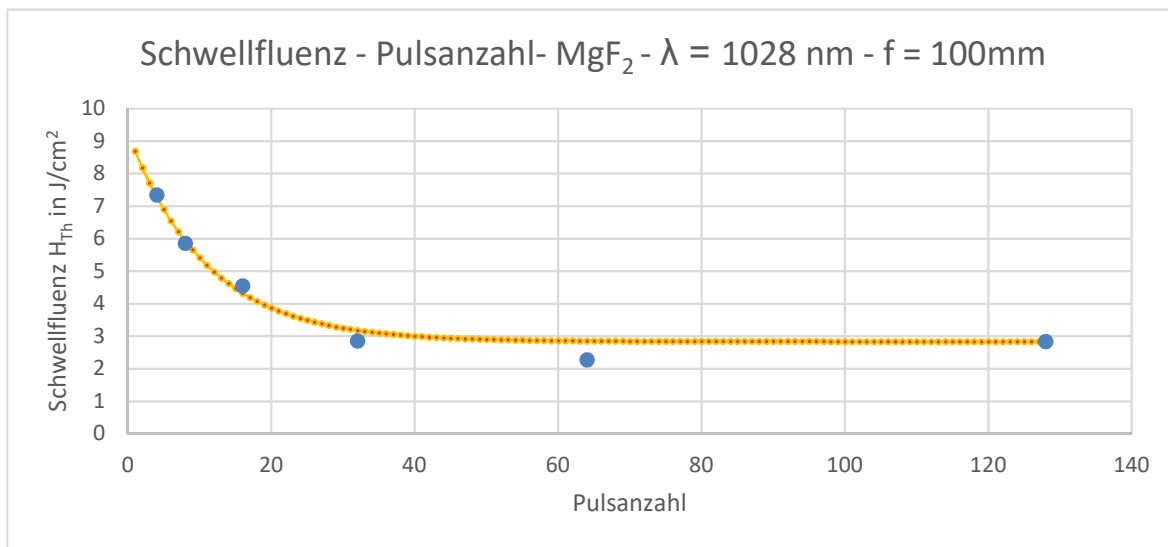


Abbildung 7: Calciumfluorid Schwellfluenz - Pulsanzahl

Abbildung 8 stellt die anhand des in Abbildung 7 dargestellten Liu-Plots ermittelten Schwellfluenzen in Abhängigkeit von der Pulsanzahl dar. Zu erkennen ist, dass die Schwellfluenzen mit steigender Pulsanzahl zunächst sehr stark fallen und sich ab einer Pulsanzahl von 32 kaum noch ändern. Die Schwellfluenz von Pulsanzahl 64 weicht von der mit Gleichung (1) ermittelten Trendkurve ab, was auf einen Fehler der Strahlpositionierung durch den verwendeten Scanner zurückgeführt werden könnte. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Schwellfluenz ohne diesen Fehler ähnlich gut in der Trendkurve liegen würde. Der Fehler fällt hier nicht so stark aus, wie bei der Pulsanzahl 16 für Calciumfluorid, da hier ein gleichgroßer Versatz der Pulse zueinander bei den größeren Abträgen, die mit 64 Pulsen erzeugt wurden, im Verhältnis weniger Einfluss hat.

3.2.3 Lithiumfluorid

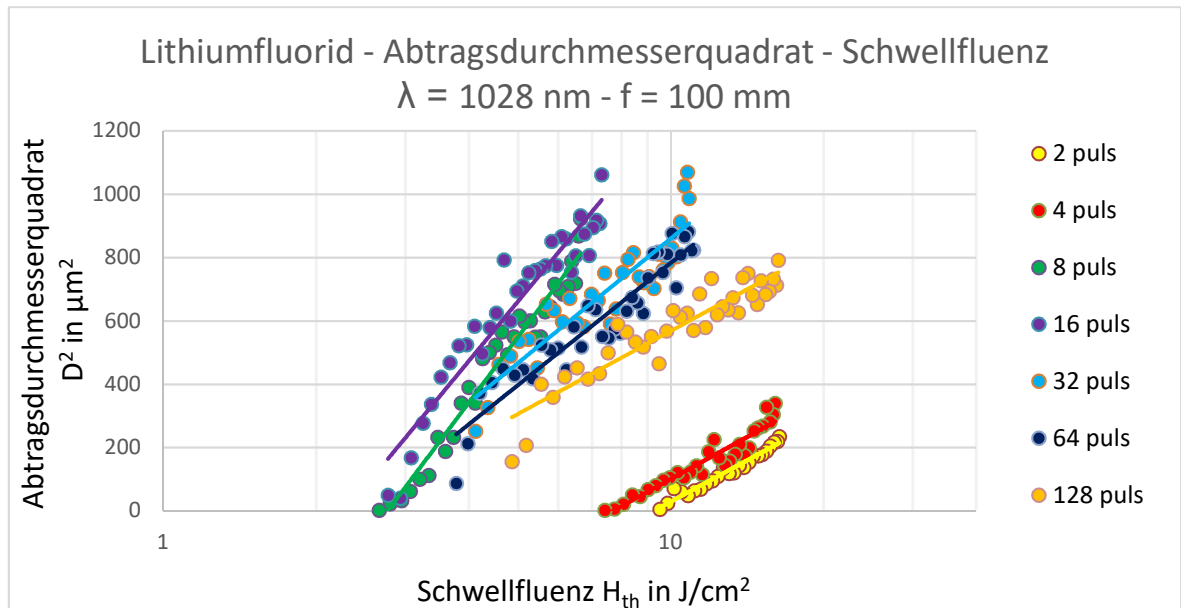


Abbildung 8: Lithiumfluorid Abtragsdurchmesser - Schwellfluenz

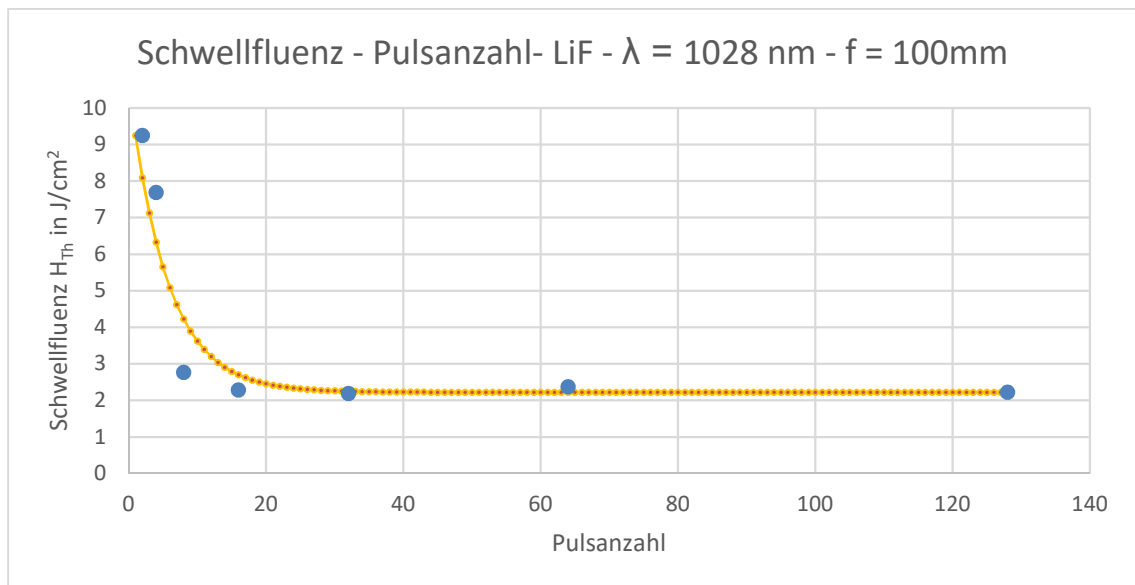


Abbildung 9: Lithiumfluorid Schwellfluenz - Pulsanzahl

Abbildung 10 stellt die anhand des in Abbildung 9 dargestellten Liu-Plots ermittelten Schwellfluenzen in Abhängigkeit von der Pulsanzahl dar. Zu erkennen ist, dass die Schwellfluenzen mit steigender Pulsanzahl zunächst sehr stark fallen und sich ab einer Pulsanzahl von 16 kaum noch ändern. Die entstandenen Abweichungen der Schwellfluenzen von der mit Gleichung (1) ermittelten Trendkurve können entstanden sein durch Verunreinigungen auf der Oberfläche der Probe, durch die die Strahlung besser ins Material eingekoppelt werden konnte.

Die Untersuchungen zeigten, dass das Abtragsverhalten von Lithiumfluorid ungünstig ist für die Strukturierung, da das Material entlang der Gitterebenen aufreißt und somit unbrauchbare Strukturen entstehen (siehe Tabelle 11).

Das Abtragsverhalten von Magnesiumfluorid war ähnlich dem von Calciumfluorid, jedoch wurde sich aus Mangel an Magnesiumfluorid für die Strukturierung von Calciumfluorid entschieden.

4 Ermittlung der Abtragsparameter

Nachdem die Schwellfluenzen und das Abtragsverhalten der Materialien festgestellt waren, wurden geeignete Abtragsparameter zur Strukturierung ermittelt.

4.1 Erzeugung von Linienabträgen

Strukturen können aus Linienabträgen zusammengesetzt werden, aus diesem Grund wurden einzelne Linien auf Calciumfluorid erzeugt, um die für die Strukturierung zu verwendenden Parameter festlegen zu können. Die variierten Parameter waren die Anzahl der Überfahrten, welche zwischen 1, 2 und 3 verändert wurden, die Puls-zu-Puls Distanz mittels Scannergeschwindigkeit, Pulswiederholfrequenz und die Leistung mit Hilfe eines internen Abschwächers. Zunächst wurden Linienabträge erzeugt mit Fluenzen zwischen $16,41 \text{ J/cm}^2$ und $6,03 \text{ J/cm}^2$ (in $3,25 \text{ J/cm}^2$ - Schritten) mit Puls-zu-Puls Distanzen zwischen $3,0$ und $5,0 \text{ }\mu\text{m}$ (in $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ Schritten) für 1, 2 und 3 Überfahrten. Da nach diesem Schema bei 3 Überfahrten ausschließlich Ausplatzungen entstanden sind, wurde der Versuch für 3 Überfahrten wiederholt mit Fluenzen zwischen $8,72$ und $4,67 \text{ J/cm}^2$ (in $2,12 \text{ J/cm}^2$ - Schritten) und Puls-zu-Puls Distanzen von 5 bis $7 \text{ }\mu\text{m}$.

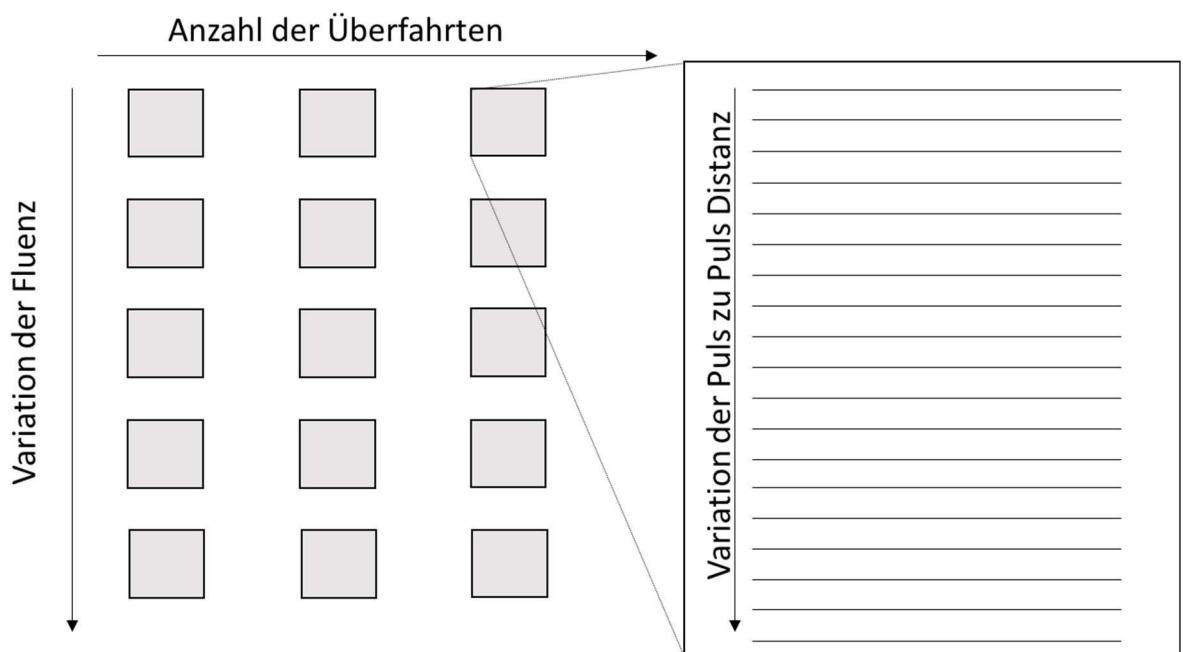


Abbildung 10: Schema Testfeld Parametervariation

Nach diesen Untersuchungen wurden die zu verwendenden Puls-zu-Puls Distanzen und Leistungsbereiche für die nachfolgenden Versuche ausgewählt. In diesen wurde für 1 Überfahrt die Fluenz zwischen 9,73 und 4,67 J/cm², für 2 Überfahrten zwischen 9,73 und 3,25 J/cm² und für 3 Überfahrten zwischen 8,72 und 3,64 J/cm² in 0,45 J/cm² Schritten variiert. Die Puls-zu-Puls Distanzen betragen für 1 Überfahrt 3,5 µm, für 2 Überfahrten 4,5 µm und für 3 Überfahrten 6,5 µm. Mit diesen Parametern wurden Linien erzeugt, welche hinsichtlich ihrer Kantenqualität bewertet und deren Abtragsbreiten ausgemessen wurden.

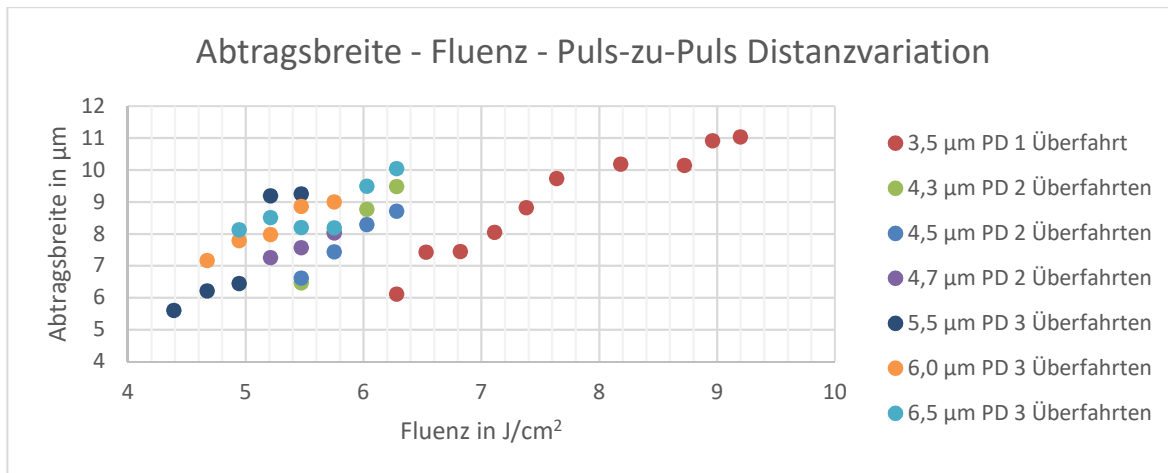


Abbildung 11: Abtragsbreite - Fluenz - Puls-zu-Puls Distanzvariation

In Abbildung 11 sind die Abtragsbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz bei unterschiedlicher Anzahl an Überfahrten und Puls-zu-Puls Distanzen (PD) dargestellt, für Linienabträge mit ausreichend guter Kanten- und Abtragsqualität. Das bedeutet, dass die Linien an den Rändern möglichst gerade sein sollen und der Abtrag innerhalb der Linie durchgängig. Zu erkennen ist, dass mit einer Puls-zu-Puls Distanz von 3,5 µm und einer Überfahrt der größte Bereich an Abtragsbreiten erzeugt werden kann. Diese Abtragsbreiten liegen hier zwischen 6 und 11 µm. Ebenfalls erkennbar ist, dass mit steigender Anzahl der Überfahrten oder mit steigender Fluenz die Puls-zu-Puls Distanz ansteigen muss, um weiterhin Abträge guter Kantenqualität zu erzeugen.

Für die zu erzeugenden Linienabträge auf den Masken war die Forderung, zwischen 13 und 15 µm breite Linienabträge generieren zu können. Um dieser Forderung gerecht zu werden, wurden nun 2 Linienabträge mit einem Versatz zueinander erzeugt. Da sich die Linien mit Versatz verhalten wie eine Mischung aus Abträgen einer Überfahrt und zwei Überfahrten, wurde eine Variation von Puls-zu-Puls Distanz, Abschwächerwert und Linienabstand durchgeführt. Bei jeweils gleicher Puls-zu-Puls Distanz und steigender Abschwächung bzw. bei gleicher Abschwächung und jeweils steigender Puls-zu-Puls Distanz wurden Felder erzeugt. Die Werte der Abschwächung wurden zwischen 4,67 und 7,38 J/cm² in 0,45 J/cm² -Schritten variiert. Die Puls-zu-Puls Distanzen wurden zwischen 3,8 µm bis 4,6 µm in 0,2 µm -Schritten erhöht. Innerhalb eines Feldes wurde eine Linie mit einer Überfahrt erzeugt und darunter Linien mit 2 Überfahrten, bei denen diese Überfahrten immer um den Versatz zu einander versetzt waren.

Dieser Versatz wurde zwischen 0 μm und 15 μm in 1 μm Schritten erhöht, wobei 0 μm Versatz einem Linienabtrag mit 2 Überfahrten entspricht. Die auf diese Weise erzeugten Linien wurden wieder hinsichtlich ihrer Kantenqualität bewertet und deren Abtragsbreite vermessen.

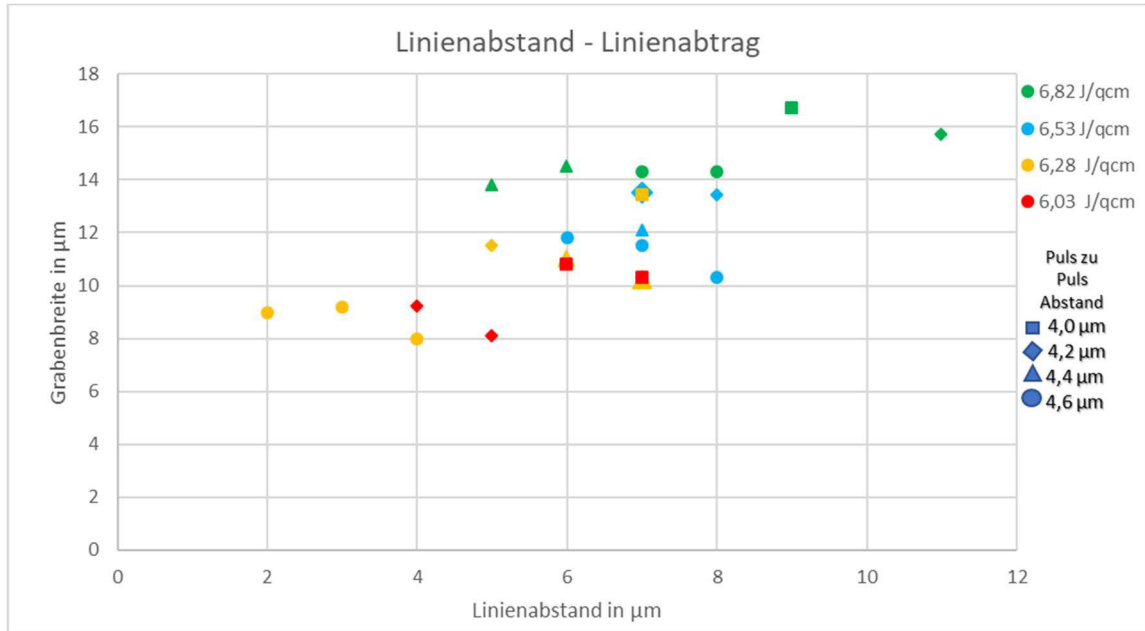


Abbildung 12: Linienabstand - Linienabtrag

In Abbildung 12 wurden, bei unterschiedlichen Abschwächungen und Puls-zu-Puls Distanzen, die Grabenbreiten der Linien mit ausreichend guter Kantenqualität und durchgängigem Abtrag innerhalb der Linien, in Abhängigkeit vom Linienabstand, dargestellt. Anhand dieser Untersuchungen kann nun für eine benötigte Grabenbreite zwischen 8 μm und 16,5 μm ein Parametersatz gewählt werden, mit dem diese Grabenbreite erzeugt werden kann. Entschieden wurde sich für 3 Parametersätze, mit denen die nachfolgenden Strukturierungen durchgeführt wurden.

Tabelle 4: Parametersätze für Strukturierung

Parametersatz	Fluenz [J/cm^2]	Linienabstand [μm]	Puls-zu-Puls Distanz [μm]
1	7,38 J/cm^2	7	4,6
2	7,11 J/cm^2	7	4,2
3	6,82 J/cm^2	7	4,0

4.2 Erzeugung der Maskenstrukturen

4.2.1 Erzeugung eines Beugungsgitters

Um eine Maske für ein Beugungsgitter zu strukturieren, welches die Gesamtabmessungen 4×4 mm hat, wurden zunächst kleinere Gitterstrukturen zum Testen der gewählten Parametersätze erzeugt. Die geforderte Periode des Beugungsgitters betrug $30 \mu\text{m}$ mit Grabenbreiten zwischen 13 und $15 \mu\text{m}$. Es wurden die 3 oben genannten Parametersätze gewählt, da diese Gräben erzeugen, die diese Bedingungen erfüllen und von guter Qualität sind. Die dabei entstandenen Gitter wurden bezüglich der Genauigkeit der Periodizität und Grabenbreite vermessen und bezüglich der Qualität bewertet. Alle 3 gewählten Parametersätze erzeugten Abträge ausreichender Qualität und es wurde sich für den Parametersatz 2 entschieden, um das Beugungsgitter zu strukturieren.

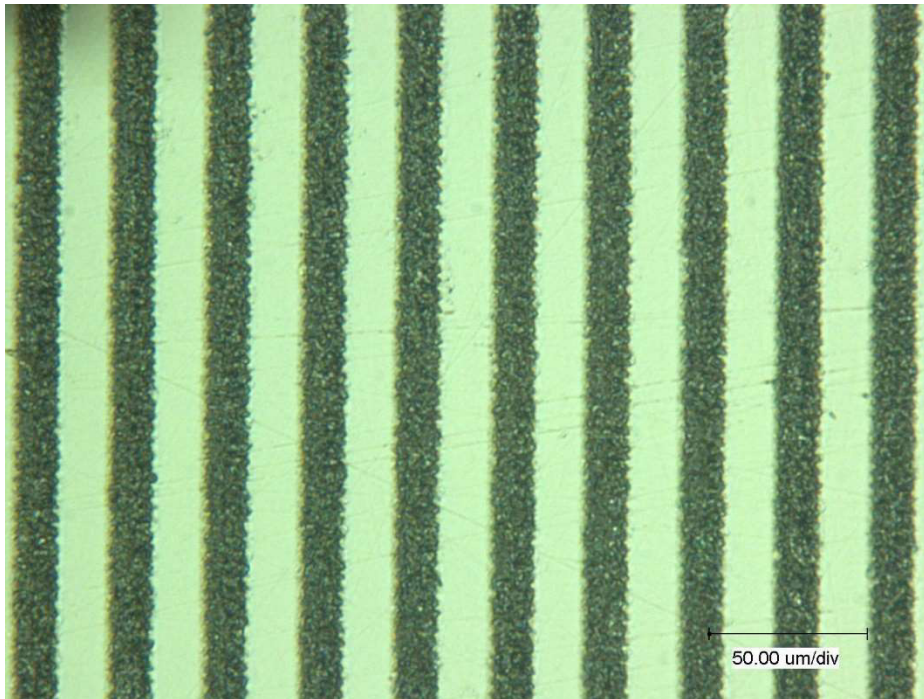
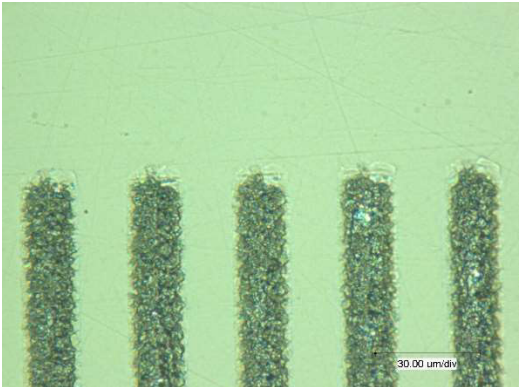
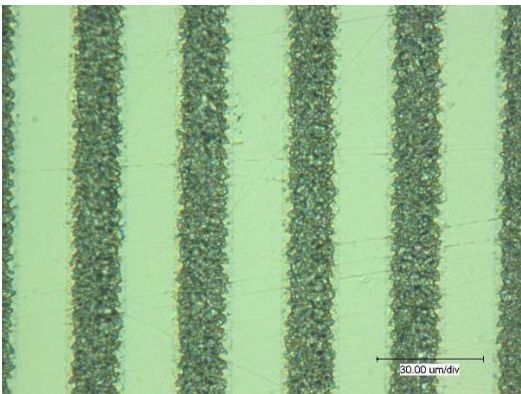
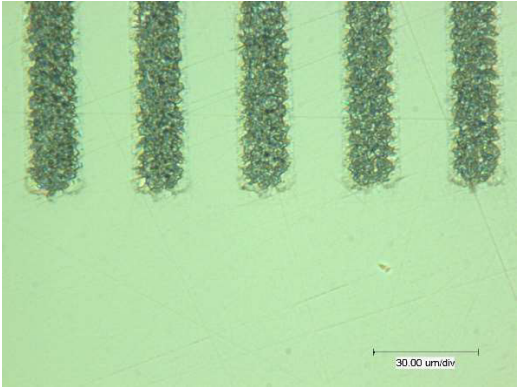


Abbildung 13: Ausschnitt Beugungsgittermaske

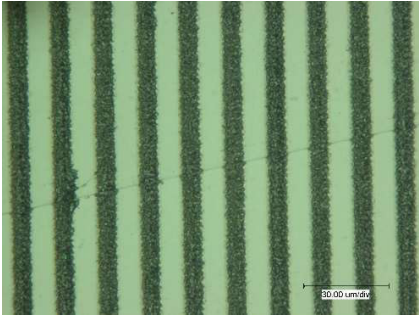
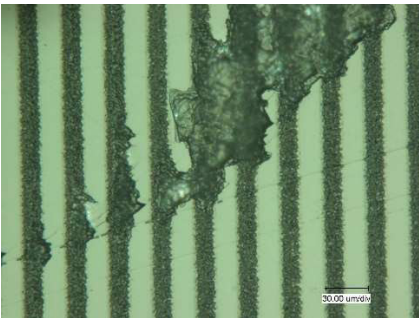
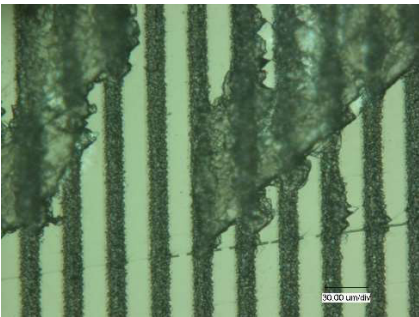
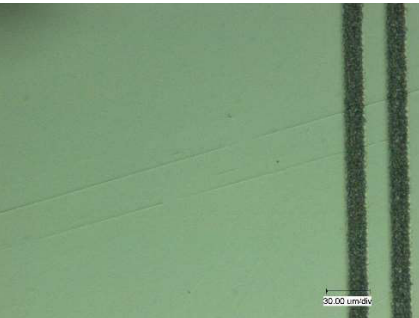
In Abbildung 13 ist ein Ausschnitt der strukturierten Beugungsgittermaske zu sehen, worin erkennbar ist, dass die erzeugten Strukturen von annehmbarer Kantenqualität sind und die erzeugten Gräben keine Strukturierungslücken aufweisen.

Tabelle 5: Bewertung der Gittermaske

<p>Ersichtlich ist, dass der Einstich der Gräben ausplatzungsfrei stattfindet. Es ist eine geringe modifizierte Zone erkennbar, wo keine Überlappung der Pulse mehr gegeben ist.</p>	 <p>Abbildung 14: Einstich Beugungsgitterlinien</p>
<p>In Abbildung 15 sind Kanten- und Grabenqualität deutlicher sichtbar.</p>	 <p>Abbildung 15: Beugungsgitterlinien</p>
<p>Das Ende der Grabenstrukturen ist ähnlich wie der Einstich, ausplatzungsfrei und mit geringer modifizierter Zone.</p>	 <p>Abbildung 16: Ende Beugungsgitterlinien</p>

Bei der Strukturierung des Beugungsgitters kam es zu einem nicht prozessbedingten, großflächigen Ausplatzen des Materials aufgrund eines Fehlers in der verwendeten Probe, was durch nachstehende Tabelle gezeigt wird.

Tabelle 6: Bewertung der Defekte

<p>Erkennbar ist ein Riss auf der Oberfläche der Probe, an dem die Gräben an den Seiten zunächst kleine Ausplatzungen aufweisen.</p>	 <p>Abbildung 17: Probendefekt Beugungsgitter</p>
<p>An manchen Stellen sind die Ausplatzungen größer ausgefallen, wodurch sich diese letztendlich zu großen Flächen ausgebreitet haben. Das Entstehen dieses Prozesses ist in nebenstehender Abbildung deutlich zu erkennen</p>	 <p>Abbildung 18: Ausplatzungsfortpflanzung Beugungsgitter</p>
<p>In nebenstehender Abbildung sind die Ausmaße dieser Ausplatzungen deutlich sichtbar.</p>	 <p>Abbildung 19: Ausplatzung Beugungsgitter</p>
<p>Die nebenstehende Abbildung zeigt, dass die Risse in der Oberfläche nicht durch den Prozess entstanden sind und sich fortgepflanzt haben, sondern es sich hierbei um einen Materialfehler handelt, der auch außerhalb der erzeugten Gitterstruktur aufzufinden ist.</p>	 <p>Abbildung 20: Probendefekt Beugungsgitter vor Strukturierung</p>

4.2.2 Erzeugung eines Phasengitters

Zur Erzeugung eines Phasengitters wurden zunächst einzelne Quadrate testweise einzeln strukturiert. Diese Quadrate werden im Beugungsgitter so aneinandergesetzt, dass eine Struktur aus Pixeln besteht und man mit diesen Pixeln eine große Vielfalt an Mustern realisieren kann. Zunächst wurden die Pixel strukturiert, indem Linienabträge bestimmter Länge aneinandergesetzt wurden. Auf diese Weise entstand nachfolgende Struktur.

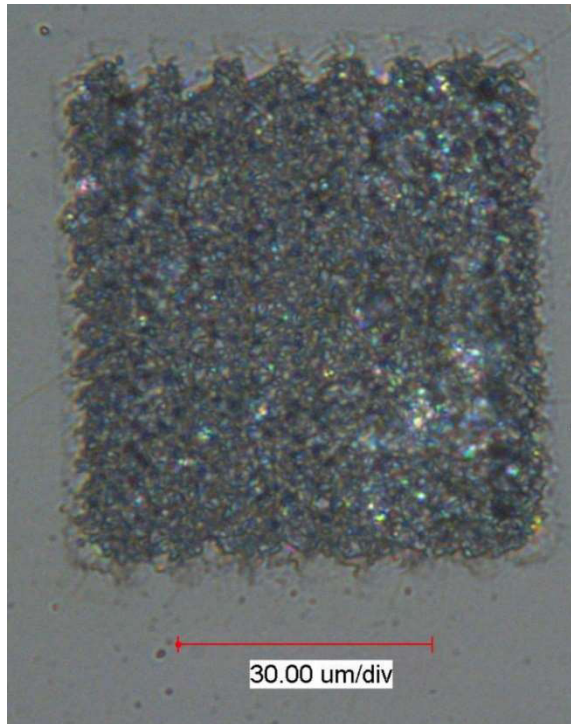
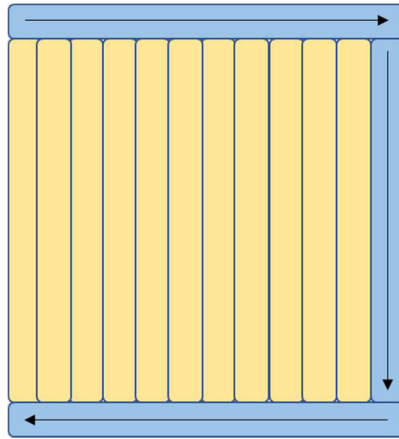


Abbildung 21: Pixelstruktur ohne Außenlinie

Es ist erkennbar, dass die Ränder links und rechts von guter Qualität, jedoch die Ränder oben und unten, wo Einstich und Ende der Linienabträge lagen, von schlechter Qualität waren, da hier zu stark ausgefrante Kanten entstanden.

Um eine gute Qualität aller Kanten zu realisieren, wurde die Strukturierung nach folgendem Schema durchgeführt.



**Abbildung 22: Schema Strukturierung
Pixel mit Außenkontur**

Es wurde zunächst die blau dargestellte Außenlinie mit einer Überfahrt erzeugt und danach die gelb dargestellten Linienabträge mit jeweils $7\ \mu\text{m}$ Linienabstand erzeugt, um das Pixel auszufüllen. Die Außenlinien erfüllen hier 2 Funktionen. Zum einen sorgen sie für eine gute Kantenqualität der Struktur, zum anderen dienen sie auch als Ausplatzungsstop. Sollte sich eine Verunreinigung auf dem Material befinden, entweder als Debris durch vorangegangene Abträge in näherer Umgebung oder in Form von Staub, und es somit zum Ausplatzen der Struktur kommen, ist die Chance sehr hoch, dass sich die Ausplatzung an den Außenlinien nicht weiter fortpflanzt. Somit ist bei der Erzeugung vieler Pixel auf einer Probe eine höhere Reproduktivität gegeben. Die Wahrscheinlichkeit, Ausplatzungen zu erzeugen, die das Gitter unbrauchbar machen würden, sinkt wesentlich. Auf diese Weise entstand folgende Struktur.

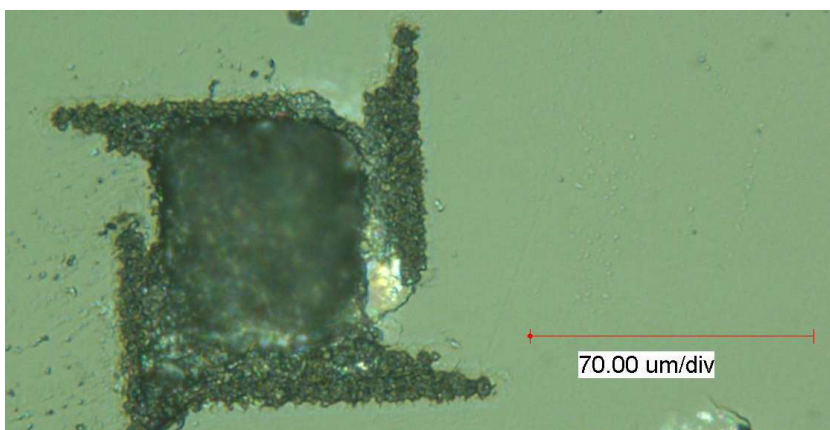


Abbildung 23: Pixel mit Außenkontur ohne Korrektur der Anfahrstrecke

Die Außenlinie ist versetzt aufgrund der internen Verzögerung des Lasersignals im Vergleich zum Scannerspiegel. Zur Lösung dieser Problematik wurde im Programm eine zusätzliche Strecke zur Korrektur der Anfahrstrecke eingebracht um diesen Versatz auszugleichen und es wurde folgende Struktur erzeugt.

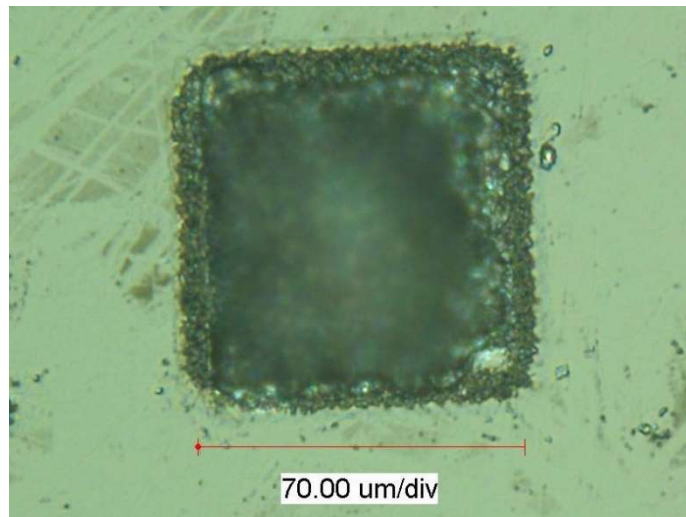


Abbildung 24: Pixel mit Außenkontur mit Korrektur der Anfahsstrecke

Die Kanten- und Eckenqualität des Pixels in Abbildung 24 war ausreichend gut. Nun wurde der optimale Abstand der Pixel zueinander ermittelt, um möglichst keine freie Spalte zwischen den Pixeln zu erhalten, wenn man sie aneinandersetzt, jedoch auch keine Ausplatzungen durch ein Überlappen der Pixel zu erhalten. Um alle Fälle abzudecken, wie Pixel aneinander angebracht werden können, wurde ein Kreuz mit den Pixeln erzeugt, wodurch sowohl Kanten- als auch Punktnachbarschaften erzeugt wurden.

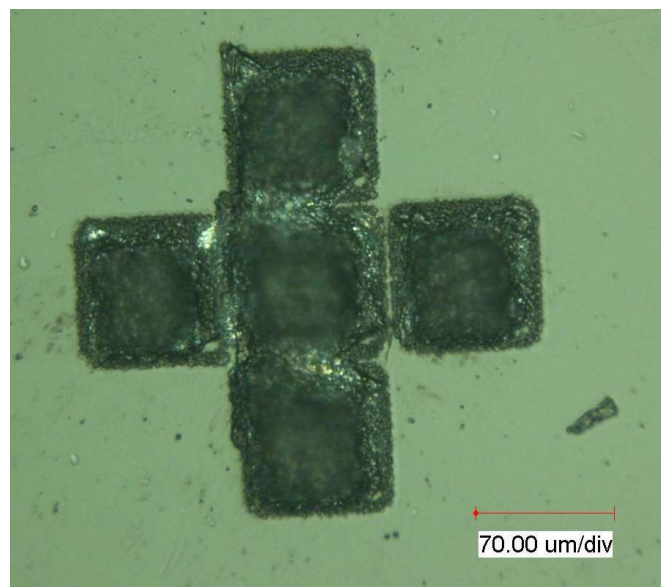
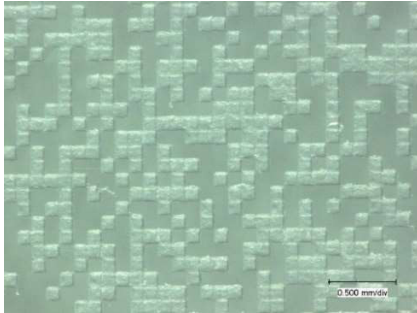
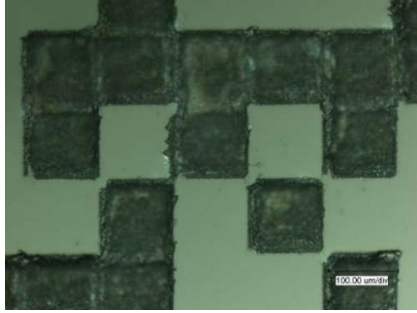
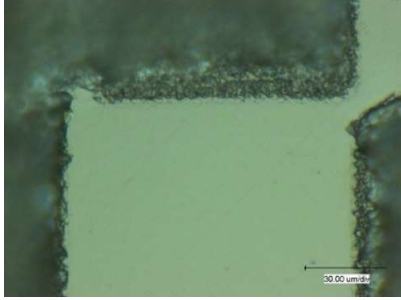
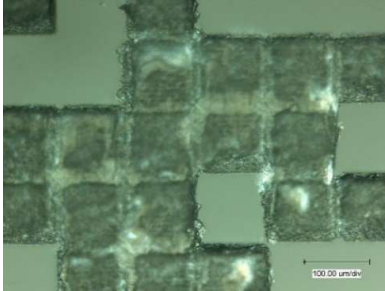


Abbildung 25: Pixel Test Punkt- und Kantennachbarschaft

Mit den gewählten Parametern wurde nun das Phasengitter mit einer Größe von 9 x 9 mm strukturiert.

Tabelle 7: Bewertung der Phasengittermaske

<p>Ausschnitt des Phasengitters</p>	 <p>Abbildung 26: Ausschnitt Phasengitter</p>
<p>Es ist ersichtlich, dass kritische Konturen, wie nicht strukturierte Bereiche, die von Pixeln umgeben sind, ebenfalls mit ausreichender Qualität erzeugt werden konnten.</p>	 <p>Abbildung 27: Ausschnitt Phasengitter kritische Kontur</p>
<p>Die erzeugten Kanten sind von sehr guter Qualität. Der Abstand zwischen den Pixeln bei der Punktnachbarschaft ist akzeptabel</p>	 <p>Abbildung 28: Ausschnitt Phasengitter Kantenqualität</p>
<p>Es bestand die Vermutung, dass in Bereichen, wo sehr viele Pixel nebeneinander strukturiert werden, großflächige Ausplatzungen entstehen können, was jedoch bei den gewählten Parametern nicht der Fall ist.</p>	 <p>Abbildung 29: Ausschnitt Phasengitter hohe Pixeldichte</p>

4.2.3 Erzeugung einer Fresnel Zonenplatte

Zur Erzeugung einer Fresnel-Zonenplatte bestimmter Abmessungen der strukturierten und nicht strukturierten kreisförmigen Zonen wurde Parametersatz 2 verwendet und wurde nach folgendem Schema vorgegangen.

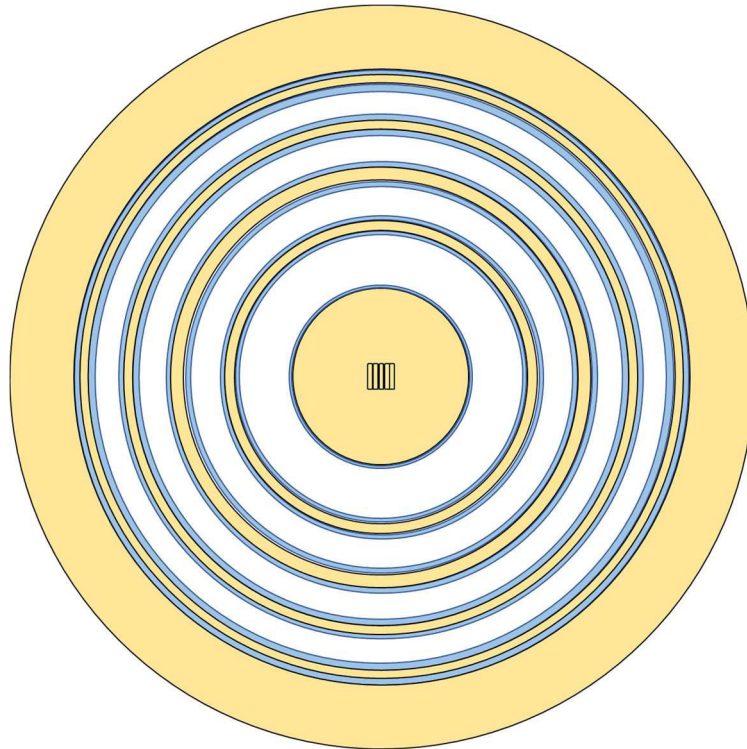
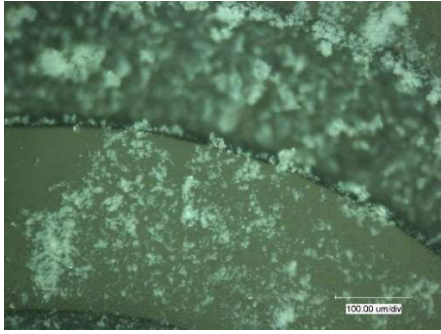
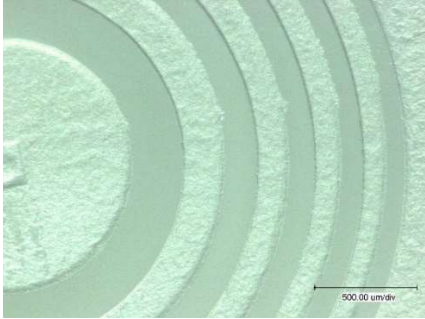
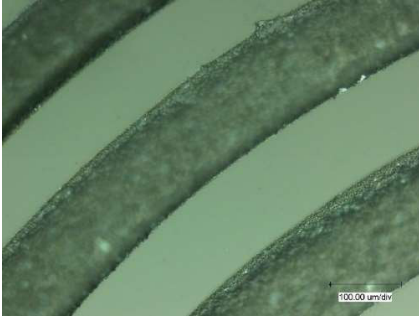
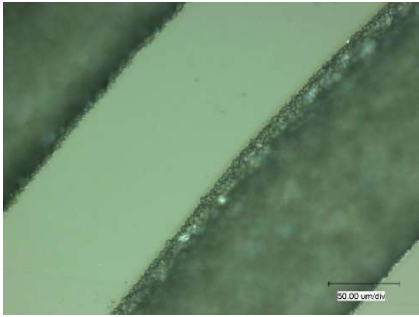


Abbildung 30: Schema Strukturierung Fresnel-Linse

Zuerst wurden bei jeder Zone die blau markierten Linien an den Randbereichen der Zone erzeugt, danach wurde der gelb markierte Bereich zwischen den 2 blauen Linien mit Kreisbahnen ausgefüllt. Da der zu verfahrenende Radius zur Mitte hin immer kleiner wird, kommt es zu Ungenauigkeiten in der Strukturierung, wodurch nicht sichergestellt werden kann, dass in der Mitte kein unstrukturierter Bereich erzeugt wird. Aus diesem Grund wurden die inneren Kreislinien nicht mehr als Kreise strukturiert, sondern als Linienabträge. Nachdem der äußere Kreisabtrag erzeugt war, wurden nur noch Linien mit den Füllparametern erzeugt, deren Radien nach außen hin immer größer wurden, um die Fläche außerhalb der Zonenplatte durchzustrukturieren und somit ungebeugte Strahlanteile aus dem Strahlengang zu streuen.

Tabelle 8: Bewertung der Fresnel-Zonenplatte-Maske

<p>Nach abgeschlossener Strukturierung war auf dem Material sehr viel Debris übrig, was in nebenstehendem Bild dargestellt ist. Die Probe wurde Celluloseacetat gereinigt und alle nachstehenden Bilder entstanden mit der gereinigten Probe ohne Debris.</p>	 <p>Abbildung 31: Fresnel-Zonenplatte Debris</p>
<p>Um das Relief der Struktur deutlicher sichtbar zu machen, wurde nebenstehendes Bild mit Seitlicht aufgenommen.</p>	 <p>Abbildung 32: Fresnel-Zonenplatte Ausschnitt</p>
<p>Das nebenstehende Bild soll die Qualität der Strukturen zeigen, vor allem bezüglich Durchgängigkeit der Strukturierung.</p>	 <p>Abbildung 33: Fresnel-Zonenplatte Strukturqualität</p>
<p>Das nebenstehende Bild zeigt deutlich die Kantenqualität der erzeugten Kreislinien.</p>	 <p>Abbildung 34: Fresnel-Zonenplatte Kantenqualität</p>

5 Einsatzuntersuchung der Masken

5.1 Maskenprojektion

Bei der Maskenprojektion soll auf dem zu bearbeitendem Material ein Intensitätsunterschied der einfallenden Laserstrahlung erzeugt werden. Wo Material abgetragen werden soll, muss die Intensität ausreichen, um einen Abtrag erzielen zu können, jedoch muss sie in den Bereichen, wo kein Abtrag erzielt werden soll, sehr gering sein, um an dieser Stelle keine Änderung des Materials zu erzeugen

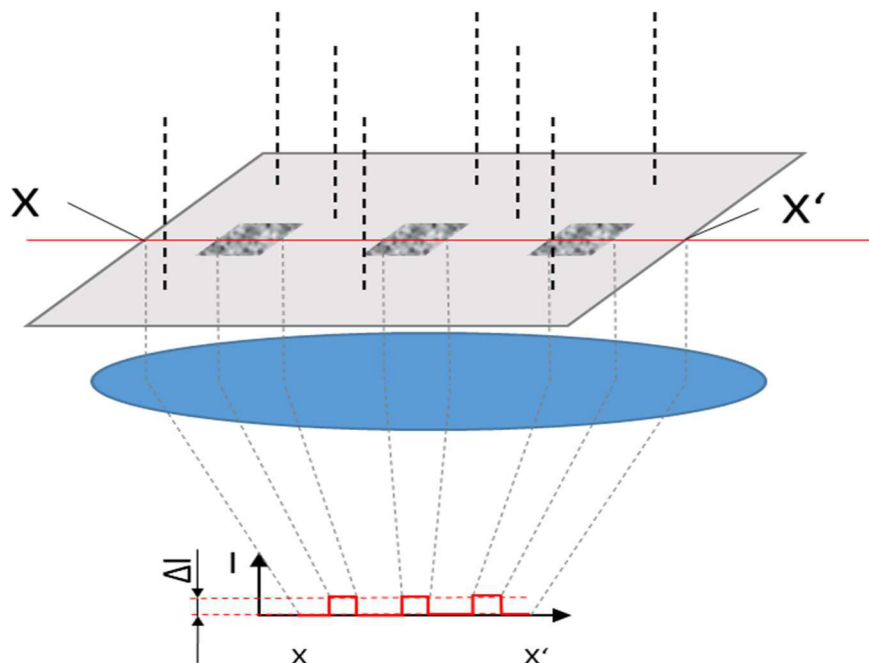


Abbildung 35: Schema der Maskenprojektion

Abbildung 35 soll das Prinzip der Maskenprojektion schematisch aufzeigen. Die Maske ist grau mit 3 darauf befindlichen Rechtecken dargestellt, die auf der Probe nicht abgebildet werden sollen. Auf die Maske trifft nun die Laserstrahlung, welche schwarz gestrichelt angedeutet ist. Diese Strahlung wird durch die 3 Bereiche ausgeblendet und durch die in blau dargestellte Sammellinse auf das Werkstück projiziert, wodurch sich das dargestellte Intensitätsprofil entlang des rot dargestellten Schnittes X – X' ergibt. Es kommt zu einem Intensitätsunterschied auf dem Werkstück, wodurch an den Stellen, an denen die Intensität sehr klein ist, weder Abtrag noch Inkubation stattfinden können.

5.2 Abbildung der Masken

Die erzeugten Masken wurden unter Verwendung eines Fluorlasers mit einer Wellenlänge von 157 nm und einem homogenisierten räumlichen Top-Hat Strahlprofil auf „Corning 7980: HPFS STANDARD CRATE“ mit einem Abbildungsmaßstab von 1 : 26,67 abgebildet. Es wurde die maximale Laserleistung verwendet, da dem Prozess durch die Reflexion an den Grenzflächen ein Anteil der Strahlungsleistung verloren ging [12]. Die auf diese Weise erzeugten Strukturen wurden mit einem Konfokalmikroskop aufgenommen:

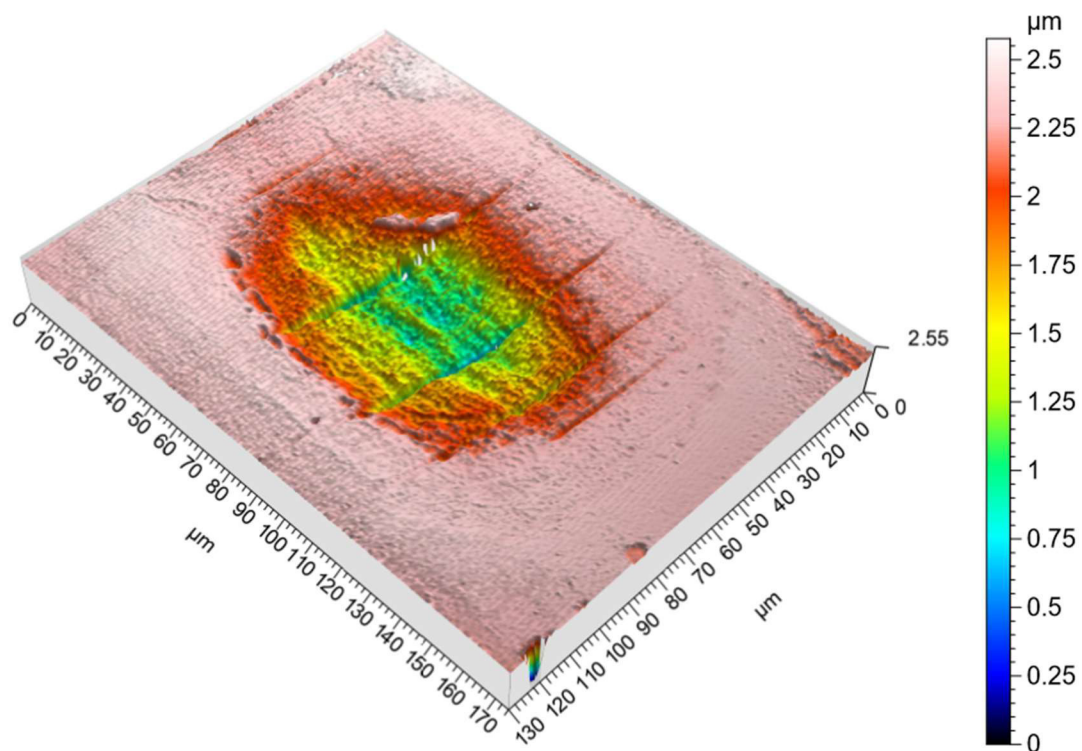


Abbildung 36: Projiziertes Beugungsgitter

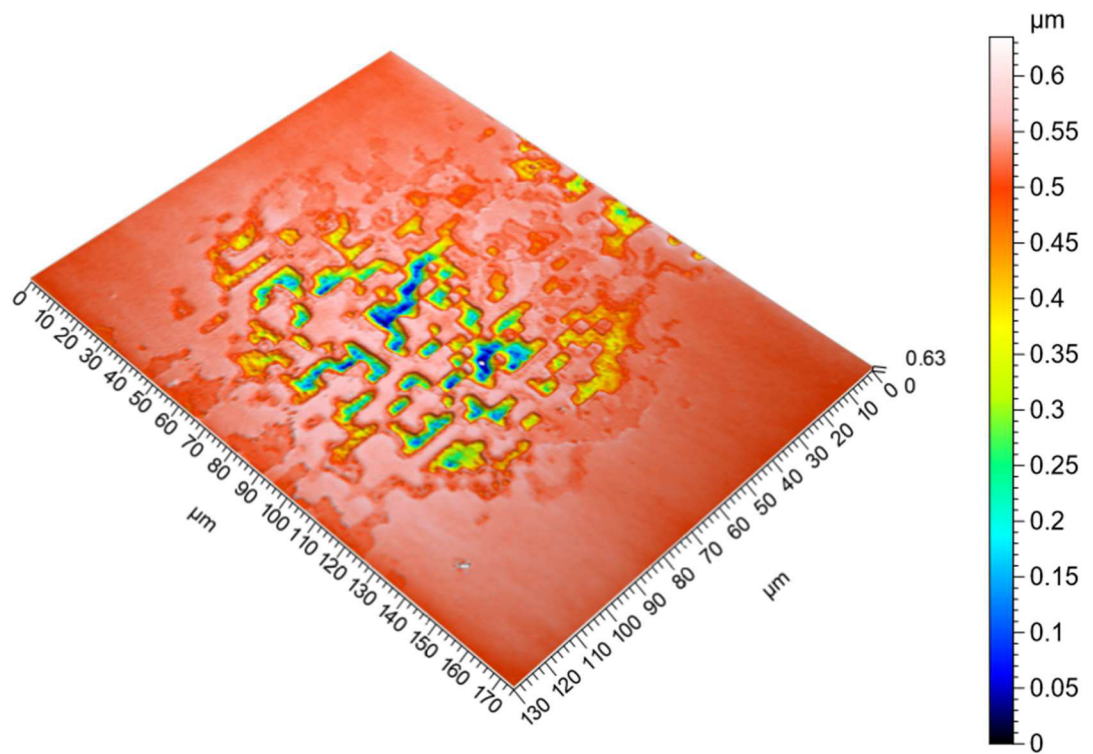


Abbildung 37: Projiziertes Phasengitter

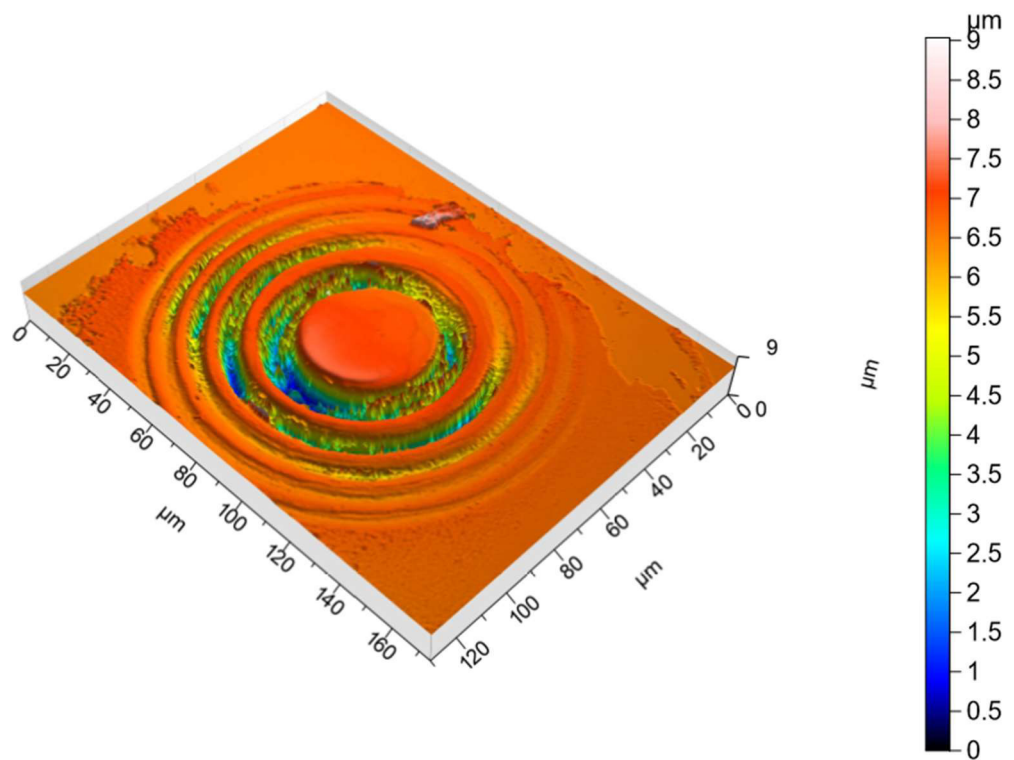


Abbildung 38: Projizierte Fresnel - Zonenplatte

In den Abbildungen 36 bis 38 fällt auf, dass nur im mittleren Bereich der Struktur ein homogener Abtrag erzeugt wurde, welcher zu den Rändern hin immer schwächer wird. Der Grund dafür ist, dass das räumliche Strahlprofil kein idealer Top-Hat ist, sondern nur einen homogenen Intensitätsbereich von ca. 2x2 mm aufweist, außerhalb fällt die Intensität mit steigendem Abstand stark ab. Die erzeugten Masken sind hingegen 4x4 mm groß, somit wird nicht der ganze Bereich homogen abgebildet, sondern nur der mittlere Teil, wo mit dem Intensitätsplateau die Maske beleuchtet wird und die Strukturiefen nach außen hin immer kleiner werden [12]. Das Ergebnis ist somit maskenseitig sehr gut, da die Bereiche, in denen der Strahl abgebildet werden sollte, durchstrukturiert sind und die Bereiche, die ausgeblendet werden sollten, ähnlich der Werkstückoberfläche sind. Somit wurde hier kein Abtrag erzielt. Besonderer Wert wurde auf die Kantenqualität der abgebildeten Strukturen gelegt, welche den Anforderungen gerecht wurde.

6 Zusammenfassung

Die verwendeten Materialien sind sehr spröde und haben eine hohe Bandlücke, wodurch sehr kleine Prozessfenster für die Strukturierung entstehen, da einerseits eine genügend hohe Fluenz und Intensität auf das Material treffen müssen, um durchgängige Abträge erzeugen zu können, andererseits jedoch nicht zu hoch, um nicht durch zu hohe Drücke des erzeugten Plasmas das Material zum Ausplatzen an den Randbereichen zu bringen. Aufgrund der starken Inkubationseffekte muss beim mehrfachen Überfahren darauf geachtet werden, dass sich das Absorptionsverhalten mit jeder Überfahrt stark ändert und somit auch das Abtragsverhalten sehr stark variiert. Generell scheint es so, dass die Prozessfenster kleiner werden, je mehr Überfahrten man das Material aussetzt, was Abbildung 11 zeigt, da hier mit einer Überfahrt ein sehr großes Spektrum an Abtragsbreiten mit guter Kanten- und Strukturqualität im Gegensatz zu den Abtragsvarianten mit mehreren Überfahrten realisiert werden konnte. Wenn breitere Strukturen erzeugt werden müssen, als es mit einer Überfahrt möglich ist, so ist eine Möglichkeit diese mit 2 oder mehr zueinander versetzten Überfahrten zu realisieren, indem man den Versatz so wählt, dass sich die Bereiche, in denen bei einer Überfahrt nur Inkubationseffekte entstehen, überlappen. Auf diese Art sind beliebig breite Strukturbreiten erzeugbar. Jedoch ist bei dieser Variante zu beachten, dass sich Debris auf der Probe ansammelt, was während des Prozesses unter Umständen zu einem besseren Einkoppeln der Strahlung in das Material führt, aufgrund seiner niedrigeren Abtragsschwelle und Ausplatzungen entstehen oder nur das Debris teilweise abgetragen wird und die darunterliegende Oberfläche nicht strukturiert ist, was auf die Größe des entstandenen Debris ankommt. Diesen Effekt kann man minimieren, indem man das Material fixiert und einen Gasstrom, z.B. mit Hilfe einer Crossjetdüse, über die Oberfläche strömen lässt, welcher das Debris wegträgt, bevor es auf der Oberfläche anhaftet. Da bei der Strukturierung die Kantenqualität von großer Bedeutung ist, kann man zunächst die Umrandung der Struktur erzeugen, da diese im weiteren Verlauf als Ausplatzungsstop dient und danach erst den innenliegenden Bereich füllen. Nach abgeschlossener Strukturierung muss die Maske gereinigt werden, bevor sie eingesetzt wird, dazu hat sich Celluloseacetat als vorteilhaft erwiesen, da auf diese Weise nicht über die Maske gewischt wird, wie z.B. bei der Reinigung mit Tüchern, woraufhin sie mit Kratzern beschädigt oder Schwingungen ausgesetzt wird, wodurch sie durchreißen oder stark ausplatzen kann, wie z.B. in einem Ultraschallbad mit Alkohol.

7 Ausblick

Die Materialien Magnesiumfluorid und Lithiumfluorid können aufgrund ihrer hohen Bandlücken ebenfalls als optische Bauelemente im Bereich der UV-Strahlung eingesetzt werden. Im Anhang ist deutlich erkennbar, dass Magnesiumfluorid ein ähnliches Abtragsverhalten aufweist wie Calciumfluorid. Beim Lithiumfluorid hingegen stellen die Risse entlang der Gitterebenen ein großes Problem dar, welches eventuell durch eine andere Herangehensweise in der Strukturierung gelöst werden könnte, indem man das Material weiterhin mit 2 Überfahrten strukturiert, jedoch die Fluenzen der Überfahrten unterschiedlich gestaltet. So könnte man mit der ersten Überfahrt nur Inkubationseffekte im Material erzeugen und mit der zweiten Überfahrt einen Abtrag generieren, welcher mit deutlich weniger Fluenz erzeugt werden kann. Somit entsteht weniger Plasmadruck beim Abtrag und das Material reißt nicht auf.

Die Vergrößerung der Grabenbreiten wurde in dieser Arbeit mit einem Versatz von 2 Linien zueinander erzeugt und variiert. Eine andere Möglichkeit wäre, das Werkstück nicht im Fokus zu strukturieren, sondern außerhalb des Fokus und zum Ausgleich der dadurch entstehenden Intensitäts- und Fluenzminderung eine höhere Leistung zu verwenden. Auf diese Weise vergrößert sich die bestrahlte Fläche und der Strukturquerschnitt wird größer, was den Vorteil haben könnte, dass nur eine Überfahrt zur Strukturierung benötigt wird. Dadurch sinkt die Bearbeitungszeit zur Herstellung einer Maske, aber die Stabilität des Prozesses und die Größe des Prozessfensters steigen. Proben, die auf diese Weise hergestellt werden, haben jedoch eventuell den Nachteil, dass sie an den Rändern der Strukturen große Inkubationszonen aufweisen, da hierbei das Strahlprofil an den Rändern stark abflacht und keine zweite Überfahrt den inkubierten Bereich abträgt.

Generell sollten die Masken einem Langzeittest unterzogen werden, bei dem untersucht wird, ob die Bereiche mit Inkubation an den Rändern der Strukturen bei langer Zeit im Einsatz sukzessive abgetragen werden oder sich Modifikationen des Substratmaterials bilden.

Literatur

- [1] Prof. Dr.-Ing. Dost, Gerd, Vorlesungsunterlagen und Aufzeichnungen Mikrosystemtechnik
Hochschule Mittweida, Stand 2016

- [2] Datenblatt Pharos 15-1000-PP

- [3] S.S. Mao, Fabien Qu´er´e, St´ephane Guizard, X. L. Mao, R. E. Russo, Guillaume Petite, Philippe Martin: “ Dynamics of Femtosecond Laser Interactions with Dielectrics“

- [4] C.B.Schaffer, A.Brodeur, E.Mazur: “Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses”; Harvard University

- [5] X. Jing, et. al., Modeling validity of femtosecond laser breakdown in wide bandgap dielectrics, Applied Surface Science 258 (2012), 4741-4749

- [6] Knebel, Fabian: „Grundlagenuntersuchungen an dielektrischen Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer“
Laserinstitut Hochschule Mittweida, 2017

- [7] www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/.../02_2-Grundlagen.pdf?... Verfügbar am 16.12. 13:10 Uhr

- [8] A. Rosenfeld, et. Al., Ultrashort-laser-pulse damage threshold of transparent materials and the role of incubation, Appl. Phys. A 69 (1999), 373-376


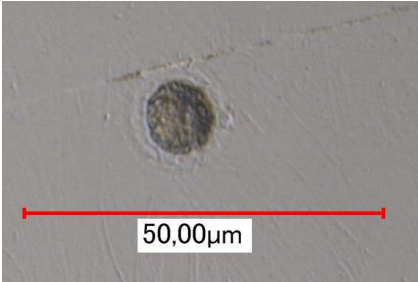


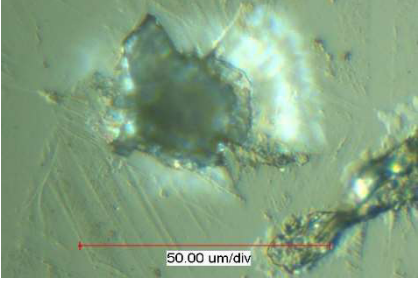
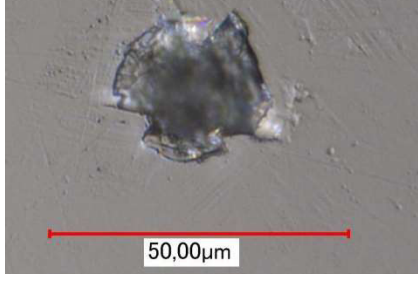
-
- [9] Dezhi Tan, Kaniyarakkal N. Sharafudeen, Yuanzheng Yue, Jianrong Qiu: „Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications“
- [10] OXAPA GmbH MgF₂, CaF₂, BaF₂, LiF: VUV-, VIS-, IR- Grades
- [11] J.M.Liu: “Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes”; Optic Letters / Vol. 7, No. 5; 1982
- [12] Persönliches Gespräch mit M.Sc. Sebastian Büttner, LHM, Mittweida, den 18.12.2017, 17:00 – 17:30 Uhr

Anlagen

Anhang A: Übersicht der Schwellwertermittlung..... A-I

Anhang A: Übersicht Schwellwertermittlung

Tabelle 9: Bilder Abtragsuntersuchungen Calciumfluorid

Abtrag mit Fluenz $H = 25,58 \text{ J/cm}^2$	Abtrag mit Fluenz $H = 13,85 \text{ J/cm}^2$	Pulsanzahl
		1
		2
Abtrag mit Fluenz $H = 3,25 \text{ J/cm}^2$	Abtrag mit Fluenz $H = 13,85 \text{ J/cm}^2$	Pulsanzahl
		4

Anhang A: Übersicht Schwellwertermittlung

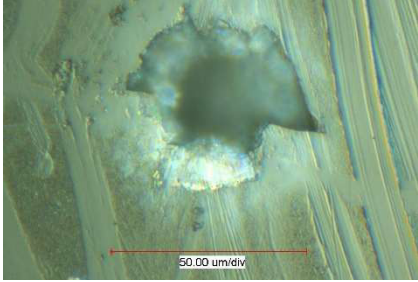
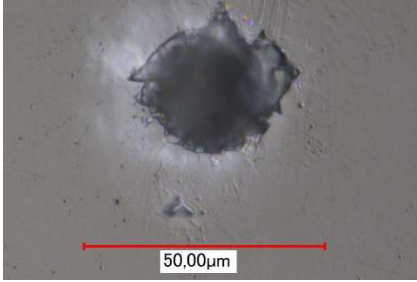
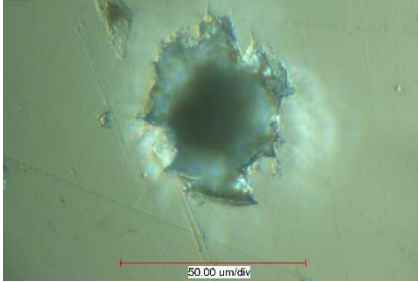
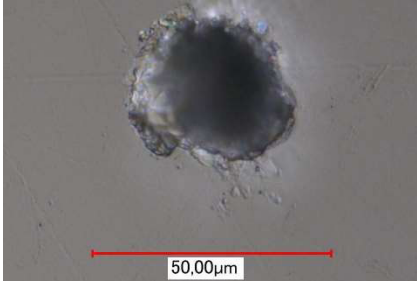
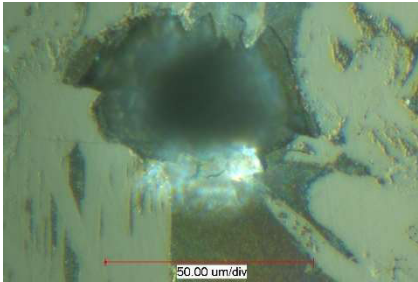
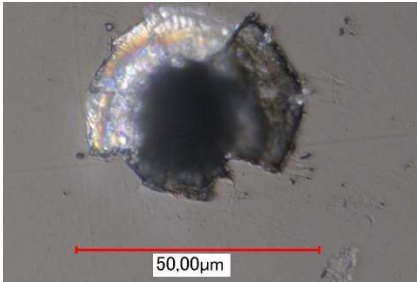
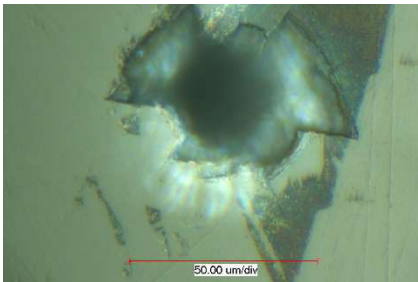
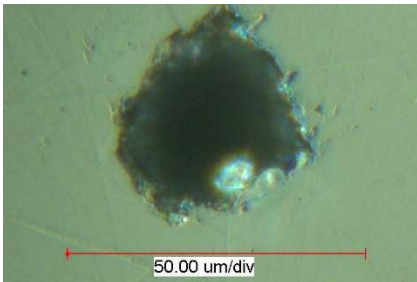
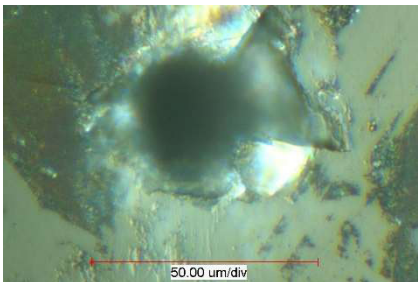
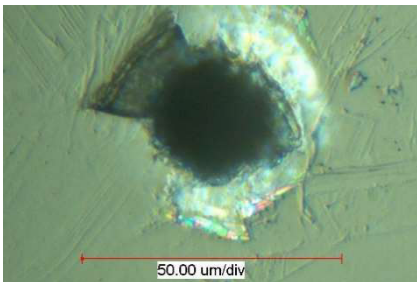

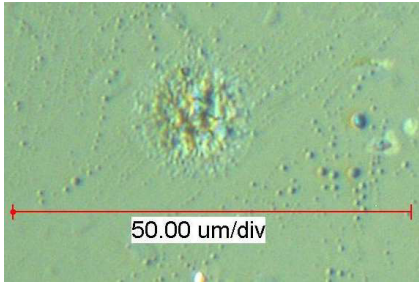

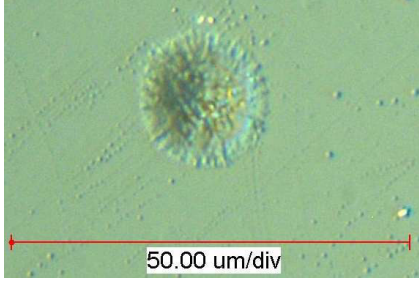
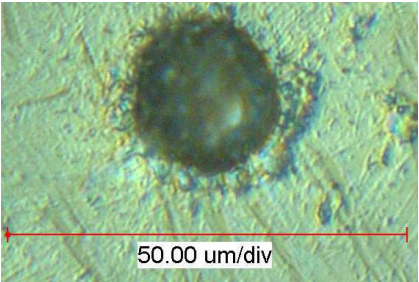
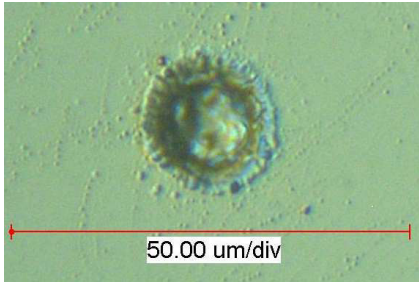
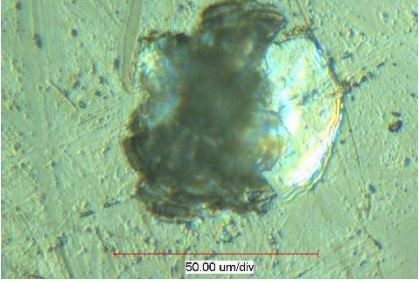
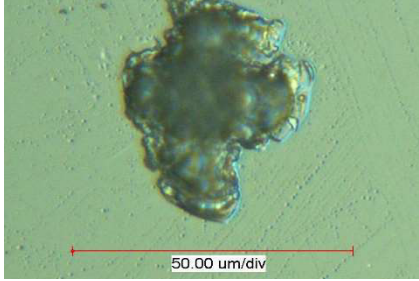
		8
		16
		32
		64
		128

Tabelle 10: Bilder Abtragsuntersuchungen Magnesiumfluorid

Abtrag mit Fluenz $H = 25,58 \text{ J/cm}^2$	Abtrag mit Fluenz $H = 13,85 \text{ J/cm}^2$	Pulsanzahl
		1
		2
Abtrag mit Fluenz $H = 13,85 \text{ J/cm}^2$	Abtrag mit Fluenz $H = 3,25 \text{ J/cm}^2$	Pulsanzahl
		4
		8

Anhang A: Übersicht Schwellwertermittlung

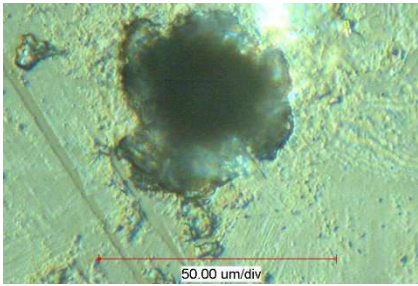
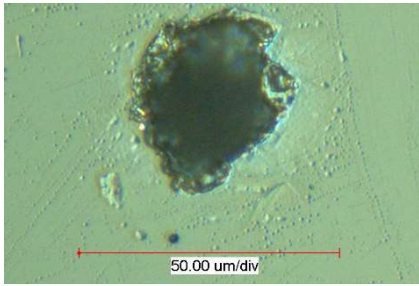
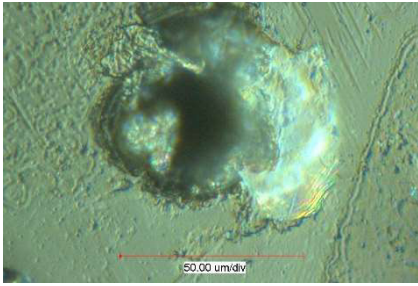
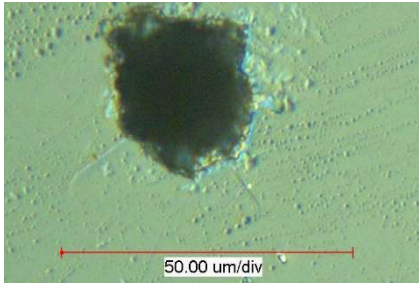
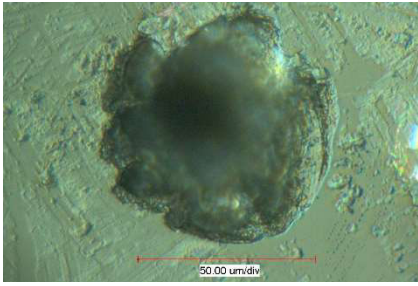
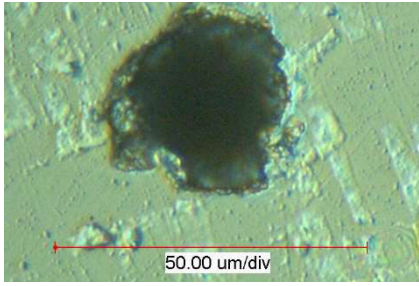
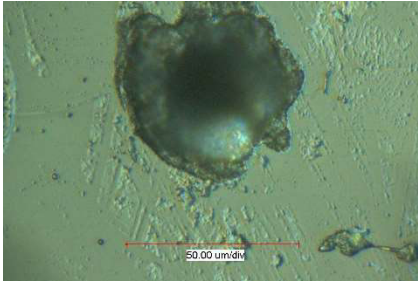
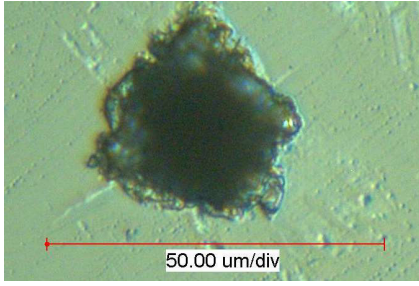
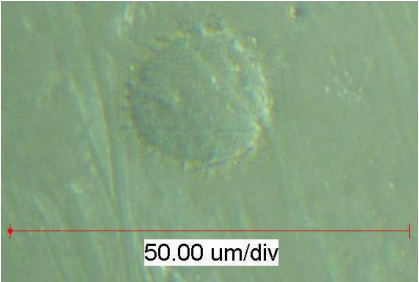
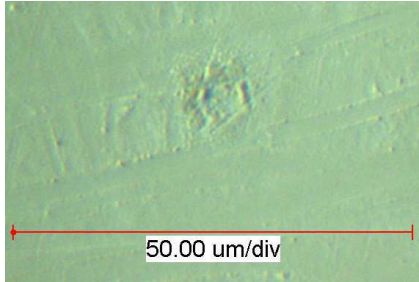

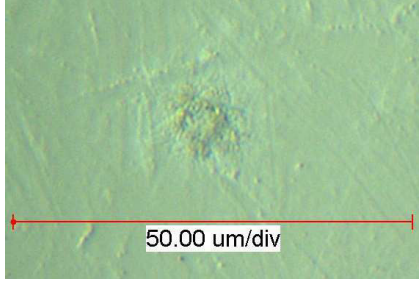
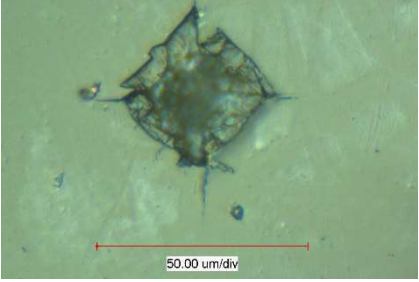
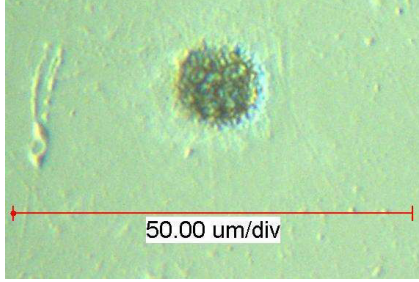

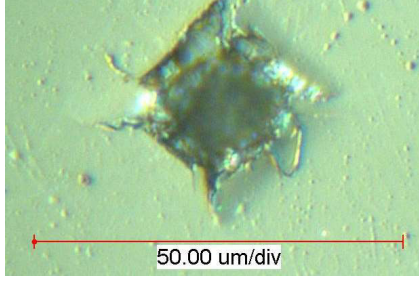
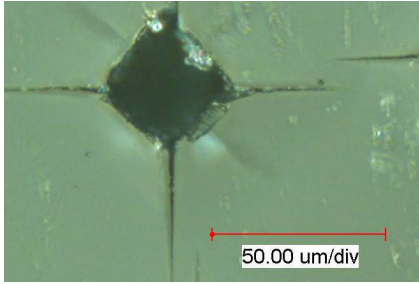
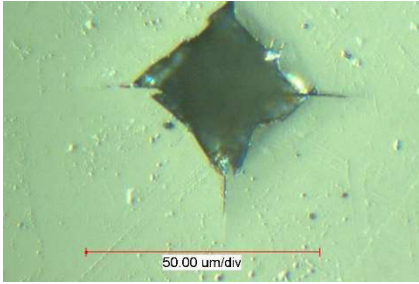
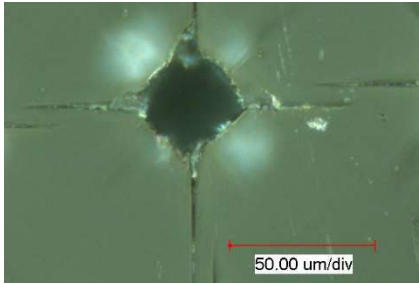
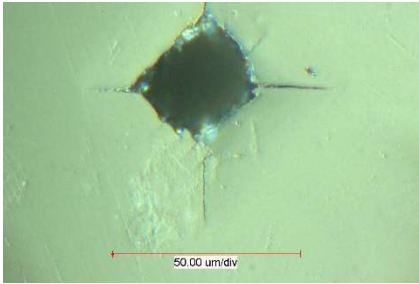
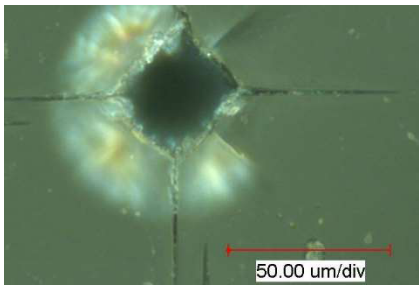
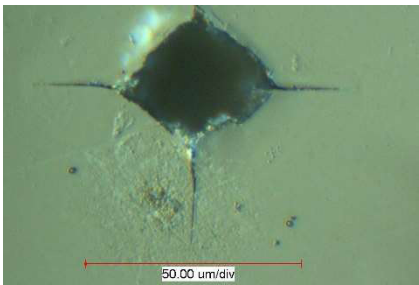
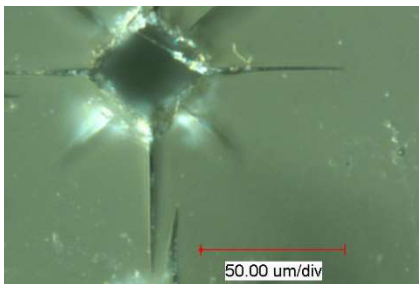
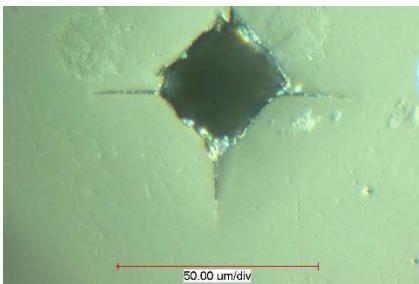
 <p>50.00 um/div</p>	 <p>50.00 um/div</p>	16
 <p>50.00 um/div</p>	 <p>50.00 um/div</p>	32
 <p>50.00 um/div</p>	 <p>50.00 um/div</p>	64
 <p>50.00 um/div</p>	 <p>50.00 um/div</p>	128

Tabelle 11: Bilder Abtragsuntersuchungen Lithiumfluorid

Abtrag mit Fluenz $H = 25,58 \text{ J/cm}^2$	Abtrag mit Fluenz $H = 13,85 \text{ J/cm}^2$	Pulsanzahl
		1
		2
Abtrag mit Fluenz $H = 13,85 \text{ J/cm}^2$	Abtrag mit Fluenz $H = 3,25 \text{ J/cm}^2$	Pulsanzahl
		4
		8

Anhang A: Übersicht Schwellwertermittlung

		16
		32
		64
		128

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 08.01.2018

Fabian Knebel