

René Bertram

Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien

eingereicht als

Diplomarbeit

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich

Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida, 2009

René Bertram

Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien

eingereicht als

Diplomarbeit

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich

Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida, 2009

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

Zweitprüfer: Dipl.-Ing.(FH) F. Hähnel

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bertram, René: Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien. - 2009. - 99 S.
Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik,
Diplomarbeit, 2009

Kurzreferat

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit ausgewählter Materialien mittels einer Laserwellenlänge von 157 nm durchgeführt werden. Durch Grundlagenuntersuchungen sind dabei zunächst die jeweilige Abtragsschwelle, die Abtragsrate in Abhängigkeit der Fluenz sowie eventuelle Beziehungen zwischen den Bearbeitungsparametern wie der Laserfrequenz und der Strukturqualität wie beispielsweise die Rauigkeit der ablatierten Bereiche oder Ausplatzungen an Kanten zu ermitteln.

Des Weiteren werden Inkubationserscheinungen untersucht und deren Einfluss auf den Materialabtrag geklärt.

Die hierbei erlangten Erkenntnisse sollen im Anschluss als Basis für die Fertigung von Bohrungen und komplexer Geometrien dienen und ein Einstellen der gewünschten Strukturtiefe mittels der Bearbeitungsparameter ermöglichen.

Die ausgewählten Materialien zeichnen sich durch ihre hohe Transparenz über den Bereich der VIS-Strahlung bis zu Wellenlängen von 248 nm oder sogar 193 nm aus, was den Einsatz einer VUV-Laseranlage, wie sie hier verwendet wurde, motiviert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung.....	3
3 Stand der Technik.....	4
3.1 Mikrostrukturierung von Gläsern und optischen Kristallen	4
3.2 Alternativverfahren für die Mikrostrukturierung	5
3.3 Lasermikrostrukturierung.....	9
3.3.1 Strategie und Ergebnisse des Femtosekundenlasers	9
3.3.2 Fluorlasermikrostrukturierung	10
4 Vorstellen der verwendeten Laseranlage.....	12
4.1 Die Mikrobearbeitungsstation EX-157	12
4.2 Excimerlaser LPF 220i	13
4.3 Strahlführung und –formung	15
4.4 Substratpositionierungen.....	21
4.5 Anlagenbedienung	22
5 Spezifizierung der zu untersuchenden Materialien	23
5.1 Corning 7980.....	23
5.2 D263T	25
5.3 Kalziumfluorid.....	26
5.4 Magnesiumfluorid	27
5.5 Saphir.....	29
5.6 TOPAS 5013	30
6 Untersuchungen zur Strukturierung.....	32
6.1 Grundlagenuntersuchungen	32
6.1.1 Prinzipielle Verfahrensweise der Grundlagenuntersuchung	32
6.1.2 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Corning 7980.....	39
6.1.3 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für D263T	44
6.1.4 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Kalziumfluorid.....	48
6.1.5 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Magnesiumfluorid	52
6.1.6 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Saphir.....	56
6.1.7 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für TOPAS 5013	61

6.2	Versuche zur Erzeugung von Sackbohrungen.....	64
6.2.1	Prinzipielle Verfahrensweise zur Erzeugung von Sackbohrungen.....	64
6.2.2	Untersuchungsergebnisse der Bohrungsversuche.....	65
6.3	Erkundung von Inkubationseffekten in Kalzium- und Magnesiumfluorid	70
6.3.1	Begriffsklärung der „Inkubation	70
6.3.2	Untersuchungsergebnisse zur Inkubation	70
6.4	Erzeugung diffraktiver optischer Elemente	72
6.4.1	Begriffsklärung „diffraktives optisches Element.....	72
6.4.2	Vorgehen und Ergebnisse bei der Erzeugung von DOEs.....	73
6.5	Erzeugen von Demonstrationsstrukturen.....	76
6.5.1	Prinzipielle Verfahrensweise	76
6.5.2	Ergebnisse der Demonstrationsstrukturen	79
7	Zusammenfassung / Ausblick.....	83
	Abbildungsverzeichnis.....	84
	Tabellenverzeichnis.....	86
	Literaturverzeichnis.....	87
	Anlagen	90
	Erklärung zur selbständigen Anfertigung der Arbeit	99

Formelzeichen

P_{av}	mittlere Laserleistung
P_{max}	Pulsspitzenleistung
τ_H	Halbwertsbreite des Laserpulses
f_P	Laserpulswiederholfrequenz
Q	Laserpulsenergie
H	Fluenz
A	Fläche
β	Abbildungsmaßstab
I	Intensität
α	Absorptionskoeffizient
z	ablatierte Tiefe
s	Kantenlänge abgebildeter Projektionsmasken
H_S	Schwellfluenz
R_a	Oberflächenrauigkeit

Abkürzungsverzeichnis

VUV	Vakuum Ultra Violett
VIS	visuelles Spektrum elektromagnetischer Wellen
PTFE	Polytetrafluorethylen
EGY PGR	Energy constant mode partial gas refill – stabilisierter Laserbetriebsmodus mit teilweisem Gasaustausch
EGY NGR	Energy constant mode no gas refill – stabilisierter Laserbetriebsmodus ohne Gasaustausch
HV	high Voltage – Hochspannungslaserbetriebsmodus
CaF_2	Summenformel von Kalziumfluorid
TOPAS	thermoplastisches Olefin-Polymer amorpher Struktur
ÜLP	Pulsüberlappung
FE	Flächenelement
ÜF	Überfahrten / Anzahl abgetragener Schichten
REM	Raster Elektronen Mikroskop

1 Einleitung

Nachdem die stimulierte Emission von elektromagnetischer Strahlung bereits im Jahr 1916 durch Albert Einstein beschrieben, und damit auch die prinzipielle Möglichkeit der Verstärkung von Licht postuliert wurde, gelang es Theodore H. Maiman 1960 erstmals dieses Prinzip technisch umzusetzen. Neben dem von ihm entwickelten Rubinlaser als Vertreter der Festkörperlaser wurden bald Gaslaser und wenig später auch Farbstofflaser (1966) realisiert.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet wurde stetig vorangetrieben, so dass sich der Laser in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts in der Materialbearbeitung aufgrund seiner Vielseitigkeit (Schneiden, Schweißen, Bohren, Härten, ...) und der hohen Qualität der Erzeugnisse etablieren konnte.

Doch auch auf anderen Gebieten der Wissenschaft und Technik konnte diese Technologie in der Folge Fuß fassen und kann seit etlichen Jahren als feste Größe in der Messtechnik, der Medizin, der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik und sicher nicht zuletzt in der Militärtechnik betrachtet werden.

Als im ausgehenden 20. Jahrhundert eine zunehmende Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik einsetzte wurde damit auch ein neues Einsatzfeld für den Laser geschaffen: Die Laser-Mikrobearbeitung.

Bei der Ablation von Dielektrika wie z.B. technischen Gläsern oder auch Kalziumfluorid werden im Wesentlichen zwei Strategien verfolgt:

Zum einen kann durch Ultrakurzpulslaser eine so große Intensität der Laserstrahlung auf dem Substrat erreicht werden, dass der Ablationsprozess hauptsächlich von nichtlinearen Absorptionsmechanismen (Multiphotonenabsorption) getragen wird. Somit können Materialien mit großer Energiebandlücke und hoher Transparenz bis hinab ins ferne Ultraviolett bearbeitet werden.

Diese Systeme arbeiten in der Regel im Bereich des nahen Infrarots, woraus aber eine geringe Photonenenergie der Laserstrahlung resultiert. Die Entwicklung zielt zwar darauf ab, die sichtbare oder infrarote Strahlung der Kurzpulslaser in UV-Strahlung zu wandeln und im Nachgang zu verstärken. Jedoch sind noch keine auf diesem Prinzip beruhenden Strahlungsquellen mit Wellenlängen im VUV, also mit Photonenenergien größer als 6,2 eV realisiert worden.

Eine andere Möglichkeit solche Materialien großer Energiebandlücke zu bearbeiten ist es, Laserstrahlung sehr geringer Wellenlänge zu verwenden um den Wellenlängenbereich, in welchem diese Materialien hochtransparent sind, zu unterschreiten. Hierzu findet eine stetige Entwicklung von Strahlungsquellen statt. Ziel ist es, Lasermedien zu erkunden und technisch umzusetzen, deren charakteristische Laserwellenlänge möglichst klein ist.

Dies wird durch Excimerlaser erreicht, zu welchen auch der in dieser Diplomarbeit verwendete Fluorlaser mit einer Wellenlänge von 157 nm gezählt wird. Die von diesem Laser emittierte Strahlung weist eine Photonenenergie von 7,9 eV auf, was ihn für die Bearbeitung von Dielektrika prädestiniert.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll daher das Abtrags- und Strukturierungsverhalten solcher Stoffe bei einer Wellenlänge von 157 nm untersucht und optimiert werden.

2 Aufgabenstellung

Die Diplomarbeit mit dem Thema „Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien“ besteht aus folgenden Aufgabenbereichen:

- Literaturrecherche zur Fluorlaser-Mikrobearbeitung und der Wechselwirkung von Fluorlaserpulsen mit Festkörpern
- Untersuchung des Ablationsprozesses an ausgewählten Materialien, insbesondere Quarzglas, Kalziumfluorid, Saphir und dem Kunststoff TOPAS:
Bestimmung der Ablationsschwellen und –raten in Abhängigkeit der Energiefluenz und der Pulszahl beim Einbringen von Bohrungen sowie vom Puls-zu-Pulsabstand bei der flächenhaften Strukturierung
- Einbringen von Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser und Tiefen, Bestimmung der Aspektverhältnisse.
Optimierung der Form und Qualität der Bohrungen
- Untersuchungen zu Inkubationserscheinungen an Magnesium- und Kalziumfluorid:
Ermittlung der Schwellfluenzen für die Materialmodifizierung und den Materialabtrag
- Untersuchung zur Erzeugung von diffraktiven optischen Bauelementen bzw. Mikrolinsen an Quarzglas und Kalziumfluorid
- Erzeugung von Demonstrationsstrukturen

3 Stand der Technik

3.1 Mikrostrukturierung von Gläsern und optischen Kristallen

Da technische Gläser eine Werkstoffklasse sehr vielfältiger Zusammensetzungen und damit auch Eigenschaften darstellen, ist es dem Anwender möglich die gewünschten Besonderheiten des Materials bereits im Herstellungsprozess festzulegen [1].

Herausragende Eigenschaften dieser Werkstoffe sind die hohe chemische Beständigkeit gegen verschiedenste Medien, Wellenlängenbereiche hoher Transparenz, hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit oder aber auch gezielt leitend, Biokompatibilität bis -aktivität und hohe Alterungsbeständigkeit. Hieraus resultieren auch die breit gefächerten Einsatzgebiete wie Filter für die Medizintechnik, Gitter und Lochraster, Elektrodenplatten für Kopfhörer, optische Bauelemente, chemische Reaktoren, Halterungen für elektronische Bauteile, Analysesysteme, Beschichtungsmasken für Bedampfungsprozesse, Komponenten für Displays, Gassensoren oder Beschleunigungssensoren [2].

Die in dieser Diplomarbeit untersuchten optischen Kristalle zeichnen sich besonders durch ihre große Energiebandlücke und damit ihrer hohen Transparenz für elektromagnetische Wellen des VIS-Bereiches bis hinab in den Bereich des fernen UV aus.

Durch die Strukturierung von Oberflächen können Bauteile gefertigt werden, welche nicht nur im optischen Geräte- und Instrumentenbau eingesetzt werden, sondern ebenso in Wissenschaft und Forschung Einsatz finden.

Dies kann im einfachen Fall für Glasmaßstäbe oder Mess- und Prüfskalen in der Messtechnik gelten, ebenso aber auch für refraktive und diffraktive Oberflächenstrukturen in der Lasertechnik z.B. zur Strahlformung, -abbildung oder -homogenisierung.

Unter Mikrostrukturierung soll in der folgenden Arbeit das Einbringen von Oberflächen- aber auch Volumengeometrien mit Auflösungen im μm -Bereich und Ausdehnungen von nicht mehr als wenigen 100 Mikrometern verstanden werden.

3.2 Alternativverfahren für die Mikrostrukturierung

Mit der Lasermikromaterialbearbeitung konkurrierende und diese ergänzende Verfahren können in mechanische und chemische Verfahren unterteilt werden. Die Photolithographie stellt dabei eine Kombination aus beiden Methoden dar.

Während sich die mechanischen Verfahren in die Gruppen Schleifen/Fräsen/Bohren, Ultraschallbearbeitung, Partikelstrahlen und Wasserstrahlen untergliedern, können die chemischen Verfahren in Nass- und Trockenätzen kategorisiert werden [3, S34 ff].

Mechanische Mikrostrukturierung:

Das Schleifen von hartspröden Materialien wie Gläsern und optischen Kristallen ist prinzipiell mit Scheiben, Drähten und Stiften möglich, wodurch verschiedenste Geometrien realisiert werden können. Besondere Anforderungen werden dabei an die Drehzahl, die Positioniergenauigkeit sowie die Diamantkorngößen gestellt. So zieht die Reduzierung der Schleifscheibendicke eine drastische Verringerung der Korngröße mit sich. Mit Schleifstiften, welche mit Durchmessern bis hinab zu 30 µm realisierbar sind und Korngrößen von mindestens 0,5 µm, können minimale Details von 100 µm Größe und Aspektverhältnissen von bis zu 20 erreicht werden. Schleifscheiben können bei selbem Aspektverhältnis sogar kleinste Details von 20 µm Ausmaß erzeugen. So werden z.B. beim Dicing Prozess (Halbleitertechnologie) Schleifnuten von 15 µm Breite und 500 µm Tiefe realisiert [3, S.42 f, 61].

Bei den spanabhebenden Mikrobearbeitungsverfahren wie Hobeln kommen Werkzeuge aus monokristallinem Diamant oder Hartmetall zum Einsatz wobei durch diese Techniken auch mehrfache und geneigte Strukturen einfach umzusetzen sind. Auf diese Weise werden bei hoher Oberflächengüte insbesondere mikrofluidische Komponenten für die Analyse-, Bio- und Medizintechnik sowie Abformwerkzeuge hergestellt [4].

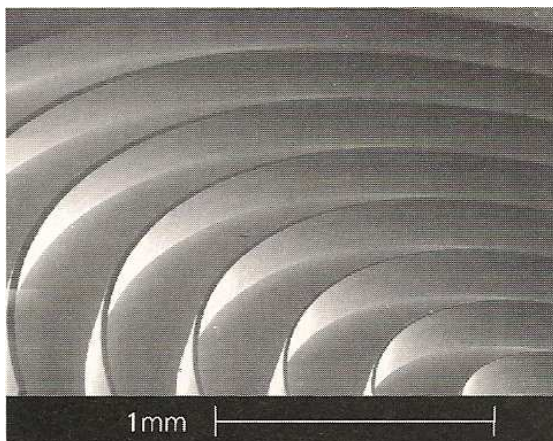


Abb. 3.1: Mikrogehobelttes Abformwerkzeug für Mikrofluidische Systeme [5].

Ein weiteres mechanisches Verfahren ist die Ultraschallbearbeitung, bei welcher sich lose Körner in einer Suspension im Spalt zwischen Werkzeug und Substrat befinden. Die Körner weisen dabei eine Größe von 5 μm bis 80 μm auf.

Durch die longitudinale Schwingung des Werkzeuges stoßen diese nun auf das Substrat wodurch Risse im Material entstehen. Aufgrund von Ausplatzungen kommt es so zum Abtrag des Werkstoffes. Die Schwingungsfrequenz beträgt bei einer Amplitude von 10 μm bis 40 μm etwa 20 kHz. Auf diese Weise können Strukturen mit minimalen Abmessungen von 250 μm und einem Aspektverhältnis von 10 gefertigt werden.

Als Nachteile dieser Technologie ist der Werkzeugverschleiß zu beachten [3, S.46. f, 61].

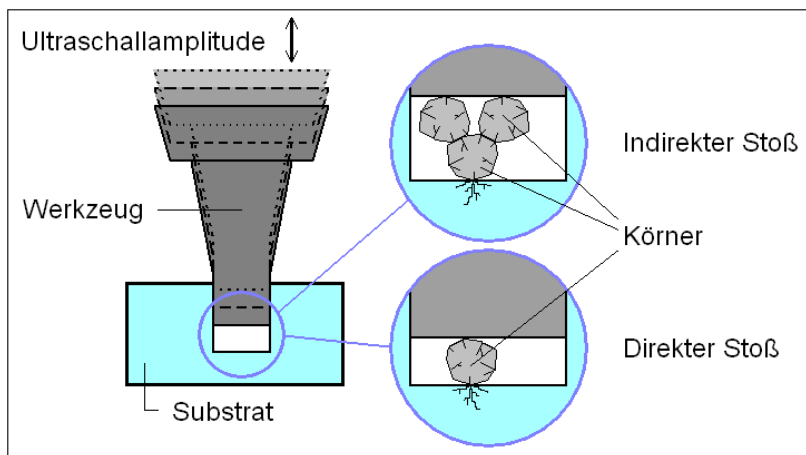


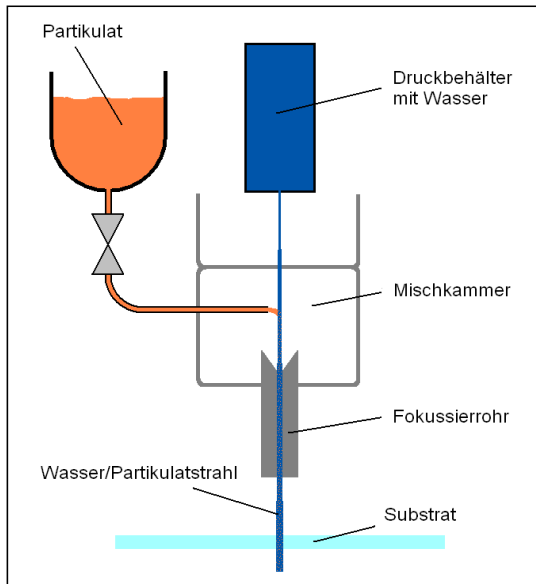
Abb. 3.2: Prinzip der Ultraschallbearbeitung.

Ein anderes Vorgehen, bei dem der Materialabtrag durch Partikelstöße herbeigeführt wird, ist das Partikelstrahlen. Dabei werden zumeist Korundkörner mit einer Größe zwischen 10 μm und 80 μm durch Luftdruck von 2 bar bis 8 bar auf bis zu 200 m/s beschleunigt. Beim Aufprall auf den Werkstoff setzt wie oben beschrieben ein Materialabtrag ein.

Unterschieden wird bei dieser Methode in das Freistrahlen, wobei der Partikelstrahl direkt auf das zu strukturierende Objekt gerichtet ist, und in das Maskenverfahren. Hier wird zunächst eine Substratmaske aufgebracht, wodurch nur die nicht maskierten Bereiche abgetragen werden.

Während sich das Freistrahlen durch geringen Wartungsaufwand, einer Eignung für unterschiedlichste Materialien, geringerer thermischer Belastung des Werkstücks und höheren Abtragsraten als beim Trockenätzen auszeichnet, ermöglicht das Maskenstrahlverfahren zudem komplexere Strukturen. Allerdings sind hier die Investitionskosten deutlich höher als beim Freistrahlen.

Beim Partikelstrahlen werden nur Aspektverhältnisse von 3 bei Details einer Größe von 100 μm erreicht. [3, S.48 ff, 61]



Eine weitere Möglichkeit Glas zu strukturieren ist das Wasserstrahlen, wobei ein, optional auch partikelhaltiger, Wasserstrahl mittels einer Düse auf die Substratoberfläche gerichtet wird. Der Druck kann dabei bis zu 400 bar betragen, wodurch die Partikel Relativgeschwindigkeiten von bis zu 900 m/s erreichen [3, S. 51].

Abb. 3.3: Prinzip des Abrasivwasserstrahlens.

Chemische Mikrobearbeitung:

Da Glas ein amorpher Stoff ist, erfolgt der Ätzabtrag hier beim nasschemischen Ätzen von der Oberfläche beginnend in alle Richtungen gleichmäßig. Bei optischen Kristallen ist hingegen die Anisotropie der Ätzrate zu beachten, da es sich bei ihnen um Einkristalle, und damit um eine bestimmte Kristallorientierung handelt.

Zum Nassätzen sind mehrere vorbereitende Prozessschritte nötig. So wird anfangs eine Metallschicht aufgebracht, welche im Anschluss mit einem fotoempfindlichen Lack beschichtet wird. Dieser wird im Nachgang belichtet, woraufhin er durch Ätzen entwickelt wird. Somit befindet sich die Struktur bereits in der Lackschicht und wird nun z. B. durch reaktives Ionenätzen in die Lackschicht übertragen.

Nachdem die verbliebene Lackschicht entfernt wurde, wird das eigentliche Ätzen der Struktur in das Werkstück durchgeführt, woraufhin noch die Metallschicht entfernt werden muss.

[3, S. 36]

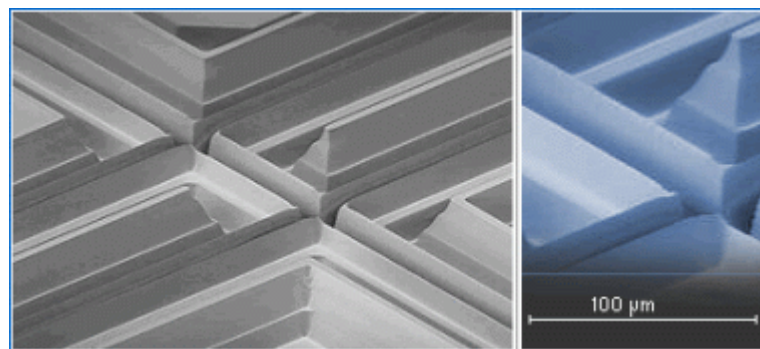


Abb. 3.4: 12-stufige Mikrostruktur [6].

Beim Trockenätzen wird prinzipiell in ein Ätzen mit thermalisierten reaktiven Teilchen und in ein Ätzen mit energetischen Teilchen unterschieden. Dabei werden die Bestandteile des abzutragenden Materials in die Gasphase überführt.

Um das zu erreichen müssen die Bindungsenergien zwischen den Atomen oder Atomgruppen überwunden werden, was z.B. durch rein thermische Anregung möglich wäre. Dies ist für die Herstellung mikrotechnischer Strukturen aufgrund der geforderten hohen Ortsauflösung jedoch nicht geeignet, so dass andere, kombinierte Formen des Energieeintrages zum Einsatz kommen müssen.

Zu den Ätzverfahren mit thermalisierten reaktiven Teilchen werden das reaktive Gasätzen, das Plasmaätzen und auch das photogestützte Ätzen inklusive dem direktschreibenden Laserätzen gezählt.

Beim Ätzen mit reaktiven Gasen wird die Ortsauflösung mit lithographischen Masken erreicht, welche an den abgedeckten Substratgebieten eine chemische Reaktion verhindern. In den freiliegenden Bereichen hingegen bilden der abzutragende Festkörper und Bestandteile des Ätzgases durch chemische Reaktion gasförmige Produkte.

Für eine akzeptable Reaktionsgeschwindigkeit muss entweder eine hohe Temperatur vorherrschen, was bei einer Verwendung von oftmals organischen Photolacken nur bedingt möglich ist, oder eine zusätzliche Aktivierung der Reaktion stattfinden. Dies kann beispielsweise durch elektromagnetische Strahlung erfolgen, deren Intensität für einen signifikanten Einfluss auf die Ätzrate jedoch ausreichend hoch sein muss. Daher kommt in der Regel Laserstrahlung zum Einsatz. Jedoch ist dies auch mit Elektronenstrahlen möglich, welche aufgrund ihrer im Verhältnis zu den Festkörperatomen sehr geringen Masse keinen direkten Materialabtrag bewirken. Doch sind sie bei ausreichend hohen Energien in der Lage hochreaktive Ionen der Festkörperbestandteile zu erzeugen und damit ein sehr effektives Umwandeln des Festkörpers mittels Ätzgas in gasförmige Produkte zu erreichen.

Bei den Ätzprozessen mittels energetischer Teilchen wird die Energie über Stoßprozesse in den Festkörper eingekoppelt. Hierbei werden mittels ausgelöster Gitterschwingungen einige oberflächennahe Atome oder Atomgruppen soweit elongiert, dass sie aus der Festkörperoberfläche ausreißen. Dabei handelt es sich um den so genannten Sputterprozess. Ist der Raum der Erzeugung der ätzwirksamen Ionen von deren Wirkungsbereich auf dem Substrat räumlich und elektrisch entkoppelt spricht man von Ionenstrahlätzen. Auch können diese energetischen und reaktiven Prozesse wie beim reaktiven Ionenätzen und dem reaktiven Ionenstrahlätzen kombiniert werden, um die Ätzrate oder die Selektivität zu erhöhen. [5]

3.3 Lasermikrostrukturierung

3.3.1 Strategie und Ergebnisse des Femtosekundenlasers

Wie bereits in der Einleitung beschrieben liegt das Konzept des Femtosekundenlasers im Einbringen der Energie in das Material innerhalb weniger Femtosekunden. Eine fs entspricht dabei 10^{-15} s. Zur Veranschaulichung: Licht breitet sich in dieser Zeit im Vakuum etwa $0,3\text{ }\mu\text{m}$ aus. Infolge dieser ultrakurzen Pulse werden selbst bei vermeintlich geringen Pulsenergien im mJ-Bereich sehr hohe Spitzenleistungen erreicht. Da die im Material deponierte Energie aufgrund der kurzen dafür benötigten Zeit nahezu nicht durch Wärmediffusion in die Umgebung des Bearbeitungsortes abgeleitet wird, prägt sich hier praktisch keine wärmebeeinflusste Zone aus. Man spricht von einer kalten Bearbeitung. Aufgrund der geringen thermischen Belastung der Randbereiche der zu ablatierenden Gebiete, der guten Fokussierbarkeit und der hohen Intensitäten bietet sich dieses Prinzip für die Mikrobearbeitung von Materialien großer Energiebandlücke an.

Daher wurde im Jahr 2008 durch Herrn Manuel Pfeiffer an der Hochschule Mittweida eine Diplomarbeit zum Thema „Femtosekundenlaserstrukturierung von wide-bandgap-Materialien“ angefertigt.

Dabei zeigte sich, dass das Quarzglas Corning 7980 durchaus mit dem Femtosekundenlaser strukturierbar ist, jedoch ein sehr enges Parameterfenster eingehalten werden muss um übermäßiges Ausplatzen und Rissbildungen zu verhindern. Auch trat bei tiefen Strukturen jenseits der $100\text{ }\mu\text{m}$ starker Debris auf, welcher sich nicht durch eine Ultraschallbehandlung beseitigen lies. Kalziumfluorid erwies sich hingegen als nicht mittels Femtosekundenlaser strukturierbar. [7]

Damit stellt das in dieser Diplomarbeit behandelte Thema eine sinnvolle Ergänzung zu den hier angesprochenen Untersuchungen dar.

3.3.2 Fluorlasermikrostrukturierung

An der im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendeten Mikrobearbeitungsstation wurden bereits mehrere Themen bezüglich der Fluorlasermaterialbearbeitung behandelt. So wurde beispielsweise das Abtragsverhalten von Quarzglas SQ1, Kalziumfluorid, Pyrex®, Polytetrafluorethylen PTFE sowie Aluminiumoxid untersucht und charakterisiert.

Dabei zeigte sich, dass sich diese Materialien mit Ausnahme von Aluminiumoxid mittels 157 nm strukturieren lassen. Bei Kalziumfluorid wurden dabei deutliche Inkubationseffekte erkannt.

Ein weiteres Thema war die Erzeugung optisch wirkender Gitter. Hierzu wurden Gitterstrukturen mit Perioden von wenigen μm in Quarzglas sowie superharte Kohlenstoffschichten eingebracht. Die Strukturtiefe liegt bei der Kohlenstoffschicht bei etwa 400 nm, im Quarzglas ist sie tiefer. [8]

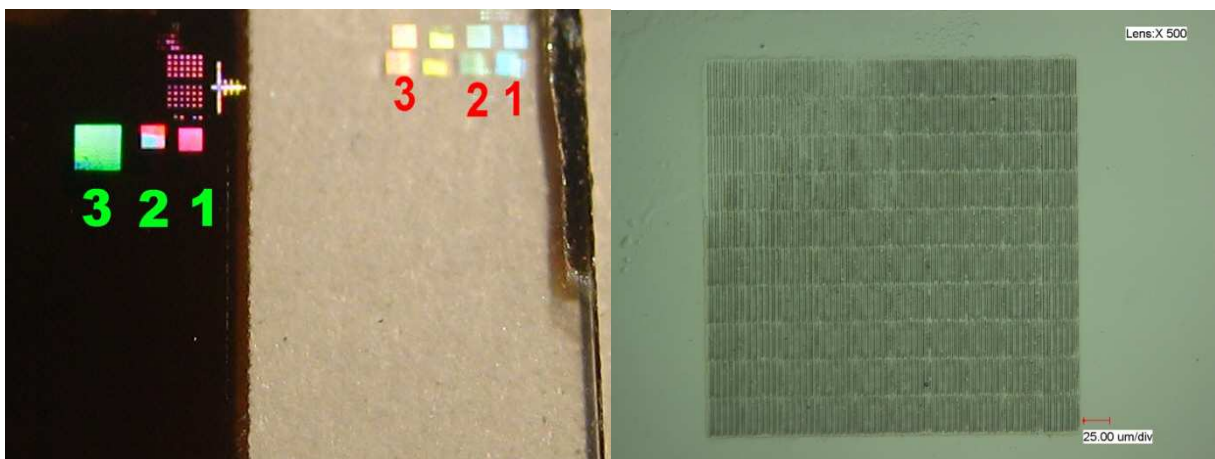


Abb. 3.5: links: Optisch wirkende Gitter in Quarzglas und ta-C, rechts: Vergrößerung des Strukturfeldes rot 3, Linienbreite 1,7 μm , Linienabstand 2 μm [8].

Mögliche Einsatzgebiete solcher Strukturen liegen in der Mikrobeschriftung optischer Komponenten, z. B. zum Schutz vor Nachahmung oder als Mikroskalen von Messmitteln, aber auch als Streugitter in der Messtechnik.

In die Materialien SQ1, Kalziumfluorid und PTFE wurden auch bereits Teststrukturen in Form eines Kreuzes eingebracht. Anhand dieser Strukturen konnten die Einflüsse der verschiedenen Laserparameter auf die Strukturqualität untersucht werden. [8]

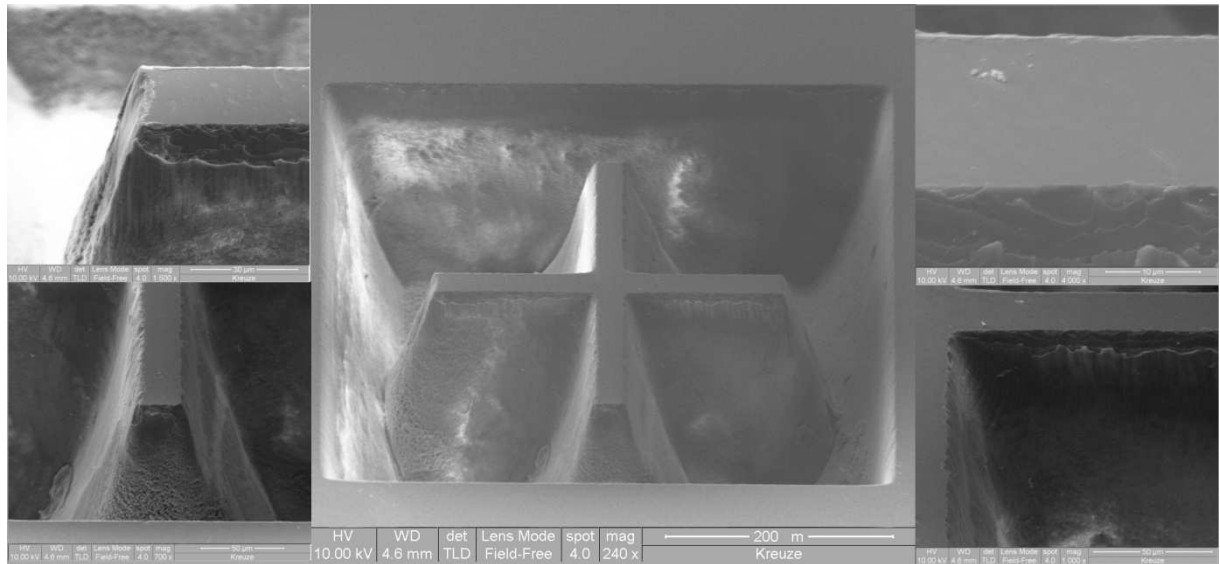


Abb. 3.6: In SQ1 eingebrachte Kreuzstrukturen [8].

Auch Untersuchungen zum Einbringen von Bohrungen in Glasfasern mit einem Durchmesser von etwa 100 μm wurden durchgeführt. Hierzu wurde der Selbststoppeffekt am 20 μm starken Metallkern genutzt. Dabei wurden Sackbohrungen mit 15 μm Eintritts- und 10 μm Enddurchmesser erreicht. [8]

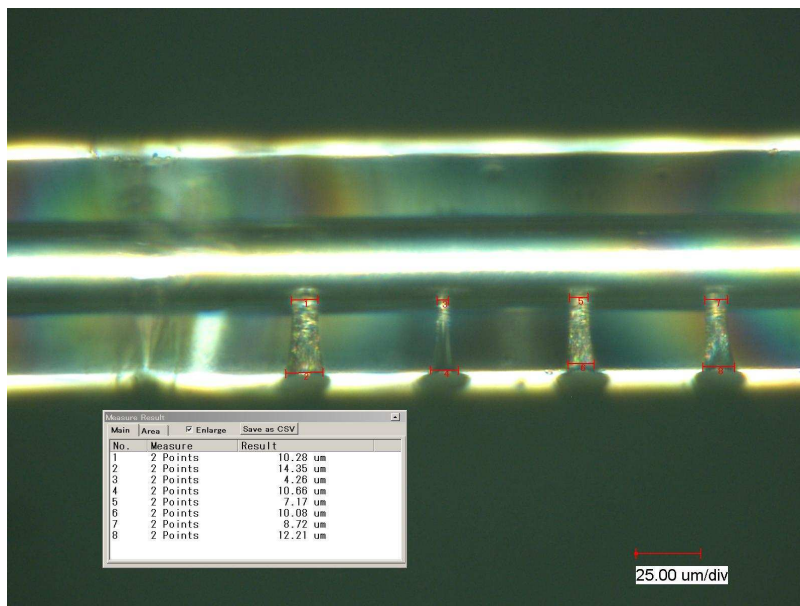


Abb. 3.7:

Lichtmikroskopische Aufnahme der in die Glasfaser eingebrachten Bohrungen [8].

4 Vorstellen der verwendeten Laseranlage

4.1 Die Mikrobearbeitungsstation EX-157

Die bei der Durchführung dieser Diplomarbeit zum Einsatz kommende Mikrobearbeitungsstation wurde von Herrn Falk Hähnel im Jahr 2006 im Rahmen der Diplomarbeit „Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser“ in Zusammenarbeit mit der Firma 3D-Micromac AG installiert und in Betrieb genommen. Die Anlage wurde von Herrn Hähnel bezüglich ihrer Parameter untersucht und spezifiziert. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für ein Arbeiten mit der Anlage und wurden mir zur Verfügung gestellt.

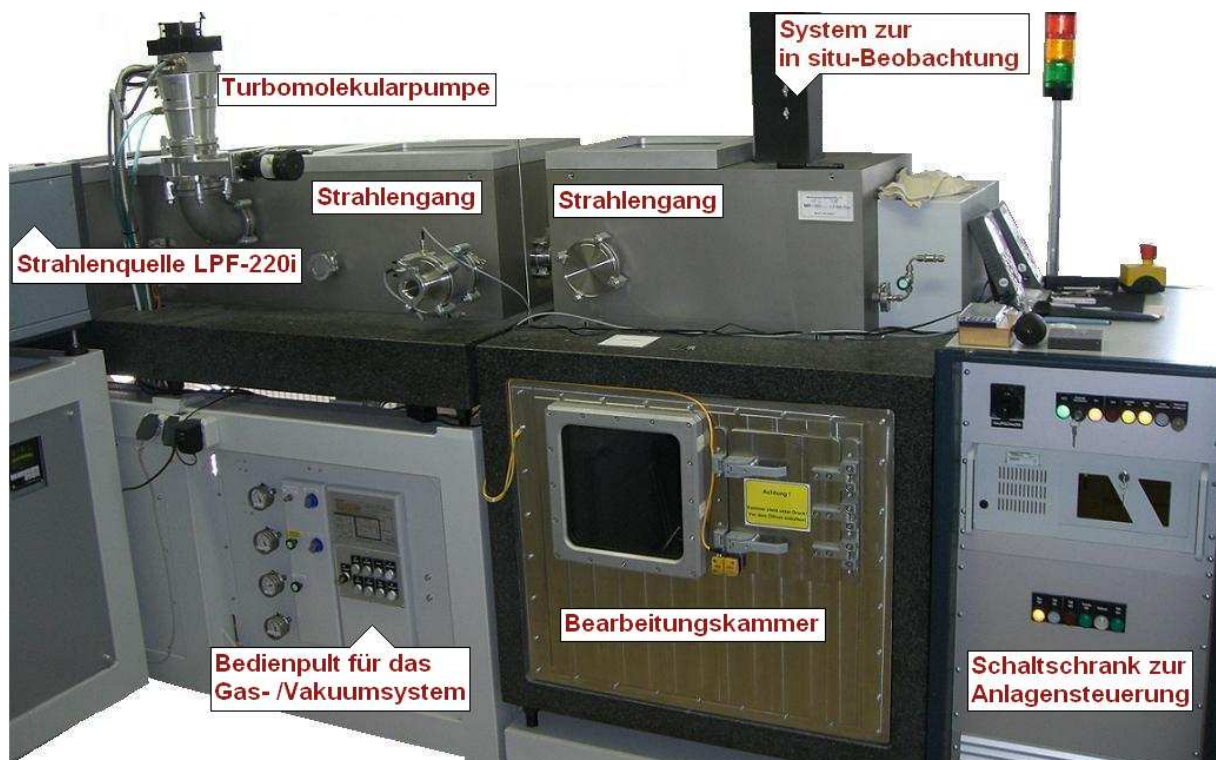


Abb. 4.1: Mikrobearbeitungssystem EX-157.

Der Gesamtaufbau der Laseranlage lässt sich in mehrere Komponenten untergliedern. Sie besteht aus der Strahlquelle, dem Bereich für die Strahlführung und -formung inklusive des Gas-/Vakuumsystems, der Bearbeitungskammer und der Schalt- und Steuereinheit mit zugehöriger Peripherie und Software.

4.2 Excimerlaser LPF 220i

Bei der Strahlquelle dieser Anlage handelt es sich um einen Excimerlaser LPF220i der Firma Lambda Physik.

Excimerlaser stellen heute eine wichtige Klasse der molekularen Gaslaser dar [9] und basieren auf dem Prinzip, dass durch elektrische Entladungen *Excimere* („excited dimer“, engl. für angeregtes Dimer) oder *Exciplexe* („excited state complex“, engl. für angeregter Komplex) gebildet werden. Dabei bestehen Excimere aus gleichartigen, Exciplexe aus unterschiedlichen Atomen und da diese Verbindungen nur im angeregten Zustand existieren können ist stets eine Besetzungsinversion gegeben. Beim Zerfall dieser Moleküle in ihre Bestandteile wird elektromagnetische Strahlung im UV-Bereich emittiert. Im LPF 220i werden durch Hochspannungsentladungen bis 26 kV Fluoratome angeregt und entsprechende



Abb. 4.2: Der Laser LPF 220i [10].

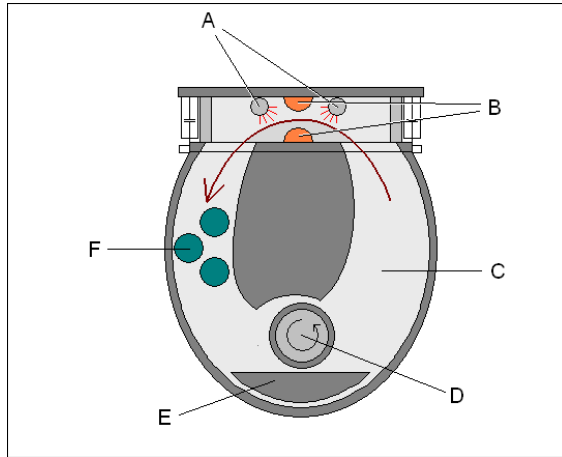
Excimere gebildet. Beim Zerfall wird eine elektromagnetische Strahlung von 157 nm Wellenlänge emittiert, was einer Photonenenergie von 7,9 eV entspricht. Auf diese Weise werden Pulsenergien von maximal 30 mJ bei 200 Hz Repetitionsrate erreicht. Diese lässt sich zwischen 1 Hz und 200 Hz variieren. Es stehen drei unterschiedliche Betriebsmodi zur Verfügung: Zum einen

der Hochspannungsmodus (HV-Mode), bei welchem die Anregung durchgängig mit konstanter Spannung von maximal 26 kV erfolgt, was zur Folge hat, dass sich die Pulsenergie im Verlauf der Bearbeitung durch ein „Altern“ des Lasergases verringert. Mit dieser Variante lassen sich allerdings für weniger zeitaufwändige Bearbeitungen die höchsten Pulsenergien erzielen.

Des Weiteren ist es möglich während der Bearbeitung einen teilweisen Gasaustausch durchzuführen um jenes „Altern“ zu kompensieren. Der EGY PGR-Mode kam an dieser Laseranlage bereits zur Anwendung, wurde aber als nicht praktikabel befunden.

Für zeitaufwändigere Aufgaben stellte sich der energiestabilisierte Modus (EGY NGR-Mode) als am geeignetsten heraus. Dabei wird die Pulsenergie über die Entladungsspannung konstant auf einem einstellbaren Wert gehalten. Auf diese Art und Weise ist bei einer Pulsenergie von 18 mJ und 200 Hz Laserfrequenz und unter Verwendung von Neon der Reinheit 4.5 (Forderung des Herstellers) und einem Helium-Fluorgemisch nach [10] eine durchgehende Bearbeitung von bis zu 6 Stunden Dauer möglich.

In Abbildung 4.3 ist der schematische Aufbau des Laserresonators dargestellt. Das unter einem Druck von etwa 3100 mbar im Gasreservoir (C) befindliche Lasergas bewirkt eine Selbstpassivierung der Kammerwände, wodurch eine weitere Reaktion dieser durch das sehr reaktionsfreudige Fluor verhindert wird. Bei Verwendung unzureichend reiner



Gasbestandteile kann es jedoch zur vollständigen Zerstörung des Gerätes kommen.

Zwischen den beiden, mit (B) gekennzeichneten Elektroden findet die Hochspannungsentladung statt.

Durch weitere, parallel zu den Entladungselektroden angebrachte Elektroden (A) wird durch Vorionisierung des Gases eine kontrollierte und funkenfreie Entladung garantiert. Dies geschieht im Zeitintervall

Abb. 4.3: Querschnitt des Resonators [11]. zwischen den Entladungen, welche ca. 50 ns in

Anspruch nehmen. Das Gebläse (D) bewirkt ein

stetiges Umrühren des Gases um so das Gasvolumen zwischen den Elektroden innerhalb der Entladungspausen auszutauschen. Da dieser Vorgang nur etwa $1/300$ s benötigt, ist auch bei einer Laserfrequenz von 200 Hz der vollständige Gasaustausch im Entladungsvolumen gewährleistet. Da der Fluorlaser nur einen Wirkungsgrad von etwa 2 % aufweist wird eine große Wärmemenge frei, welche vom Gasgemisch aufgenommen wird und über ein Wärmetauschersystem (F) abgeführt werden muss. Der als (E) gekennzeichnete elektrostatische Filter verhindert die Beschleunigung geladener Teilchen hin zur Gasraumwand. [10], [11]

4.3 Strahlführung und -formung

In der unteren Troposphäre, also da wo die Laseranlage zum Einsatz kommt, besteht die Erdatmosphäre zu etwa 21 % aus molekularem Sauerstoff O_2 .

Von diesem wird elektromagnetische Strahlung mit 157 nm Wellenlänge aber etwa 3 Größenordnungen stärker absorbiert als Strahlung der Wellenlänge 193 nm. Dies gilt auch für andere Verbindungen, welche Sauerstoff enthalten.

Zudem spalten sich die Sauerstoffmoleküle O_2 bei Bestrahlung im Vakuum-UV-Bereich (200 nm bis 100 nm Wellenlänge) in ihre atomaren Bestandteile auf. Durch Stöße dieser freien Sauerstoffradikale mit weiteren Sauerstoffmolekülen bildet sich Ozon O_3 .

Diese Vorgänge verhindern eine Laserstrahlausbreitung einer Wellenlänge von 157 nm in der Erdatmosphäre, weshalb die Strahlführung dieser Anlage in einer Schutzgasatmosphäre oder im Vakuum erfolgen muss. Im Vakuum wird die mittlere freie Weglänge eventuell auftretender, auch versehentlich ablatierter Teilchen z.B. der Einhausung, so groß, dass unweigerlich die im Strahlengang befindlichen Optiken verschmutzt oder gar zerstört würden. Daher werden sowohl der Strahlengang als auch die Bearbeitungskammer (beides gedichtete Edelstahlkammern) zunächst evakuiert und im Nachgang mit Stickstoff der Reinheit 5.0 geflutet. Dies ist für beide Anlagenabschnitte separat durchführbar. Der Strahlengang selbst wird mittels einer Scrollpumpe als Vorpumpe und einer Turbomolekularpumpe auf einen Druck kleiner $5 \cdot 10^{-4}$ mbar evakuiert. In der Bearbeitungskammer ist der Weg, welchen die Strahlung durchlaufen muss, wesentlich geringer. Das rechtfertigt ein Abpumpen auf einen Druck von lediglich etwa $1 \cdot 10^{-1}$ mbar. Hier kommt nur die Scrollpumpe zum Einsatz.

Da der Laserstrahl nach Verlassen des Resonators für eine Mikrobearbeitung unzureichende Strahleigenschaften aufweist, sind eine Vielzahl optischer Komponenten nötig um z.B. die in den Raumebenen unterschiedlichen Divergenzen oder die inhomogene Intensitätsverteilung anzugleichen. Diese Komponenten zur Strahlführung und -formung befinden sich im Strahlengang.

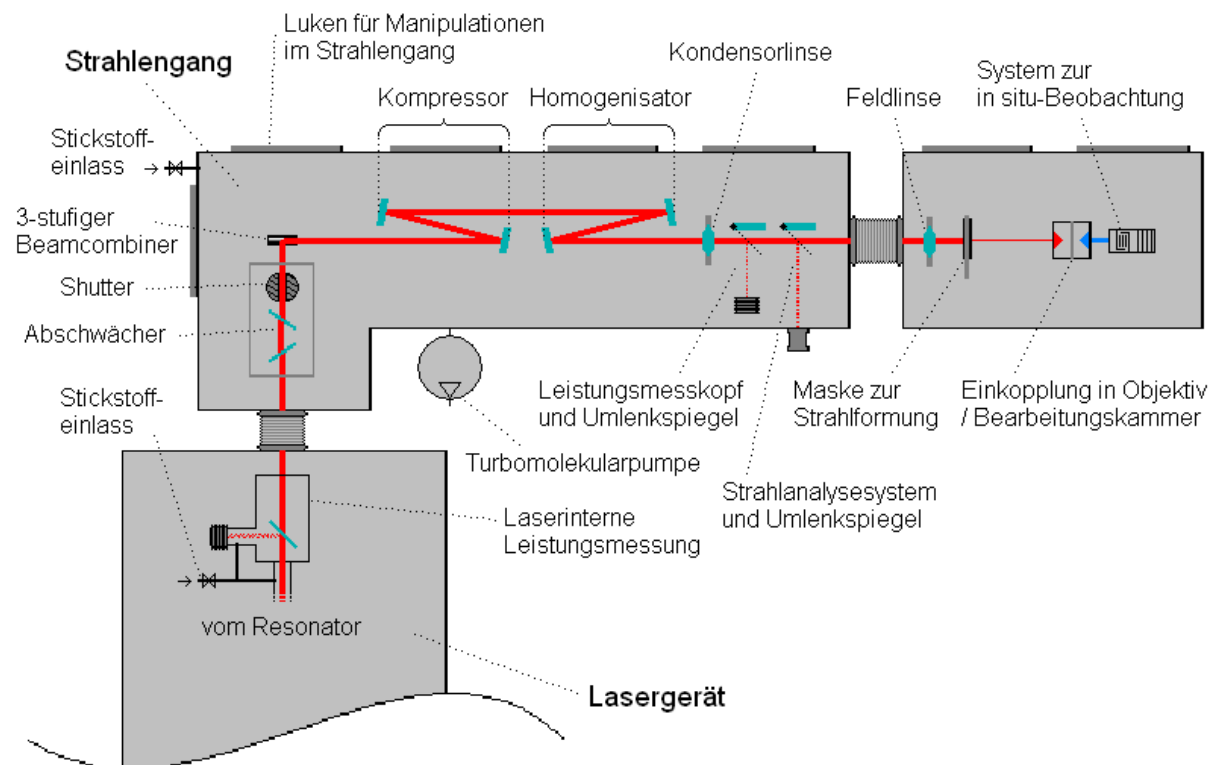


Abb. 4.4: Anordnung der optischen Komponenten.

In obiger Abbildung ist die Reihenfolge der optischen Elemente dargestellt. Zunächst sind ein Umlenkspiegel sowie ein Leistungsmesskopf angebracht, welche sich noch innerhalb der Einhausung des Lasergerätes befinden und für die laserinterne Leistungsmessung als Regelgröße zuständig sind.

Das erste optische Bauteil im Strahlengang selbst ist der Abschwächer mit Shutter gefolgt von Beamcombiner, Kompressor und Homogenisator. Daran schließen sich die Kondensorlinse, zwei weitere Umlenkspiegel für die Leistungsmessung sowie das Strahlanalysesystem und eine Feldlinse an. Letztlich trifft der Strahl auf die im Maskenhalter befindliche Projektionsmaske, woraufhin er in das Objektiv und damit in die Bearbeitungskammer eingekoppelt wird.

Der Strahlabschwächer:

Die Pulsenergie des Lasers lässt sich im EGY NGR-Mode über die Entladungsspannung einstellen, doch ist hierbei die Schrittweite der Leistungsänderung zu groß. Es ist folglich eine andere Möglichkeit der Leistungsregulierung zur Feinabstimmung notwendig.

Dies wird über zwei planparallele Kalziumfluoridplatten gelöst. Das Wirkprinzip basiert dabei auf der Abhängigkeit des Reflexionsgrades vom Einfallswinkel des Laserstrahles auf die reflektierende Grenzfläche. Da es beim schrägen Eintritt des Laserstrahles in ein anderes optisches Medium zu einer Ablenkung (Brechung) des Laserstrahles kommt, sind zwei solche Platten nötig, um einen Strahlversatz zu kompensieren. Diese Platten neigen sich in entgegengesetzte Richtung aber um den gleichen Winkel gegenüber der Strahlausbreitungsrichtung.

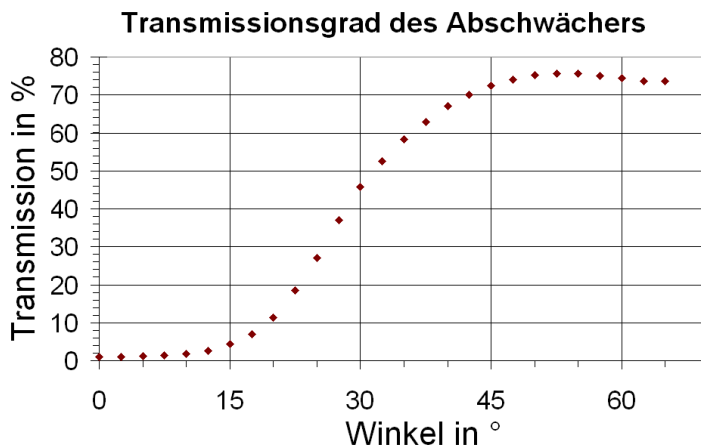
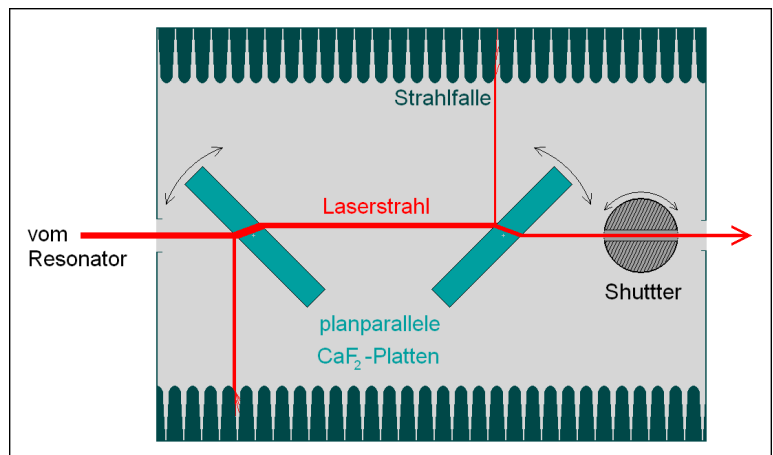


Abb. 4.5: Transmissionsverhalten des Abschwächers [10].

Abb. 4.6: Schematischer Aufbau des Strahlabschwächers.



Der Transmissionsbereich dieses Aufbaus liegt nach [10] zwischen 1 % und 75 % des laserintern gemessenen Wertes. Das Leistungsmaximum steht dabei bei einer Abschwächerstellung von 55 ° für die Bearbeitung zur Verfügung, das Minimum bei 0 °. Allerdings ist nicht bekannt, welche Winkel die Kalziumfluoridplatten tatsächlich zueinander

einnehmen, da die geringste Transmission einem Winkel von 0° zugeordnet wurde [10]. In oben dargestellter Graphik ist die Transmissionskurve des Abschwächers zu sehen. Zur Ermittlung dieser Werte wurden jeweils drei Messungen von 0° nach 65° und entgegengesetzt vorgenommen und arithmetisch gemittelt. [10]

Beamcombiner und Kompressor

Nach der Vorrichtung zur Strahlabschwächung folgt der so genannte Beamcombiner. Dessen Aufgabe ist es, die unterschiedlichen Divergenzen des Laserstrahles anzupassen.

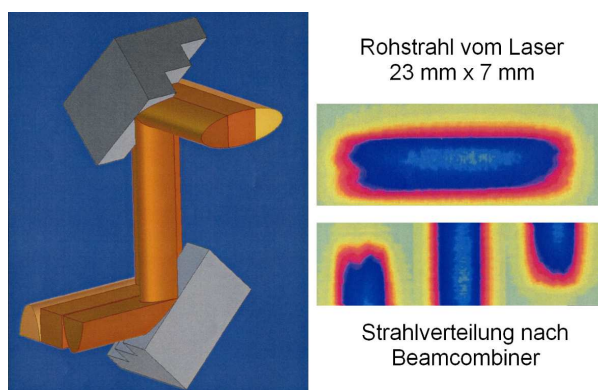


Abb. 4.7: Prinzip der Strahlteilung mittels zweier Treppenspiegel [12].

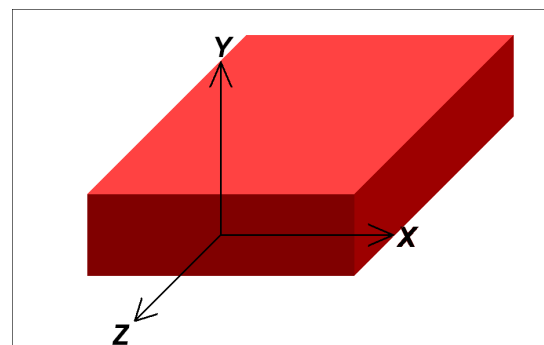


Abb. 4.8. Definition der Strahlachsen [10].

Nach [10] weist der Rohstrahl beim Verlassen des Resonators ein Rechteckprofil von 23 mm (in x-Richtung) x 7 mm (in y-Richtung) sowie Divergenzen von $3 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$ auf. Die Strahlachsen wurden dabei so definiert, dass die z-Achse der Ausbreitungsrichtung des Strahles und die x-z-Ebene der zur z-Achse normalen Fläche entsprechen.

Der Beamcombiner besteht aus 2×3 Spiegelsegmenten (siehe Abbildung 4.7). Diese Spiegel bestehen aus Kalziumfluorid und haben eine Größe von $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$. Trifft der Laserstrahl nun auf diese Treppenspiegel auf, so wird er in drei Teilstrahlen zerlegt und jeweils um 90° gedreht, worauf diese auf den Kompressor treffen.

Dieser besteht aus zwei Spiegeln und bewirkt ein Stauchen des Strahls in der x-z-Ebene. Nach dem Kompressor weist der Strahl ein etwa quadratisches Profil von $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ und sowohl in der x-z- wie auch in der y-z-Ebene eine Divergenz von 1 mrad auf.

Homogenisator, Kondensor- und Feldlinse

Um eine homogene Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt zu erreichen wird der Laserstrahl mittels eines Mikrospiegelarrays in 196 Einzelstrahlen aufgeteilt und durch ein zweites solches Array, dessen ebenfalls 196 quadratische Spiegelsegmente je eine Fläche von 1 mm^2 aufweisen, derart überlagert, dass 800 mm hinter dieser Anordnung ein Strahlquerschnitt homogener Intensitätsverteilung entsteht. Eine Kondensor- sowie eine Feldlinse erzeugen einen homogen ausgeleuchteten Fleck von $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$.

Die Projektionsmaske

Die Maske, welche auf dem Substrat abgebildet wird, befindet sich exakt im homogenen Fleck. Dies ist unerlässlich, da die Maske, um gute Bearbeitungsergebnisse erreichen zu können, homogen ausgeleuchtet werden muss. Andernfalls würden sich z.B. bei der Abbildung einer Quadratmaske unterschiedliche Strukturtiefen im bearbeiteten Substrat zeigen. Da der homogene Fleck durch Kondensor- und Feldlinse auf eine Größe von $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ geformt wird, resultiert daraus auch die maximal abbildbare Maskengröße, deren geometrischer Form prinzipiell kaum Grenzen gesetzt sind. Jedoch sind z. B. für Ringmasken Stege nötig, um das Strukturinnere zu halten.

Die Maske selbst besteht aus einer $50 \text{ }\mu\text{m}$ dicken Tantalfolie, welche z. B. mit einem Femtosekundenlaser bearbeitet werden kann. Grenzen sind dabei lediglich durch die angesprochene maximale Maskengröße sowie durch die minimale Auflösung beim Erzeugen kleinster Maskengeometrien gegeben. So werden beispielsweise bei kleiner werdenden Quadratmasken die Ecken aufgrund des Strahldurchmessers des Femtosekundenlasers zunehmend verrunden.

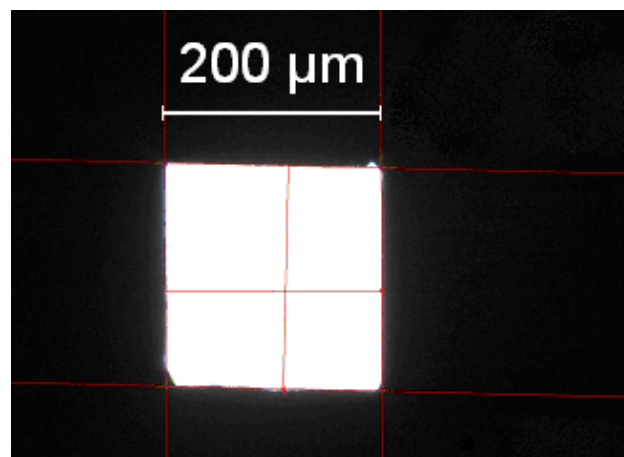


Abb. 4.9: Durchlichtmikroskopische Aufnahme einer Quadratmaske mit einer Kantenlänge von ca. $200 \text{ }\mu\text{m}$.

Die abbildende Optik

Um den durch die Projektionsmaskemaske in seiner Querschnittsgeometrie geformten Laserstrahl auf das Substrat projizieren zu können ist eine Abbildungsoptik nötig. Dieses basiert auf einem 5-Linsen-System mit einem Abbildungsmaßstab von 26,67. Die Linsen bestehen aus Kalziumfluorid. Da die Laserwellenlänge von 157 nm wie bereits erwähnt von normaler Atmosphäre innerhalb weniger mm vollständig absorbiert wird, ist ein Evakuieren und späteres Spülen der Linsenzwischenräume mit Stickstoff der Reinheit 5.0 unumgänglich. Das Evakuieren erfolgt dabei über den Strahlengang während das Spülgas in die Bearbeitungskammer eingelassen wird.

Da die substratseitige Oberfläche der letzten Linse vor ablatierten Partikeln geschützt werden muss, ist an das Objektiv eine Schutzgasdüse angebracht worden. Diese erzeugt einen „Crossjet“, welcher zur Linse hin beschleunigte Partikel seitlich ablenkt, einen stechenden Strahl entlang der Laserstrahlachse sowie einen ringförmig um diesen Strahl angeordneten Schutzgasschleier, um eine Sogwirkung der Düse auszuschließen. [10]

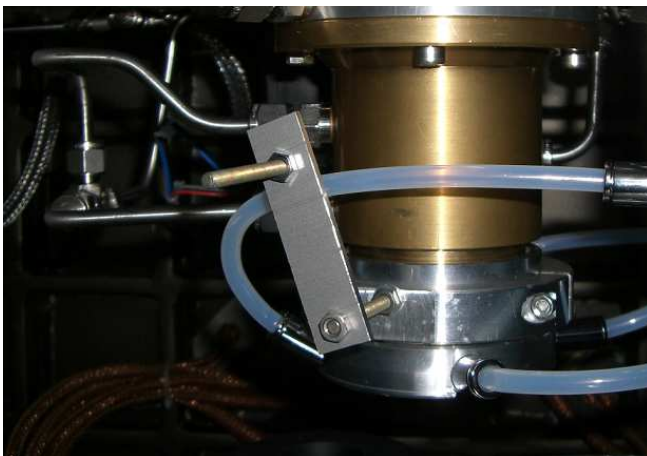


Abb. 4.10: Objektiv mit Schutzgasdüse.

4.4 Substratpositionierungen

Um eine Mikrostruktur welche über die simple Abbildung der Projektionsmaske hinausgeht zu erzeugen, ist es unumgänglich eine Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Substrat zu realisieren. Im Gegensatz zu Scannersystemen, bei welchen der Laserstrahl durch Spiegelanordnungen abgelenkt wird, beruht die Relativbewegung bei der hier besprochenen Laseranlage auf dem Verschieben des Substrates mittels eines Koordinatentisches.

Dieser befindet sich in der Bearbeitungskammer, was eine Vakuumtauglichkeit des Systems voraussetzt und für einen Druck von $1,0 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$ bestätigt werden konnte.

Für die laterale Bewegung des Werkstückes sorgen zwei Linearachsen (X und Y) während die zum Laserstrahl parallele Substratverschiebung (Z-Achse) durch einen Schrittmotor realisiert wird. Eine früher vorhandene Rotationsachse φ wurde aufgrund ihres negativen Einflusses auf die Starrheit der Positionierungsanordnung entfernt.

Eine Aluminiumkonstruktion welche diese Rotationsachse nun ersetzt, stellt gleichzeitig den Probenhalter dar. Dabei handelt es sich um einen Teller mit 15 cm Durchmesser, in welchem gerastert Gewindebohrungen eingebracht sind. Somit kann das Substrat mit Metallklemmen auf dem Halter fixiert werden.

Für die Synchronisation von Laserpuls und Werkstückposition sind zwei verschiedene Modi möglich. Beim schrittsynchronen Betrieb wird dabei ein Triggersignal erzeugt, wenn der zurückgelegte Weg zwischen zwei Laserpulsen dem Sollwert wie er im Bearbeitungsregime festgelegt wurde entspricht. Dieser Modus ist insbesondere bei Strukturen mit vielen Beschleunigungsstrecken von Bedeutung. Sollen hingegen großflächige Bereiche des Substrates abgefahren werden, was „lange“ Wege mit einer gleichförmigen Bewegung bedeutet, so kann auch der zeitsynchrone Betrieb gewählt werden, wobei der Laser mit einer festen Frequenz gepulst und der Koordinatentisch mit der daraus errechneten Verfahrgeschwindigkeit bewegt wird. Im Burst-Modus emittiert der Laser mit einer einstellbaren Frequenz und das Substrat wird nicht bewegt. Dieser Modus kommt beispielsweise beim Erzeugen von Bohrungen zum Einsatz.

Bei einer Mikrobearbeitungsstation werden hohe Anforderungen an das Positioniersystem insbesondere hinsichtlich der Auflösung und der Wiederholgenauigkeit gestellt. In folgender Übersicht sind die Parameter der eingesetzten Achsen dokumentiert.

Tabelle 4.1: Technische Parameter des Positioniersystems. [12]

	X-Achse ALS10020	Y-Achse ALS20020	Z-Achse AVS125
Verfahrweg	200 mm	200 mm	25 mm
Max. Geschwindigkeit ohne Last	750 mm/s	750 mm/s	50 mm/s
Auflösung	50 nm	50 nm	106 nm
Wiederholgenauigkeit	+/- 1 µm	+/- 0,5 µm	+/- 0,75 µm
Ebenheit	+/- 4,8 µm	+/- 0,4 µm	+/- 5 µm
Gewicht	11 kg	17,5 kg	10,5 kg
Max. Last horizontal	50 kg	70 kg	10,5 kg

4.5 Anlagenbedienung

Im zur Bearbeitungsstation gehörigen Schaltschrank befinden sich nicht nur die Leistungsteile des Positioniersystems, die Stromversorgung der Vakuumpumpen sowie die Steuer- und Regeleinrichtungen der Anlage, sondern auch ein Industrierechner, auf welchem die notwendige Software zur Bedienung der Anlage hinterlegt ist. Zu diesen gehören die Steuerung des Gas-/ Vakuumsystems mittels „HTWM - Valve Controller“ sowie die Softwarelösung „Micro MMI“ als Verbindung zwischen Bediener und Lasergerät sowie dem Positioniersystem. Die Ein- und Ausgabeperipherie des Rechners befindet sich zentral an einem Arbeitsplatz, so dass eine Bedienung der Anlage durch nur eine Person problemlos

**Abb. 4.11:** Bedienplatz der Bearbeitungsstation.

möglich ist. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist die Bedienung des Gas-/ Vakuumsystems zusätzlich über ein Bedienpult direkt an der Anlage möglich, das Lasergerät kann optional auch über ein Panel bedient werden.

5 Spezifizierung der zu untersuchenden Materialien

5.1 Corning 7980

Nach [13] wird mit dem Handelsnamen Corning 7980 ein hochreines Quarzglas bezeichnet, welches flammenhydrolytisch hergestellt wird. Das amorphe und farblose Material vereint die Vorteile eines geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit sehr guten optischen Eigenschaften und einer hohen Transparenz bis in den ultravioletten Bereich und weist daher ein sehr breites Einsatzspektrum auf.

So wird Quarzglas im Allgemeinen nach [14] wegen seiner hohen Temperatur- und Temperaturwechselbeständigkeit in Hochtemperaturprozessen eingesetzt. Selbige Quelle gibt aufgrund der hohen Reinheit den Einsatz in der Halbleiterindustrie und Lichtleitertechnik an und nennt die Elektronik und Elektrotechnik als weiteres Anwendungsgebiet, da sich Quarzgläser auch durch sehr geringe elektrische Leitwerte, hohe Durchschlagsfeldstärken und geringe dielektrische Verluste auszeichnen.

Im Geräte- und Anlagenbau wird Quarzglas laut [14] aufgrund der hohen Beständigkeit gegenüber Salzlösungen, Säuren und Wasser eingesetzt. So wird dieses Material mit Ausnahme von Flusssäure und heißer Phosphorsäure von keiner Säure angegriffen und verhält sich gegenüber vielen anderen Stoffen chemisch inert.

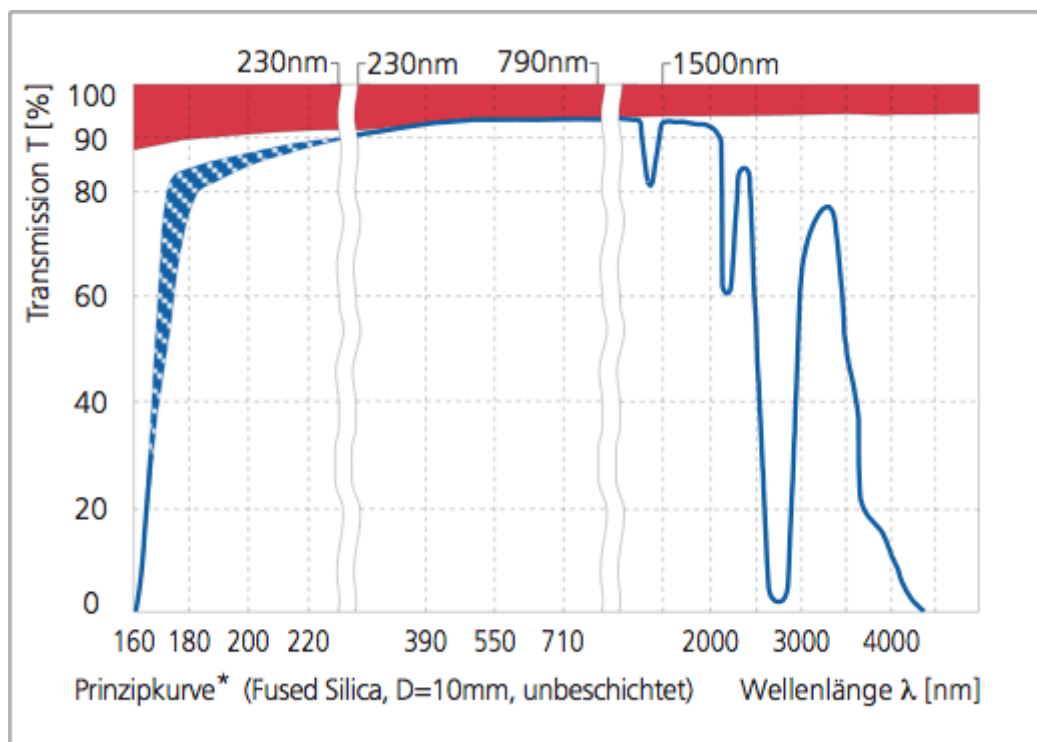


Abb. 5.1: Transmissionsverhalten einer 10 mm dicken Quarzglasprobe [15].

In der graphischen Darstellung des Transmissionsverhaltens entspricht der rote Bereich den reflexionsbedingten Verlusten und der schraffierte Abschnitt typischen herstellungsbedingten Schwankungen. Deutlich wird, dass bei einer Wellenlänge von 157 nm und einer 10 mm dicken Probe kaum noch Transmission auftritt.

Tabelle 5.1: Übersicht der Eigenschaften von Quarzglas [14].

Mechanische Eigenschaften	
Dichte (bei 20 °C)	2,2 g/cm ³
Zugfestigkeit	50 N/mm ²
Druckfestigkeit	1150 N/mm ²
Elastizitätsmodul	7,3*10 ⁴ N/mm ²
Torsionsmodul	3,1 N/mm ²
Biegefestigkeit	68N/mm ²
Poissonsche Zahl	0,17
Mohn-Härte	5,5-6,5
Mikrohärte	8600-9800 N/mm ²
Knoop-Härte	5800-6100 N/mm ²
Schallgeschwindigkeit für Longitudinalwellen	5720 m/s
Ultraschallgeschwindigkeit bei 50 °C	5960 m/s
Thermische Eigenschaften	
Therm. Ausdehnungskoeffizient (0 - 300 °C)	0,58*10 ⁻⁶ K ⁻¹
Untere Entspannungsgrenze (14,5 dPa)	1160 °C
Obere Entspannungsgrenze (13,0 dPa)	1260 °C
Erweichungstemperatur (7,6 dPa)	1760 °C
Bearbeitungsbereich (5 - 8 dPa)	1700 - 2100 °C
Maximale Dauer-Gebrauchstemperatur	1100 °C
Maximale kurzzeitige Gebrauchstemperatur	1300 °C
Mittlere spezifische Wärmekapazität (0 - 100 °C)	770 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit (100 °C)	1,47 W/K*m
Elektrische Eigenschaften	
Spezifischer elektrischer Widerstand (20 °C)	10 ¹⁸ Ω*cm
Dielektrizitätskonstante (20 °C und 10 ⁶ Hz)	3,7
Durchschlagsfeldstärke (20 °C)	250 - 400 KV/cm
Dielektrischer Verlustfaktor (1 kHz)	<5*10 ⁻⁴
Bandgap [16]	9 eV

5.2 D263T

Das Borosilikatglas D263T der Firma Schott zeichnet sich laut [17] durch besondere Eigenschaften wie geringe Rauigkeiten, gute Ebenheit, klares Erscheinungsbild, extrem dünne Standarddicken bis hinab zu 30 μm sowie einer Biegsamkeit bei geringen Dicken aus. So ergeben sich Anwendungsbereiche als hochwertige Deckgläser, Displaygläser, Elektrolumineszenzanzeigen, optische Fenster und Spezial- und Dünnglasanwendungen. Zudem ist das Borosilikatglas sehr beständig gegen chemische Einflüsse [17].

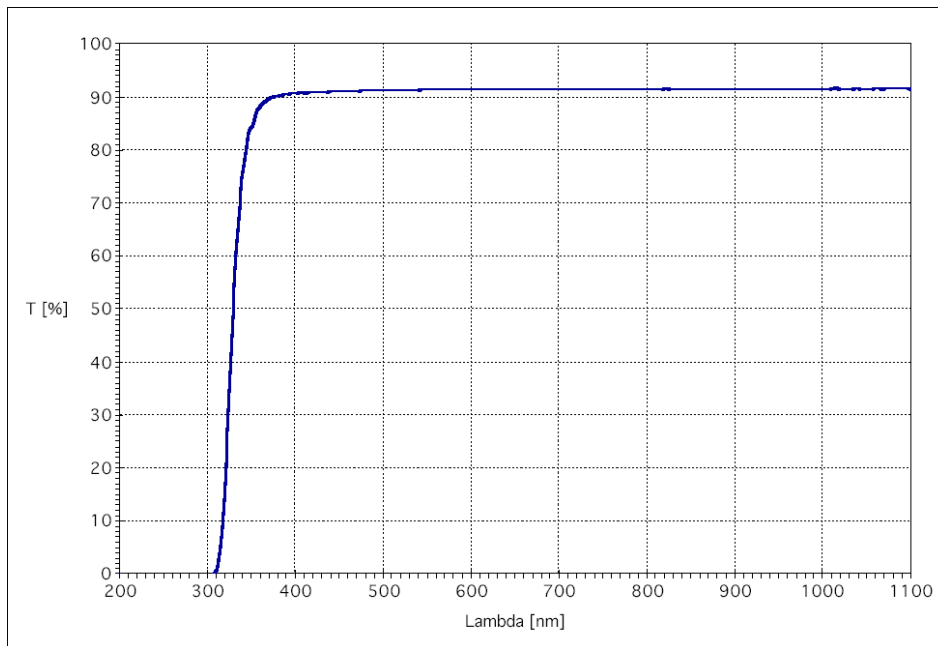


Abb. 5.2: Transmissionsverhalten von D263T einer Dicke von 0,7mm [18].

Tabelle 5.2: Übersicht der Eigenschaften von D263T [17].

Mechanische Eigenschaften	
Dichte (bei 20 °C)	2,2 g/cm ³
Elastizitätsmodul	7,3*10 ⁴ N/mm ²
Poissonsche Zahl	0,17
Torsionsmodul	30,1 kN/mm ²
Knoop-Härte	5800-6100 N/mm ²
Thermische Eigenschaften	
Therm. Ausdehnungskoeffizient (20 - 300 °C)	7,2*10 ⁻⁶ K ⁻¹
Einsinktemperatur (10hoch4 dPa)	1051 °C
Erweichungspunkt (10hoch7,6 dPa)	736 °C
Transformationstemperatur	557 °C
Elektrische Eigenschaften	
Dielektrizitätskonstante (1 MHz)	6,7
Dielektrischer Verlustfaktor (1MHz)	61*10 ⁻⁴

5.3 Kalziumfluorid

Im Unterschied zu den bisher vorgestellten Materialien handelt es sich bei Kalziumfluorid nicht um ein amorphes Gefüge sondern um Ein- oder Polykristalle. Diese können nach [19] mit Größen von bis zu 200 mm Durchmesser synthetisch erzeugt werden. Der so entstandene in Wasser und verdünnten Säuren schwer lösliche Kristall ist farblos und sowohl im ultravioletten, als auch im infraroten Spektralbereich hoch transmittiv. Somit erklärt sich auch der Einsatz als Werkstoff für optische Komponenten im UV-Bereich bis in den VUV-Bereich, in welchem Quarzglas kaum noch transmittiert. Da sich die thermisch bedingte Brechzahländerung und die thermische Ausdehnung kompensieren wird Kalziumfluorid aber auch in der Lasertechnik für größere Wellenlängen eingesetzt, da hier auch bei großen Leistungsdichten kaum thermische Linsen auftreten.

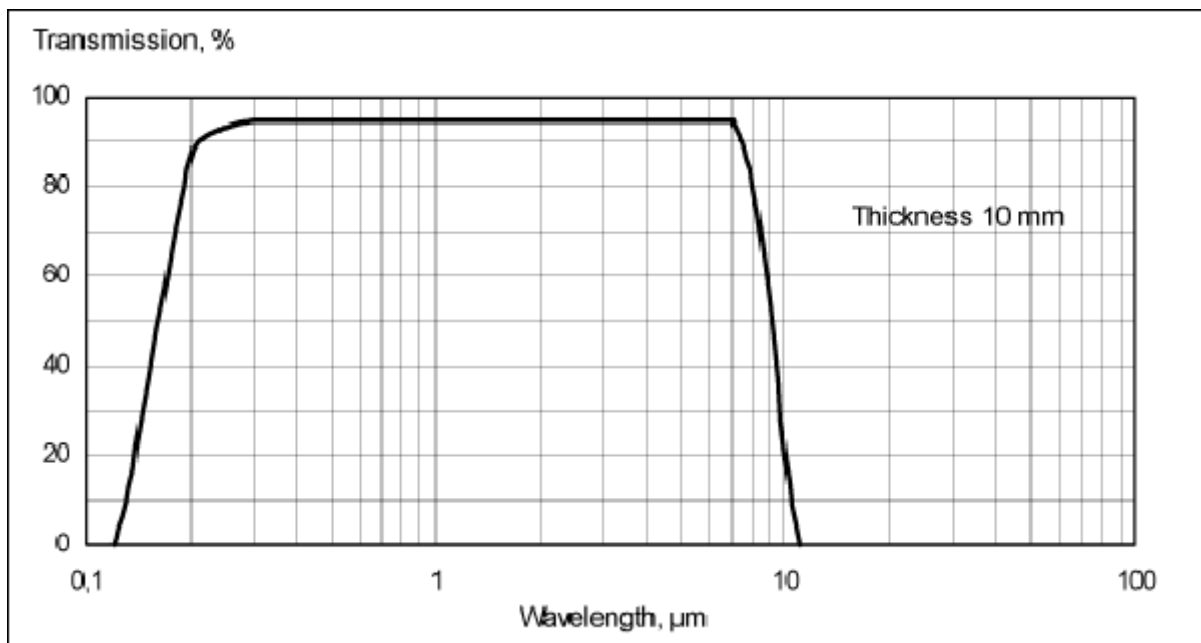


Abb. 5.3: Transmissionsverhalten einer 10 mm dicken CaF_2 -Probe [20].

Man erkennt in der Grafik, dass Kalziumfluorid über einen großen Wellenlängenbereich von etwa 200 nm bis ca. 10 μm nahezu konstant hoch transparent ist. Dies prädestiniert diesen Werkstoff für den Einsatz in den optischen Technologien.

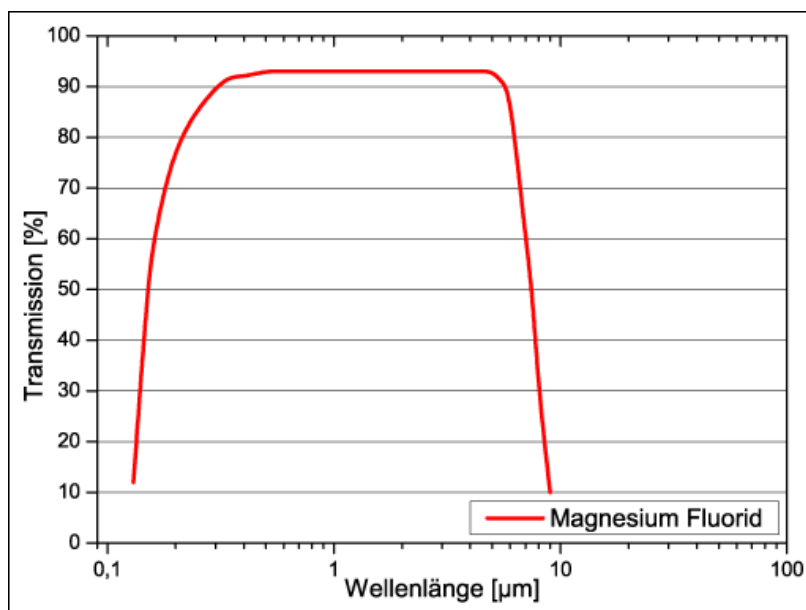
So findet dieses Material Einsatz in der IR-Analytik, in astronomischen- und Kameralinsen sowie in der Excimerlaseroptik. In dotierter Form wird es auch als Szintillator eingesetzt [19].

Tabelle 5.3: Übersicht der Eigenschaften von Kalziumfluorid [19].

Mechanische Eigenschaften	
Dichte	3,18 g/cm ³
Schmelzpunkt	1418 °C
Molare Masse	78,08 g/mol
Knoop-Härte	158,3
Mohshärte	4
Elastizitätsmodul E	75,8 GPa
Schubmodul G	33,77 GPa
Kompressionsmodul K	82,71 GPa
Bruchmodul	36,5 MPa
Kristallstruktur	kubisch; a=5,4623 Å
Thermische Eigenschaften	
Therm. Ausdehnungskoeffizient (25 °C)	$18,87 \cdot 10^{-6} - 20,16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Spezifische Wärmekapazität	854 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	9,71 W/K*m
Elektrische Eigenschaften	
Dielektrizitätskonstante (27 °C und 100 kHz)	6,76
Bandgap [21]	12,1 eV

5.4 Magnesiumfluorid

Ebenso wie bei Kalziumfluorid handelt es sich auch bei den untersuchten Magnesiumfluoridproben um ein einkristallines Material.

**Abb. 5.4:** Qualitatives Transmissionsverhalten von Magnesiumfluorid [22].

Das Transmissionsverhalten kann aus obiger Darstellung nur qualitativ bewertet werden, da in der Quelle keine Aussage zur Dicke der untersuchten Probe gemacht wurde. Das Transmissionsverhalten ist dem von Kalziumfluorid ähnlich. Entsprechend wird auch Magnesiumfluorid laut [23] in Form von optischen Fenstern oder Prismen für Excimerlaser oder als VUV-Optiken in der Raumfahrt eingesetzt. Eine weitere Anwendung sind Polarisationsoptiken.

Tabelle 5.4: Übersicht der Eigenschaften von Magnesiumfluorid [22].

Mechanische Eigenschaften	
Dichte	3,177 g/cm ³
Schmelzpunkt	1263 °C
Molare Masse	62,32 g/mol
Knoop-Härte	415
Mohshärte	6
Elastizitätsmodul E	138,55 GPa
Schubmodul G	54,66 GPa
Kompressionsmodul K	101,32 GPa
Bruchmodul	49,0 MPa
Kristallstruktur	tetragonal; a=4,64 Å; c=3,06 Å
Thermische Eigenschaften	
Therm. Ausdehnungskoeffizient (20 °C)	$8,48 \cdot 10^{-6} - 13,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Spezifische Wärmekapazität	1130 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	25,0 W/K*m
Elektrische Eigenschaften	
Dielektrizitätskonstante (27 °C und 100 kHz)	4,87 - 5,45
Bandgap [24]	10,8 eV

5.5 Saphir

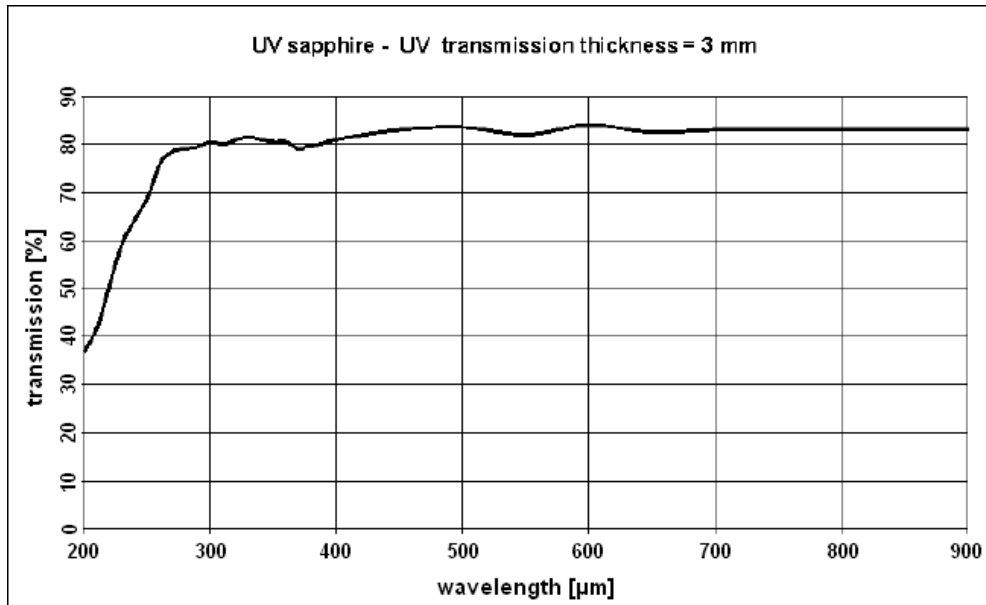


Abb. 5.5: Transmissionsverhalten einer 3 mm dicken Saphirprobe [25].

Bei Saphir handelt es sich um ein hochreines Aluminiumoxid der Summenformel Al_2O_3 welches eine Mohshärte von 9 sowie eine Schmelztemperatur von 2053 °C aufweist.

Somit bietet sich dieses Material für die Lagerung von Achsen (bekanntes Beispiel ist hierbei die Rubinlagerung in Uhren) oder in Hochtemperaturprozessen an.

Desweiteren kommt Saphir wie schon Kalzium- und Magnesiumfluorid ebenfalls als optisches Fenster oder Linse zum Einsatz. Ein weiterer Einsatz sind photonische Kristalle für integrierte optische Bauelemente.

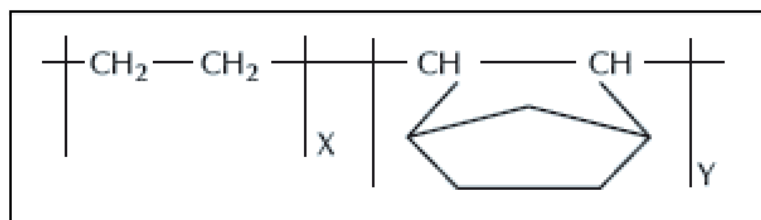
Auch als Substrat für die Abscheidung dünner Schichten wird es häufig genutzt. Zudem sind in diesem Material bereits mikrofluidische Systeme für biologische oder chemische Einsätze umgesetzt worden.

Tabelle 5.5: Übersicht der Eigenschaften von Saphir [26].

Mechanische Eigenschaften	
Dichte (20 °C)	3,98 g/cm ³
Schmelzpunkt	2053 °C
Knoop-Härte	1900 - 2200
Mohshärte	9
Zugfestigkeit (25 °C)	0,4 GPa
Druckfestigkeit (25 °C)	2,1 Pa
Elastizitätsmodul E (25 °C)	350 GPa
Bruchmodul (25 °C)	900 MPa
Kristallstruktur	hexagonal-romboedrisch
Thermische Eigenschaften	
Therm. Ausdehnungskoeffizient (50 °C)	$5,4 \cdot 10^{-6} - 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Spezifische Wärmekapazität (20 °C)	764 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit (25 °C)	40 W/K*m
Elektrische Eigenschaften	
Spezifischer el. Widerstand (20 °C)	$10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$
Dielektrizitätskonstante (25 °C und $10^3 - 10^{10} \text{ kHz}$)	9,4 - 11,6
Bandgap [27]	9,9 eV

5.6 TOPAS 5013

TOPAS (Thermoplastisches Olefin-Polymer amorpher Struktur) ist der Markenname der Ticona GmbH für deren Cycloolefincopolymer. Hierbei handelt es sich um amorphe, transparente Copolymere auf der Basis zyklischer und linearer Olefine, deren Eigenschaftsprofil sich während der Polymerisation in einem weiten Bereich variieren lässt [27].

**Abb. 5.6:** Chemischer Aufbau des Copolymers TOPAS [27].

Einige, durch den chemischen Aufbau bedingte, besondere Eigenschaften dieses Kunststoffes sind die niedrige Dichte, die über weite Bereiche hohe Transparenz, eine geringe Doppelbrechung und Wasseraufnahme sowie die daraus resultierende Sperrwirkung gegen Wasserdampf.

Des Weiteren zeichnet sich dieser Werkstoff durch eine hohe Steifigkeit, Härte und Festigkeit, seine hervorragende Biokompatibilität und die sehr gute Isolationseigenschaft aus. Zudem ist TOPAS gegen Säuren und Basen sehr beständig [27].

Somit ergibt sich ein breites Einsatzfeld wie Folien für Flachbildschirme sowie optische Bauteile wie Lichtwellenleiter, Linsen oder aber in der Beleuchtungstechnik. Auch in der Pharmazie und der medizinischen Diagnostik ist ein Einsatz denkbar [27].

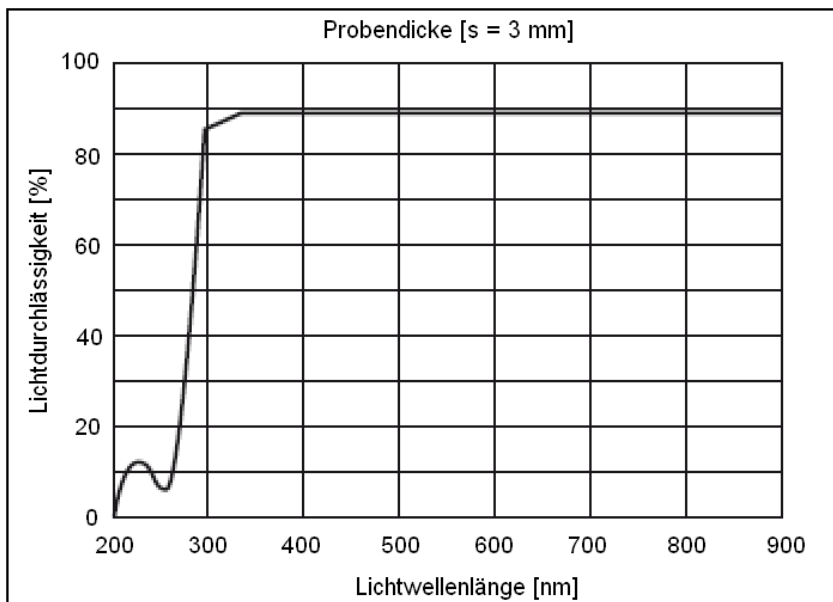


Abb. 5.7: Transmissionsverhalten einer 3 mm dicken TOPAS-Probe [27].

Bei dem im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchte Cycloolefincopolymer handelt es sich um den Spezialtyp der Bezeichnung 5013, welcher sich laut [27] durch eine sehr hohe Fließfähigkeit und exzellente optische Eigenschaften auszeichnet.

6 Untersuchungen zur Strukturierung

6.1 Grundlagenuntersuchungen

6.1.1 Prinzipielle Verfahrensweise der Grundlagenuntersuchung

Um komplexe Strukturen in die zu untersuchenden Materialien einzubringen sowie die dabei zu erreichenden Strukturtiefen im Vorfeld abschätzen und einstellen zu können sind Grundlagenuntersuchungen die Voraussetzung für nachfolgende Untersuchungen.

Im Zuge dieser galt es für die unterschiedlichen Materialien die Schwellfluenzen, also jene Fluenzen, ab welchen ein sichtbarer sowie messbarer Materialabtrag vom ersten Laserpuls an einsetzt, zu ermitteln.

Des Weiteren waren die den verschiedenen Fluenzen zugehörigen Abtragsraten zu bestimmen.

Hierzu wurden im ersten Versuchsteil Matrizen erzeugt, bei welchen sowohl die Fluenz als auch die Laserpulsanzahlen von punktuellen, dass heißt während der Bestrahlung ortsfesten Materialabträgen variiert wurden. Die Repetitionsrate beträgt immer 200 Hz.

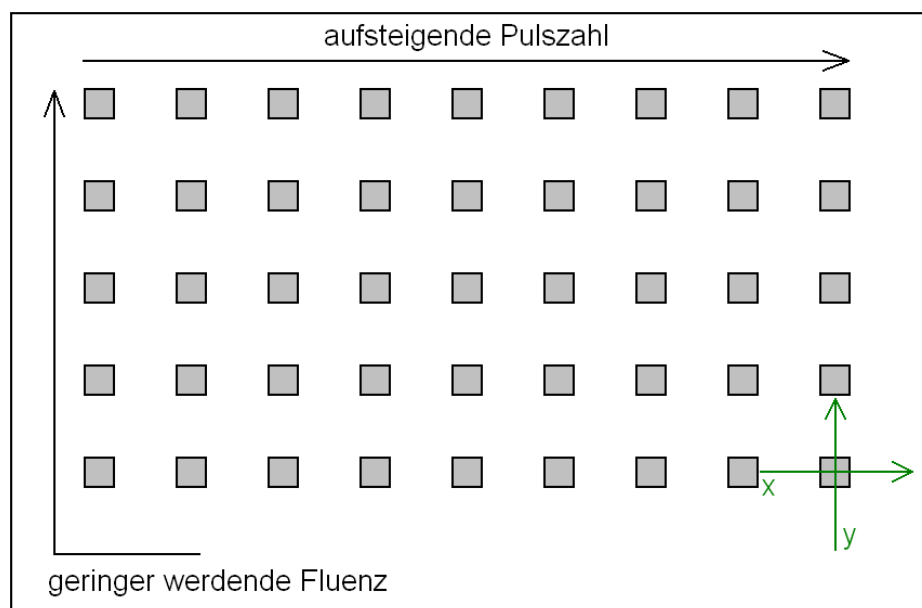


Abb. 6.1: Matrix der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten.

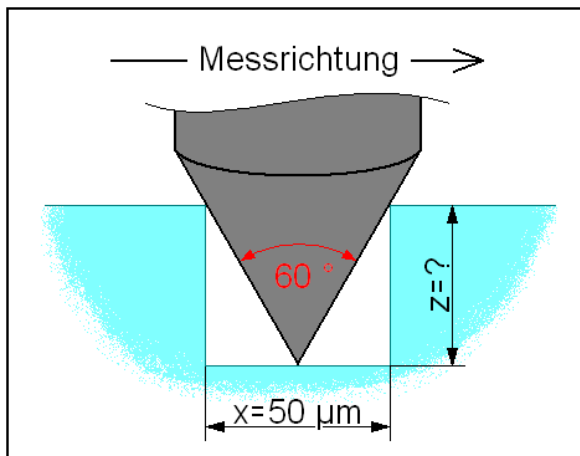
Im Vorfeld dieser Versuche konnte über das Verstellen des Abschwächers die Fluenz auf der Probe variiert werden. So war das Ermitteln der ungefähren Schwellfluenz möglich (hierzu wurde die Abschwächerstellung bei einsetzendem Materialabtrag ermittelt und im Nachgang die auf die Probe eingestrahlte Leistung gemessen) Daher wurden auch die in der Matrix verwendeten Fluenzen für jedes Material spezifisch gewählt.

Die Anzahl der Laserpulse variierten dabei von einigen wenigen Pulsen bis hin zu einigen hundert.

Die auf diese Weise erzeugten Abtragsgeometrien wurden mittels des Oberflächenprofilometers *Sloan Dektak 3030* vermessen, wobei insbesondere die Tiefe von Bedeutung war.

Bei diesem taktilen Messverfahren fährt eine Messnadel mit einer definierten Auflagekraft von 10 mN geradlinig über die Oberfläche. Die abgefahrte Strecke kann dabei eingestellt werden. Die maximale Tiefe, welche durch das Gerät erfasst werden kann, liegt bei 120 µm, jedoch ist für die tatsächlich messbare Tiefe die Strukturgeometrie von großer Bedeutung.

Der Winkel der Messspitze beträgt 60 °; die Abmessung der für diesen Versuchsteil abgebildeten Quadratmaske liegt bei 50 x 50 µm.



$$z_{\max} = \frac{x/2}{\tan 30^\circ}$$

Damit beträgt die unter diesen Bedingungen maximal messbare Tiefe 43 µm.

Abb. 6.2: Messtiefe des Oberflächenprofilometers *Sloan Dektak 3030*.

Zur Reduzierung von Messfehlern wurde die Tiefe der jeweiligen Struktur je einmal in x-Richtung und einmal in y-Richtung gemessen. Hierbei war es wichtig, die Struktur mittig zu überfahren, da aufgrund der Kegelform der Messspitze eine zu geringe Tiefe gemessen werden kann wenn die Nadel auf dem Strukturrand aufliegt. Bei sehr geringen Anzahlen der Laserpulse ist es möglich, dass Inkubationserscheinungen auftreten. Bei sehr hohen Laserpulsanzahlen und damit größeren Strukturturen kann eine Defokussierung eintreten. Da somit abweichende Abtragsraten über die Laserpulsanzahl auftreten können wurde zunächst zu jeder Fluenz die Abtragstiefe über die Anzahl der Laserpulse graphisch dargestellt. Zur Berechnung der Abtragsrate wurden nun nur jene Wertepaare herangezogen, bei welchen sich noch ein linearer Zusammenhang zwischen Laserpulsanzahl und Abtragstiefe erkennen lies. Dazu wurde zu jeder hinzugezogenen Pulsanzahl die Abtragsrate, das heißt der Quotient aus Abtragstiefe und der Anzahl der eingestrahlenen Laserpulse, errechnet und deren Gesamtheit arithmetisch gemittelt.

Unter der Abtragsrate soll in dieser Arbeit also die pro Laserpuls ablatierte Tiefe bei einer bestimmten Fluenz verstanden werden.

Bei der Fluenz handelt es sich um eine physikalische Größe, welche die pro Laserpuls und bestrahlter Fläche auf ein Material eingestrahlte Energie wiedergibt.

An der Mikrobearbeitungsstation wird zur Bestimmung der Fluenz die mittlere Leistung der Laserstrahlung direkt in der Bearbeitungskammer gemessen.

Die mittlere Leistung ist wie folgt mit der Pulsenergie Q verbunden:

$$P_{av} = P_{max} \cdot \tau_H \cdot f_P = Q \cdot f_P \quad (1)$$

Dabei entsprechen P_{max} der maximalen Leistung eines Laserpulses, f_P der Repetitionsrate und τ_H der Halbwertsbreite eines Laserpulses.

Die Fluenz H errechnet sich damit zu:

$$H = \frac{Q}{A_{Abb.}} = \frac{P_{av}}{f_P \cdot A_{Abb.}} \quad (2)$$

Hierbei entspricht $A_{Abb.}$ der abgebildeten Maskenfläche, also dem Quotienten aus der eigentlichen Maskenfläche und dem Quadrat des Abbildungsmaßstabes von nach [10] $\beta = 26,67$.

Aus den fluenzabhängigen Abtragsraten der jeweiligen Materialien lassen sich sowohl die Schwellfluenz, als auch der Absorptionskoeffizient bestimmen. Nach dem Bouguer-Lambertschen Gesetz wird die Intensität in einem homogenen Medium exponentiell abgeschwächt.

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (3)$$

$I(z)$ entspricht hier der Intensität in der Materialtiefe z , I_0 der in das Material eingekoppelten Intensität und α dem Absorptionskoeffizienten.

Die Intensität I ist über folgende Beziehung mit der Fluenz H verknüpft:

$$I = \frac{P_{av}}{A_{Abb.}} = \frac{Q \cdot f_P}{A_{Abb.}} = H \cdot f_P \quad (4)$$

Da die Repetitionsrate f_P während der Bearbeitung als eingestellter Laserparameter konstant bleibt, gilt:

$$I \propto H \quad (5)$$

Und damit kann das Bouguer-Lambertsche Gesetz adäquat für die Fluenz genutzt werden.

$$\underline{\underline{H(z) = H_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z}}} \quad (6)$$

Geht man nun davon aus, dass bei jedem Puls ein Materialvolumen der Tiefe z , in welcher die Schwellfluenz erreicht ist, ablatiert wird, kann gesagt werden:

$$H_S = H_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (7)$$

In dieser Gleichung entspricht z den ermittelten Abtragsraten (pro Puls).

Die für die jeweilige Fluenz zu erwartende Abtragsrate (oder Abtragstiefe pro Puls) entspricht durch umstellen nach z also:

$$z = \frac{\ln(H_0/H_S)}{\alpha} \quad (8)$$

H_S und α stellen dabei für diese Wellenlänge eine Materialkonstante dar. Werden die ermittelten Abtragsraten der zugehörigen Fluenzen nun einer Regression mittels obiger Gleichung unterzogen, so erhält man sowohl die Schwellfluenz (den Schnittpunkt mit der Abszisse) sowie den Absorptionskoeffizienten der untersuchten Materialien

Im Anschluss an diesen Versuchsteil wurden in den verschiedenen Materialien Flächenabträge generiert. Da Excimer-Laser nur gepulst betrieben werden können, hängt der in das Material eingebrachte Energiebetrag sowohl von der Fluenz als auch von der Anzahl der je Flächenelement eingekoppelten Laserpulse ab.

Ziel dieses Versuchsteiles war es, die Prozessparameter bezüglich der Strukturqualität zu optimieren und den Einfluss unterschiedlicher Überlappungen, Frequenzen oder aber auch des Bearbeitungsregimes auf die Kantenneigung, die Bodenbeschaffenheit sowie auf die Strukturtiefe zu untersuchen.

Unter der *Pulsüberlappung* (oder kurz *ÜLP*) soll in der Folge das Verhältnis der beim Folgepuls erneut bestrahlten Länge auf der Probe zur bestrahlten Gesamtlänge pro Puls in einer Dimension verstanden werden.

Eine flächige Bearbeitung findet dabei immer durch in eine Richtung aneinander gereihte Einzelpulse statt, während die andere Dimension noch nicht verstellt wird.

Ist die Gesamtausdehnung der Struktur in eben jener Dimension erreicht, so wird die Ausgangsposition diese Reihe angefahren und in der zweiten Dimension versetzt worauf erneut eine Reihe abgearbeitet wird (siehe Abb. 6.3).

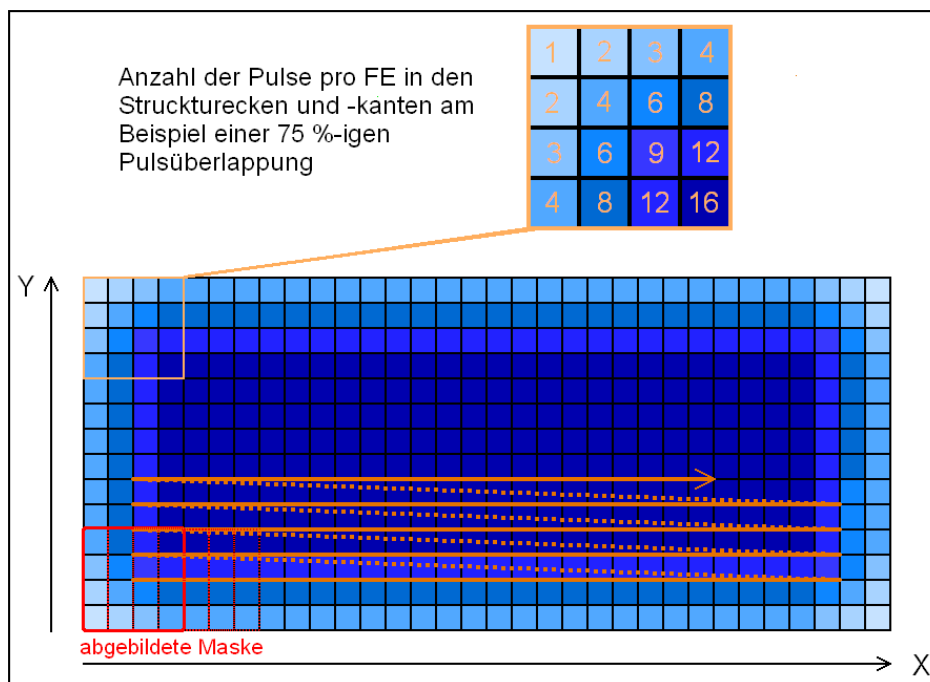


Abb. 6.3: Bearbeitungsregime eines Flächenabtrages.

Eine Pulsüberlappung von 95 % bei einer abgebildeten Quadratmaske von 50 μm Kantenlänge entspricht also einem Versatz der Probe zwischen zwei Pulsen von 2,5 μm . Diese Strecke wird im Folgenden als *Puls-zu-Puls-Distanz* (oder -Abstand) bezeichnet. Zu beachten ist bei dieser Form der Flächenstrukturierung, dass bei einer Halbierung der Puls-zu-Puls-Distanz die Anzahl der Einzelpulse und damit die eingekoppelte Energie je Flächenelement je Überfahrt vervierfacht wird, da im Rahmen dieser Diplomarbeit für den ÜLP in der x-Richtung stets der selbe Wert wie für die y-Richtung verwendet wurde. Unter einer *Überfahrt* soll in dieser Arbeit die einmalige Bearbeitung der Probe in ihrer gesamten Strukturgröße, wie es in Abbildung 6.3 gezeigt ist, verstanden werden. Auf diese Weise kann die eingekoppelte Energie nicht nur über die Fluenz und die Überlappung, sondern auch über die Wiederholungen der Überfahrten vergrößert werden.

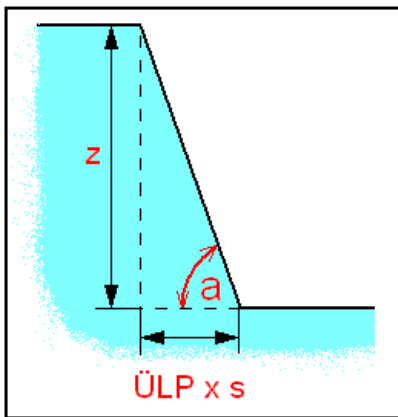
Ebenfalls kann man aus Abbildung 6.3 entnehmen, warum es bei dieser Vorgehensweise des Flächenabtrages zu geneigten Strukturkanten kommt. In den Strukturecken wird je Überfahrt nur ein Laserpuls eingekoppelt. Drückt man den ÜLP als Bruch aus, beispielsweise 75 % als $\frac{3}{4}$ oder 95 % als $\frac{19}{20}$, so entspricht die Laserpulszahl entlang der Strukturkante dem Nenner und im Strukturinneren dem Quadrat des Nenners.

So werden je Überfahrt bei einem Pulsüberlapp von 75 % im Strukturinneren 16 Pulse je Flächeneinheit eingekoppelt, bei 90 % sind es bereits 100 Pulse und bei 95 % 400 Pulse. Da die Pulsanzahl also zum Strukturinneren ansteigt, und damit auch die eingekoppelte Energie, nimmt auch die Strukturtiefe zum Inneren hin bis zu einem Maximum zu. Der Strukturboden bildet sich aufgrund der gleichen Anzahl an eingekoppelten Laserpulsen eben aus.

Daran erkennt man, dass sich bei höheren Pulsüberlappungen und gleicher Anzahl der Überfahrten steilere Kanten ausbilden sollten, da hier größere Tiefen erreicht werden. Jedoch lassen sich die Strukturturen bei sehr hohen Überlappungen nur schlecht abtufen.

Die Kantenneigung setzt sich aus der Größe der abgebildeten Maske, der Pulsüberlappung und der erzeugten Strukturtiefe zusammen. So ist die maximale Anzahl der Laserpulse pro Flächeneinheit (FE) im Abstand von ÜLP multipliziert mit der Maskenkantenlänge s erreicht. Bei einer Quadratmaske von 50 μm x 50 μm (Kantenlänge s) in der Abbildung und einem Pulsüberlapp von 90 % also in einem Abstand von 45 μm zur Strukturkante.

Bei einer Strukturtiefe von z ergibt sich der Tangens des Neigungswinkels α also zu:



$$\tan \alpha = \frac{z}{\ddot{U}LP \cdot s}$$

Abb. 6.4: Theoretischer Kantenneigungswinkel bei der erreichten Strukturtiefe z.

In der Folge wurden Versuchsfelder erzeugt, in welchen quadratische Flächenabträge einer Kantenlänge von 300 µm unter unterschiedlichen Parametern ablatiert wurden. Variiert wurden dabei die Pulsüberlappung bei konstanter Fluenz sowie die Fluenz bei konstantem ÜLP. Zudem wurde die Anzahl der Überfahrten variiert um ein eventuelles Verhalten derer Anzahl auf die Strukturtiefe zu prüfen. Bei diesen Versuchen betrug die Laserfrequenz immer 100 Hz.

Die Tiefen sowie die mittleren Rauigkeiten R_a der Strukturen wurde erneut mit dem Oberflächenprofilometer Sloan Dektak 3030 gemessen.

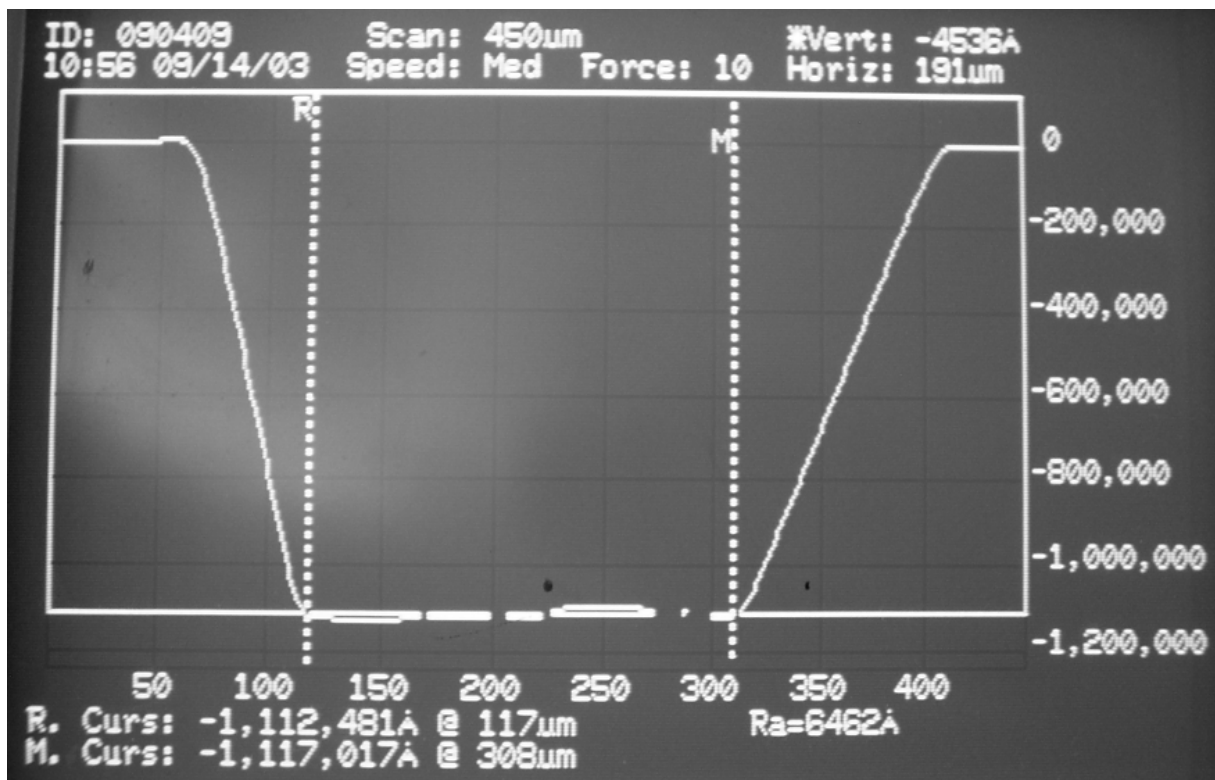


Abb. 6.5: Beispiel einer Rauigkeitsmessung mittels Sloan Dektak 3030.

6.1.2 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Corning 7980

Für die Bestimmung der Abtragsraten wurden bei diesem Quarzglas Fluenzen zwischen $1,0 \text{ J/cm}^2$ und $4,0 \text{ J/cm}^2$ gewählt. Die Laserpulsanzahlen lagen dabei im Bereich von einem Puls bis 1000 Pulse.

Die Abtragstiefen verhalten sich bei Corning nahezu linear zu der Anzahl der Laserpulse, obwohl Tiefen von bis zu etwa $35 \mu\text{m}$ gemessen wurden. Die Tiefen der mit 1000 Pulsen gefertigten Strukturen konnten aus den in Punkt 6.1.1 geklärten Gründen nicht gemessen werden. Eine graphische Darstellung dieser Tiefen über die Laserpulsanzahl ist in der Anlage abgebildet. Die Abtragsraten der jeweiligen Fluenzen sind im unten dargestelltem Diagramm zu sehen.

Die Wertepaare wurden wie in 6.1.1 beschrieben einer Regression unterzogen, was durch die rote Kurve dargestellt wird.

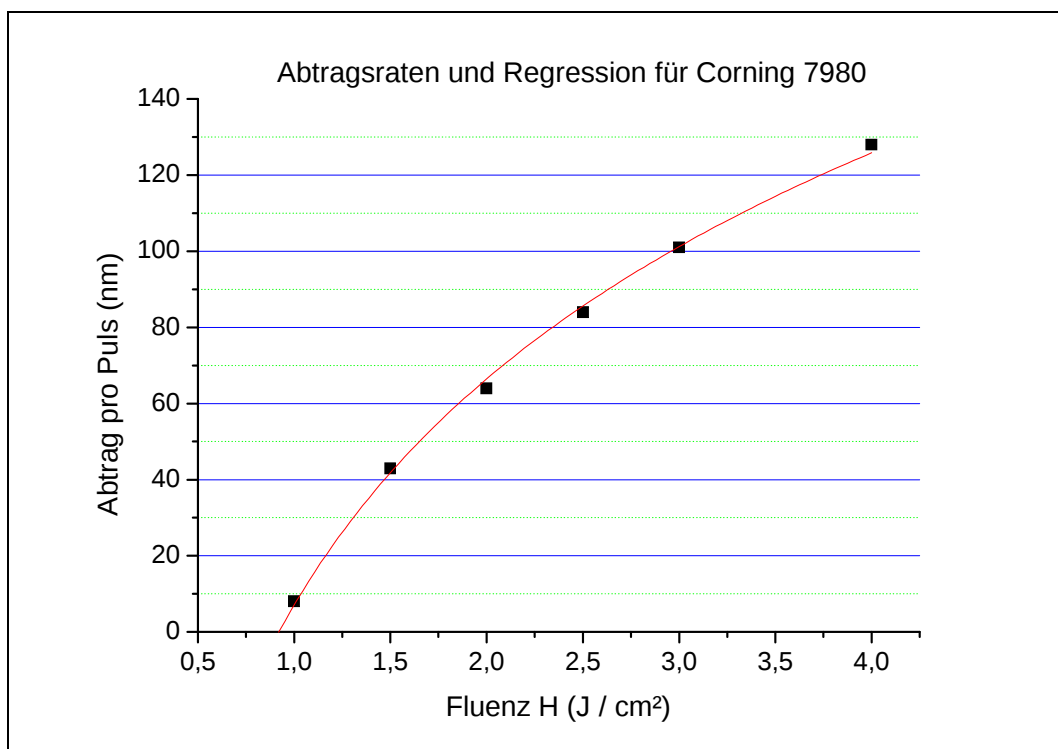


Abb. 6.6: Abtragsrate pro Puls in Corning 7980 bei 200 Hz.

Mit Hilfe der Regression wurde die Schwellfluenz für Corning 7980 zu $0,92 \text{ J/cm}^2$ berechnet. Der Absorptionskoeffizient von Corning 7980 errechnete sich zu $11,7 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$. Insbesondere bei Strukturen zunehmender Tiefe traten Verunreinigungen der Randzonen durch Debris auf. Ein Versuch ihn zu entfernen wurde in diesem Versuchsteil noch nicht unternommen.

Die Flächenabträge bei konstanter Fluenz wurden mit $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$ vorgenommen.

Tabelle 6.1: Übersicht der Pulse / FE bei verschiedenen Parametern.

		Anzahl der Überfahrten					
		1	2	4	8	16	32
Pulsüberlappung	90%	100	200	400	800	1600	3200
	95%	400	800	1600	3200	-	-
	97,50%	1600	3200	6400	-	-	-
	98,75%	6400	-	-	-	-	-

In Tabelle 6.1 ist eine Übersicht der Laserpulsanzahlen bei verschiedenen Kombinationen der Pulsüberlappung und der Anzahl der Überfahrten gegeben.

So liegt die Anzahl der Laserpulse pro Flächenelement bei einer Überfahrt und 90 % Pulsüberlappung bei 100, bei 95 % bei 400, bei 97,5 % Pulsüberlappung liegt sie bei ebenfalls einer Überfahrt bereits bei 1600 und bei 98,75 bei 6400 Laserpulsen pro Flächenelement. Die Kombination dieser Parameter wurde nun so gewählt, dass bei konstanter Pulsüberlappung überprüft werden kann, ob sich bei Erhöhung der Anzahl der Überfahrten und damit der eingebrachten Laserpulse / FE die erzeugte Strukturtiefe linear zu dieser Laserpulsanzahl verhält.

Auch kann untersucht werden, wie sich die Pulsüberlappung auf die Strukturtiefe auswirkt. So sind bei den verschiedenen Pulsüberlappungen stets Kombinationen gewählt, welche sich aufgrund ihrer Pulszahlen direkt mit anderen Pulsüberlappungen vergleichen lassen. Beispielsweise werden bei 90 % ÜLP und 16 Überfahrten ebenso wie bei 95 % ÜLP und 4 Überfahrten und 97,5 % und 1 Überfahrt jeweils 1600 Pulse (vgl. Tabelle 6.1) je Flächeneinheit in das Material eingebracht. Dies lässt bei gleichen Fluenzen die Erwartung zu, dass sich die so erzeugten Strukturen in ihrer Tiefe nicht, oder nur geringfügig, unterscheiden.

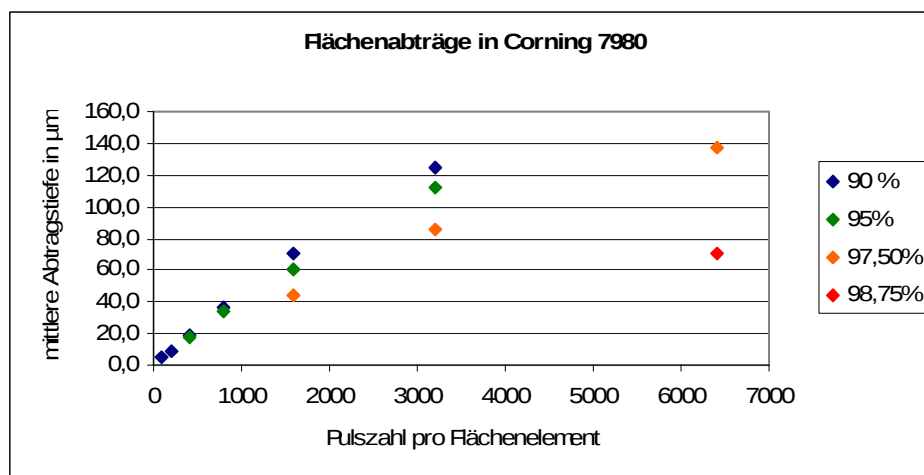


Abb. 6.7: Erreichte Strukturtiefen der Flächenabträge in Corning 7980.

In Abbildung 6.7 sind die mittleren Strukturtiefen der Flächenabträge den hierzu aufgewendeten Laserpulsanzahlen gegenübergestellt. Man sieht, dass sich die Strukturtiefe bei einer Pulsüberlappung von 90 % zur Laserpulsanzahl annähernd linear verhält. Dass dieser Verlauf mit zunehmender Strukturtiefe etwas abflacht kann mit einer zunehmenden Defokussierung des Laserstrahles, und damit einhergehend einer geringer werdenden Fluenz am Strukturboden erklärt werden. Bei 95 % ÜLP zeichnet sich bereits ab, dass die Strukturen mit Erhöhung der Pulsüberlappung unter Beibehaltung der Pulszahl pro Flächeneinheit geringere Abtragstiefen erreichen.

Besonders deutlich zeigt sich dies beim Vergleich der Strukturen, welche mit 97,5 % Pulsüberlappung und 4 Überfahrten beziehungsweise bei 98,75 % ÜLP mit einer Überfahrt erzeugt wurden. Bei beiden Strukturen beträgt die Laserpulsanzahl je Flächenelement 6400. Und auch die Fluenz war bei beiden Strukturierungen gleich ($2\text{J}/\text{cm}^2$). Wie in Abbildung 6.7 dargestellt, ist die mit geringerem Pulsüberlapp erzeugte Struktur mit annähernd $140\text{ }\mu\text{m}$ etwa doppelt so tief wie jene, die mit höherem Pulsüberlapp gefertigt wurde. Diese weist eine Tiefe von circa $70\text{ }\mu\text{m}$ auf und ist damit etwa so tief wie die mit 90 % Pulsüberlappung und 16 Überfahrten generierte Struktur. Es ist also eine Strukturierung mit Pulsüberlappungsgraden von 90 oder 95 % zu bevorzugen. Die Vorteile äußern sich bei dieser Bearbeitungsstrategie wie folgt:

Durch die mehrschichtige Bearbeitung kann zwischen den einzelnen Überfahrten eine Leistungsmessung in kürzeren zeitlichen Abständen vorgenommen, und so besser auf eventuelle Leistungsschwankungen des Lasers reagiert werden. Zu dem lässt sich die Strukturtiefe aufgrund der feineren Stufung durch diese Vielzahl von Schichten besser und feiner steuern. Hinzu kommt, dass um eine gewünschte Strukturtiefe zu erreichen bei geringeren Überlappungsgraden weniger Laserpulse notwendig sind, was sich positiv auf die Bearbeitungsdauer wie auch auf die Langzeitstabilität des Lasers auswirkt.

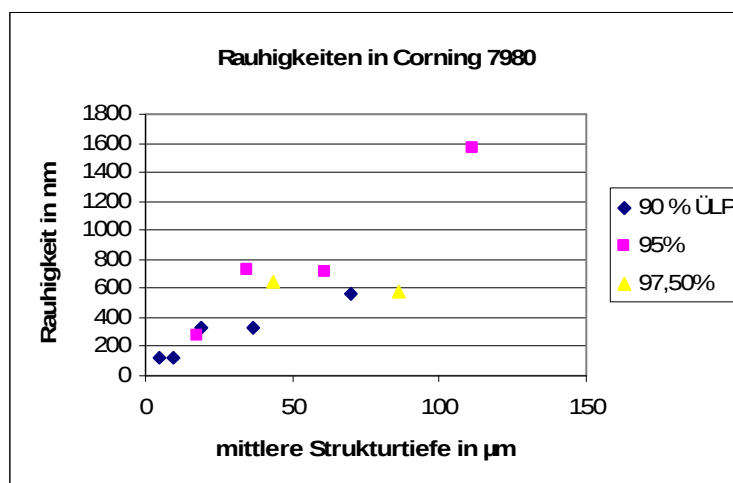


Abb. 6.8: Rauigkeiten der Flächenabträge in Corning.

In Abbildung 6.8 sind die Rauigkeiten der Strukturböden über die jeweilige Strukturtiefe abgebildet. Es zeigte sich, dass die Prozessparameter einen geringen und nicht eindeutigen Einfluss auf die Rauigkeiten nehmen. Prinzipiell kann aber davon ausgegangen werden, dass die Rauigkeit mit zunehmender Strukturtiefe zunimmt. Es zeigte sich auch, dass bei tieferen Strukturen Gräben am Rand der Böden unmittelbar im Anschluss an die geneigten Strukturwände, vermutlich durch Reflexion, auftreten. Diese Gräben wurden bei der Ermittlung der Rauigkeit mit gemessen.

Im anschließenden Versuchsteil wurden Flächenabträge bei verschiedenen Fluenzen generiert. Hierbei wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 400 Pulsen/FE durchgeführt.

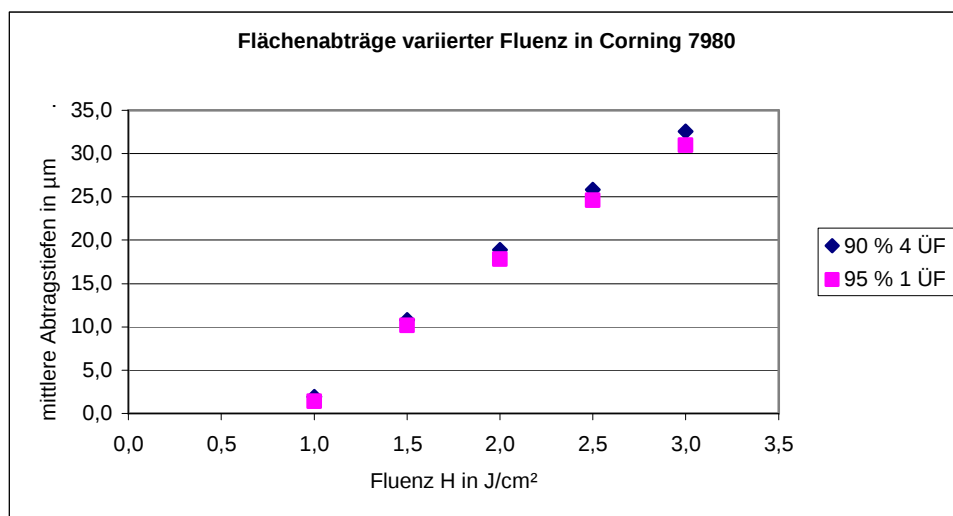


Abb. 6.9: Strukturtiefen von Flächenabträgen bei variiert Fluenz.

Wie schon bei der Variation der Pulsüberlappung zeigte sich, dass die Abtragstiefe bei größerer Puls-zu-Puls-Distanz ebenfalls größer ist. Gemäß dem Absorptionsgesetz (siehe 6.1.1) beschreiben die Abtragstiefen (und aufgrund der festen Laserpulsanzahl auch die Abtragsraten) einen logarithmischen Verlauf. Auffällig ist jedoch, dass die Abtragsraten durchweg geringer sind als sie im ersten Versuchsteil ermittelt wurden. In Abbildung 6.10 sind die mittels Einzelabträgen ermittelten Abtragsraten denen durch Flächenabträge bestimmten gegenübergestellt.

Jene durch Einzelabtrag festgestellten liegen circa 20 % höher. Weitere ÜLP wurden unter diesem Gesichtspunkt nicht untersucht, da diese wie bereits gezeigt eine zu grobe Abstufung der pro Überfahrt erzeugten Strukturtiefe zulassen und aufgrund der deutlich zunehmenden Prozessdauer je Überfahrt zu ineffektiv sind.

So bedingt eine Halbierung der Puls-zu-Puls-Distanz in x- sowie in y-Richtung eine Vervielfachung der Bearbeitungsdauer pro Abtragsschicht während die so erzeugte Struktur nicht die vierfache Tiefe pro Schicht erreicht.

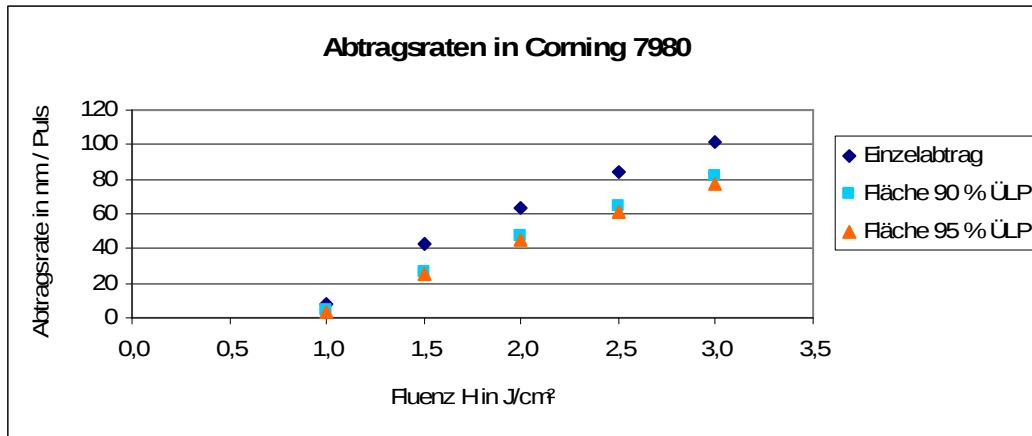


Abb. 6.10: Übersicht der verschiedenen Abtragsraten für Corning 7980, die Abtragsraten der Flächenabträge wurden dabei über 400 Laserpulse gemittelt, die Frequenz betrug 100 Hz.

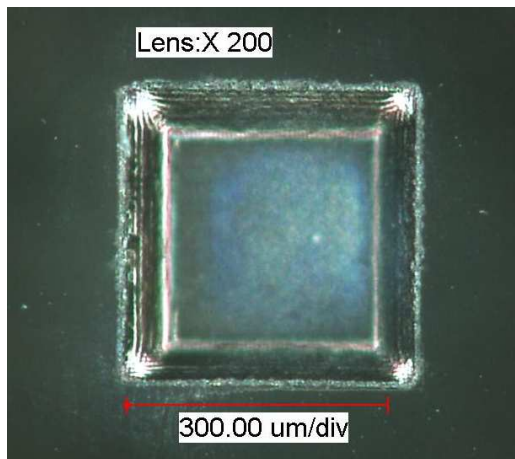


Abb. 6.11: Flächenstruktur erzeugt mit 2,0 J/cm², 90 % ÜLP und 32 Überfahrten. Die Strukturtiefe beträgt etwa 125 µm.

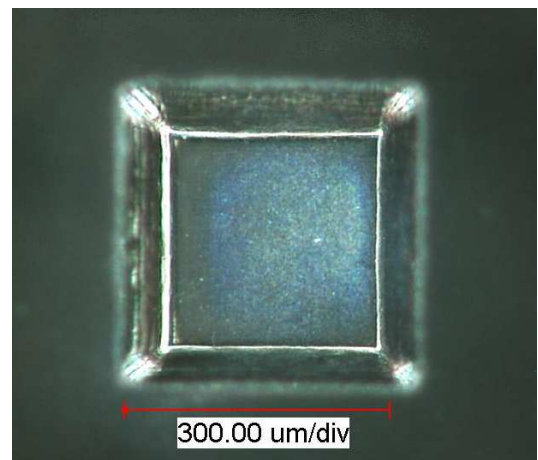


Abb. 6.12: Flächenstruktur erzeugt mit 2,0 J/cm², 90% ÜLP, und 32 Überfahrten hier auf den Strukturboden fokussiert.

Auf den Abbildungen sind leichtes Debris und kleinste Ausplatzungen der Strukturkanten zu erkennen. Das Debris ließ sich durch eine Reinigung mit Ethanol größtenteils entfernen, was aber vermutlich zu den Ausplatzungen führte. Eine Reinigung mit Zelluloseacetat ist für solche Strukturen vorzuziehen. Der Strukturboden wirkt eben und weist direkt nach der Bearbeitung keine Ablagerungen auf. An den Strukturwänden können allerdings in der Abbildung 6.11 die Stufen des Pulsversatzes erkannt werden. In den Anlagen 7 und 8 sind Tabellen mit den erreichten Strukturturen der verschiedenen Parameterkombinationen hinterlegt.

6.1.3 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für D263T

Zur Ermittlung der Abtragsraten im Borosilikatglas D263T wurden Fluenzen von $0,75 \text{ J/cm}^2$ bis $3,0 \text{ J/cm}^2$ verwendet. Da sich bei den Grundlagenuntersuchungen von Corning 7980 zeigte, dass die Tiefe der mit nur einem Puls generierten Abträge aufgrund des ungleichmäßigen Abtrags nicht bestimmbar ist, wurde die Anzahl der Laserpulse der Einzelabträge diesmal zwischen 10 Pulsen und 1000 Pulsen variiert.

Auch bei D263T konnte ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Pulsanzahl und der Ablationstiefe ermittelt werden. Ein Diagramm der Abtragstiefen ist in der Anlage 2 dargestellt.

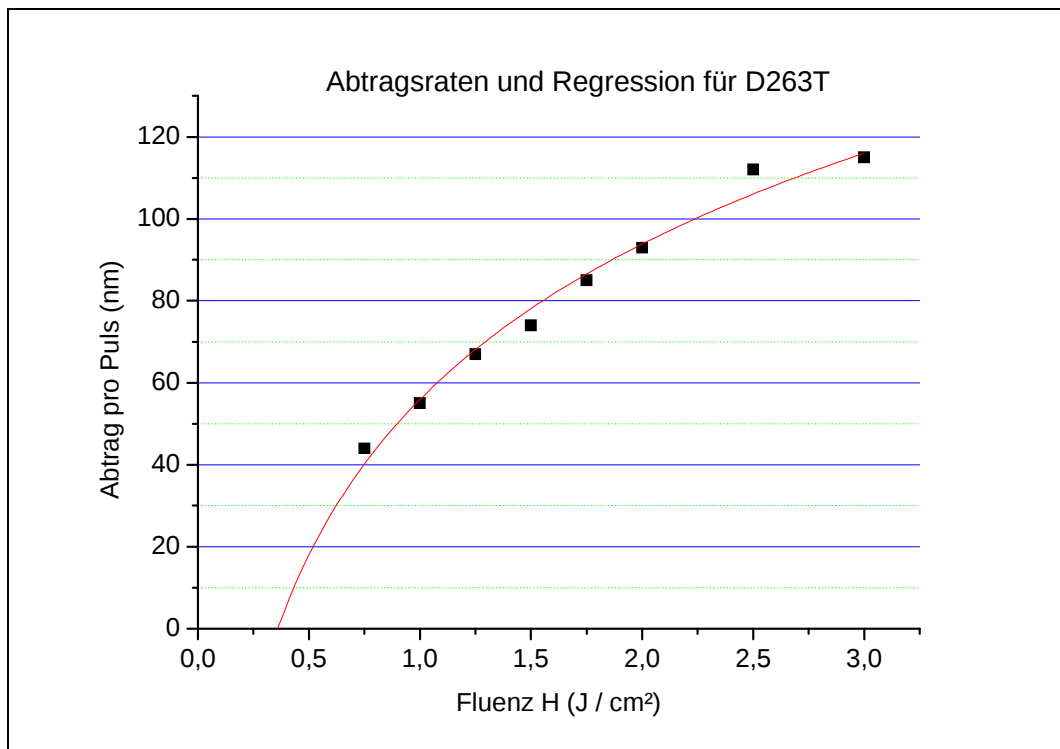


Abb. 6.13: Abtragsrate pro Puls in D263T bei 200 Hz.

Für das Borosilikatglas ergab sich mittels der Regression eine Schwellfluenz von $0,36 \text{ J/cm}^2$ sowie ein Absorptionskoeffizient von $18,3 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

Es war auch bei hohen Fluenzen und Laserpulsanzahlen kaum Debris zu bemerken, die Strukturen selbst wiesen sehr saubere Kanten ohne Ausplatzungen auf.

Bei D263T wurden die Flächenabträge mit variiertem Pulsüberlapp bei Fluenzen von $2,0 \text{ J/cm}^2$ sowie $3,0 \text{ J/cm}^2$ durchgeführt.

Die Variationen der Überlappung und der Anzahl der Überfahrten entsprechen denen von Corning. Hierbei entstanden Strukturen bis ca. $280 \text{ }\mu\text{m}$ Tiefe. Da mit dem Oberflächenprofilometer keine solchen Tiefen gemessen werden können, wurde dies mit Hilfe eines Digitalmikroskopes der Firma Keyence im Auflichtmodus durchgeführt.

Hierbei wurde wie bereits bei Corning 7980 festgestellt, dass die Abtragsrate mit Zunahme der Pulsüberlappung geringer wird.

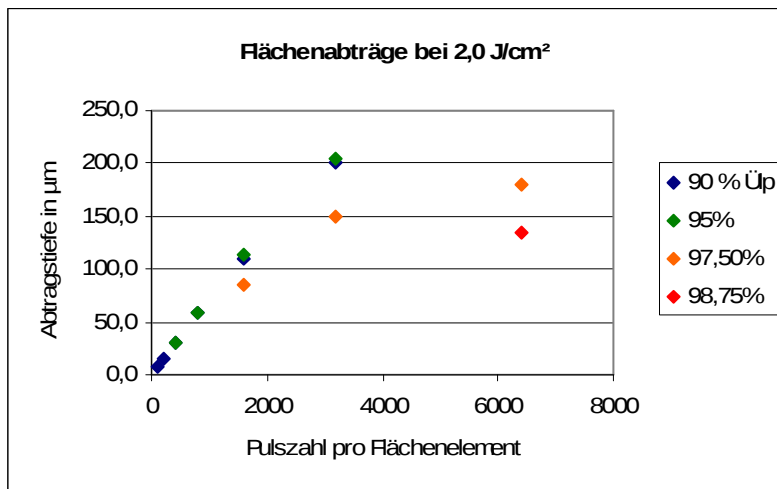
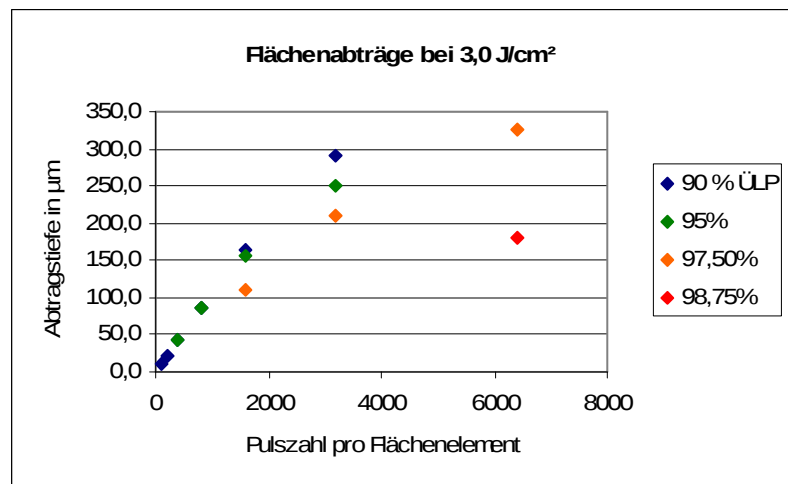


Abb. 6.14: Abtragstiefen der bei $2,0 \text{ J/cm}^2$ erzeugten Strukturen.

Abb. 6.15: Abtragstiefen der bei $3,0 \text{ J/cm}^2$ erzeugten Strukturen.



Es zeigte sich, dass die Abnahme der Abtragstiefe bei der Änderung des Pulsüberlapps von 90 % auf 95 % durch Erhöhung der Fluenz noch deutlicher wurde.

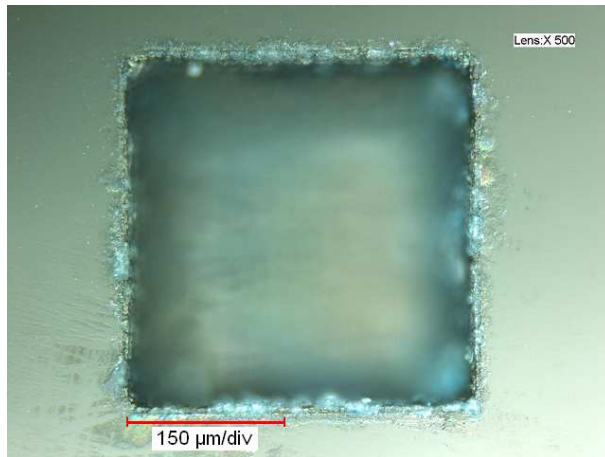
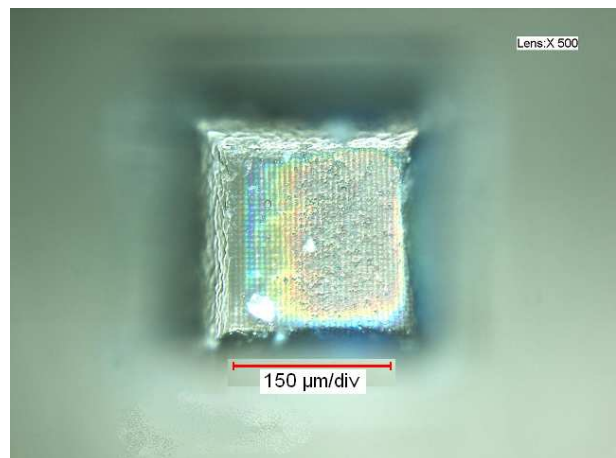


Abb. 6.16: Flächenstrukturierung mittels 2 J/cm², 90 % ÜLP und 16 Überfahrten.

Deutlich sind Ablagerungen um die Struktur und an deren Wänden zu erkennen. Diese ließen sich durch Zelluloseazetat entfernen. Die Strukturtiefe beträgt etwa 110 µm.

Abb. 6.17: Strukturierung unter Verwendung von 3 J/cm², 90 % ÜLP und 16 Überfahrten, hier auf den Strukturboden fokussiert.

Diese Struktur weist eine Tiefe von etwa 165 µm auf. Man erkennt Ablagerungen auf dem Strukturboden, welcher sonst sehr eben ist. Der Strukturboden hat eine Größe von 170 µm x 170 µm und ist somit kleiner als in 6.1.1 beschrieben. Dies weist darauf hin, dass sich der Kantenwinkel bei Zunahme der Strukturtiefe nicht beliebig stark den 90 ° annähert und der Strukturboden nicht stets der Oberflächengeometrie abzüglich eines vom Überlapp abhängigen Wertes entspricht, sondern dieser Winkel ein Maximum erreicht, ab welchem er nicht mehr zunimmt, sondern der Boden kleiner wird. Dies ist vermutlich der stärkeren Reflexion an der Strukturwand bei kleineren Einfallswinkeln sowie der geringer werdenden einwirkenden Fluenz an geneigten Ebenen (die bestrahlte Fläche wird größer) geschuldet. In obiger mit 3 J/cm² gefertigter Struktur beträgt der Kantenwinkel etwa 61 °.



Bei einer Erhöhung des Überlapps zeigte sich eine geringer werdende Zunahme der Abtragstiefe bei konstanten Pulszahlen je FE, wie es schon bei Corning 7980 zu erkennen war. Hinzu kam noch eine zunehmende Verunreinigung des Strukturbodens bis hin zum Zusetzen der gesamten Struktur mit Abtragsprodukten. Diese Verunreinigungen waren auch nur bedingt mit Zelluloseazetat zu entfernen, da bei dieser Reinigungsmethode nur die oberen Schichten des Debris benetzt werden konnten.

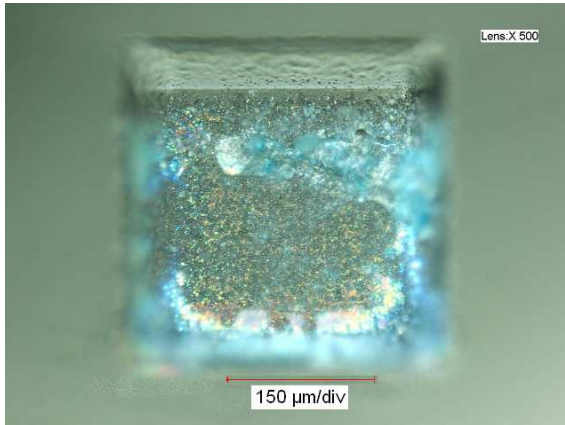


Abb. 6.18: Struktur gefertigt mit 3 J/cm², 95 % Pulsüberlapp und einer Überfahrt.

Abb. 6.19: Struktur mit 3 J/cm² aber 97,5 % Pulsüberlappung bei ebenfalls einer Überfahrt gefertigt.

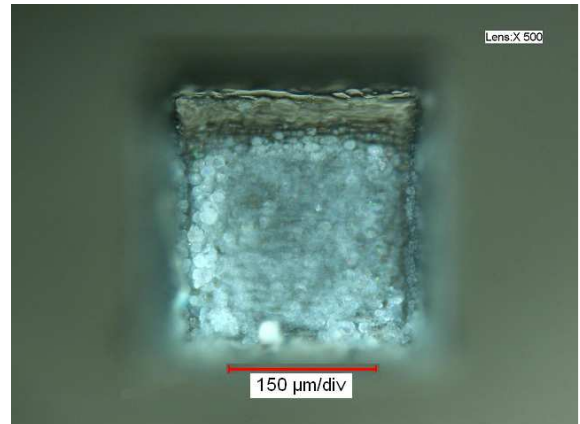
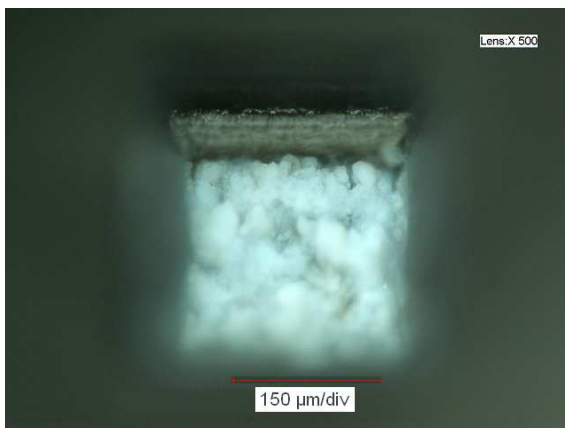


Abb. 6.20: Bei einer Überlappung von 98,75 % ist bei sonst gleichen Parametern der gesamte Strukturboden bedeckt.

Es empfiehlt sich das Borosilikatglas D263T mit 90 % Pulsüberlappung zu bearbeiten, da sich hier die deutlich am wenigsten verunreinigten Strukturen erzeugen lassen. Zudem gelten wieder die allgemeinen Vorteile wie die bessere Abstufung der Strukturtiefen und die bessere zeitliche Effizienz für eine ähnliche oder vergleichbare Abtragstiefe. Zudem sollte stets bedacht werden, dass der Laser im zeitlichen Verlauf einem Leistungsabfall bei gleicher Pumpspannung unterliegt und auch die Atmosphäre im Strahlengang bei langen Bearbeitungszyklen verschmutzen kann, was eine erhöhte Absorption der Laserstrahlung bewirkt. Da jedoch keine Möglichkeit besteht die Laserleistung während des Bearbeitungsprozesses zu messen oder zu überwachen kann dies nur vor und nach dem Prozess erfolgen. Daher bietet es sich an den Ablationsprozess in mehrere kurze (weniger Minuten Dauer) zu unterteilen. Auf diese Weise kann besser auf die Laserleistung und damit direkt auf das Bearbeitungsergebnis Einfluss genommen werden.

6.1.4 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Kalziumfluorid

Bei Kalziumfluorid wurden zunächst Einzelabträge bei Fluenzen zwischen $1,25 \text{ J/cm}^2$ und 3 J/cm^2 mit Laserpulsanzahlen von 5 bis 1000 erzeugt. Hierbei zeigte sich, dass bei Fluenzen von weniger als $2,0 \text{ J/cm}^2$ offensichtlich Inkubationseffekte auftraten (vgl. Diagramm). Dies wurde hier noch nicht näher untersucht (in Kapitel 6.3). Jedoch wurden nur die Messungen für Fluenzen ab $2,0 \text{ J/cm}^2$ in die Regression einbezogen.

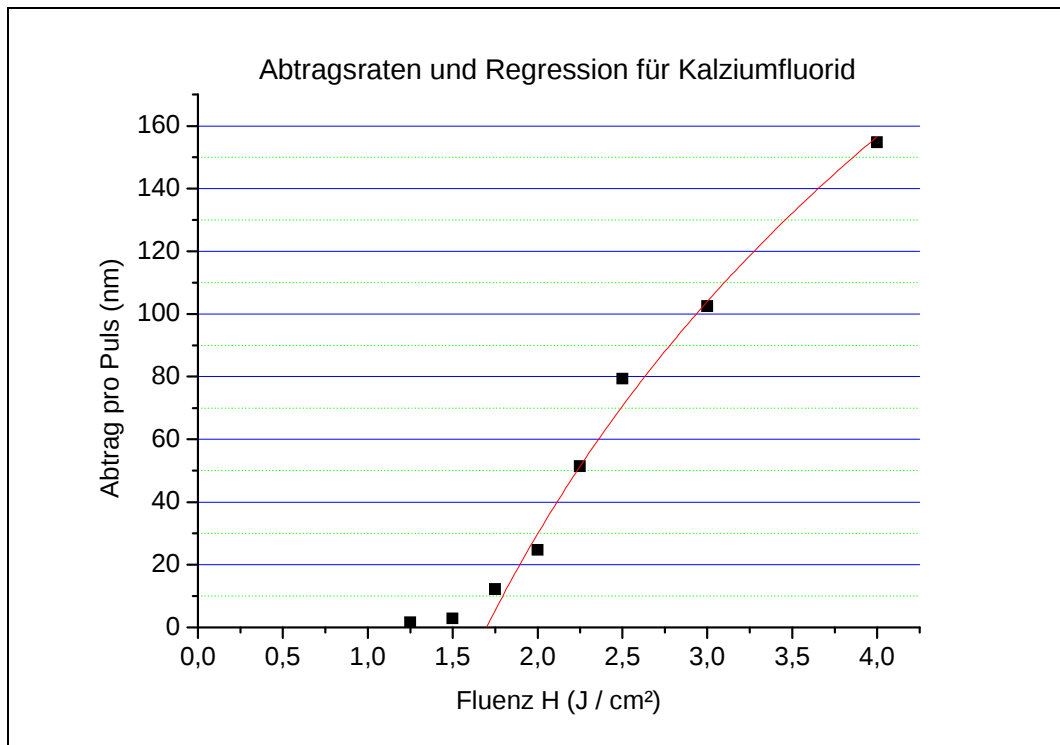


Abb. 6.21: Abtragsrate pro Puls in Kalziumfluorid bei 200 Hz.

Die aus den Strukturierungsergebnissen gewonnenen Daten ermöglichen die rechnerische Bestimmung der Schwellfluenz mit einem Wert von $H_s = 1,7 \text{ J/cm}^2$ und des Absorptionskoeffizienten, welcher für Kalziumfluorid $5,47 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ beträgt. Dieser ist damit etwa halb so groß wie beim Quarzglas Corning 7980. Die durch Laserablation erzeugten Strukturen wiesen dabei nahezu keine Ablagerungen sowohl an den Strukturkanten als auch an den Randbereichen auf.

Wie schon bei dem Borosilikatglas wurden die Flächenstrukturierungen auch bei Kalziumfluorid sowohl mit $2,0 \text{ J/cm}^2$ als auch $3,0 \text{ J/cm}^2$ durchgeführt. Die Variationen von Pulsüberlappung und der Anzahl der Überfahrten entsprechen denselben wie bei Quarz- und Borosilikatglas.

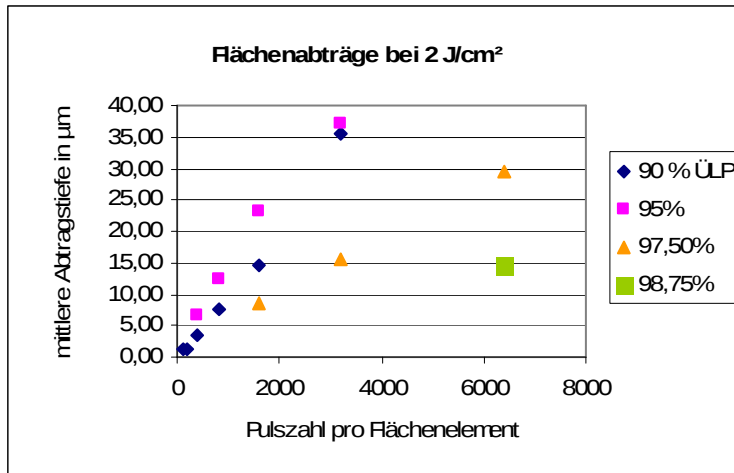


Abb. 6.22: Abtragstiefen der bei $2,0 \text{ J/cm}^2$ erzeugten Strukturen.

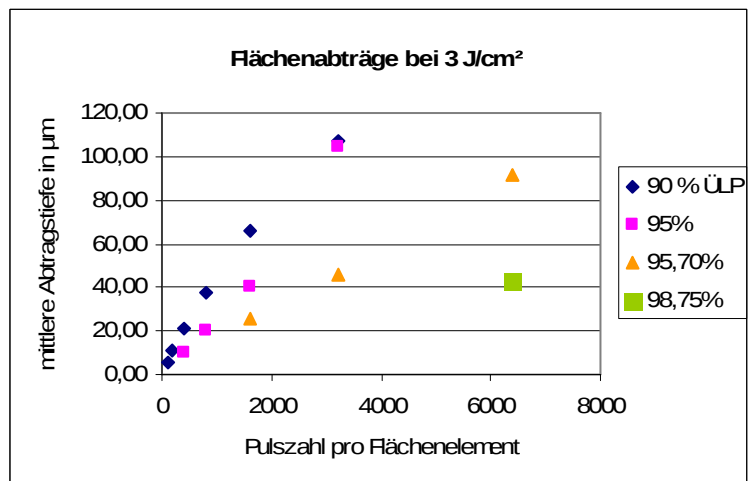


Abb. 6.23: Abtragstiefen der bei $3,0 \text{ J/cm}^2$ erzeugten Strukturen.

In diesem Versuchsteil zeigte sich auch der bei den bisher untersuchten Materialien aufgetretene Trend, dass sich der Abtrag mit Zunahme der Pulsüberlappung und gleichen Laserpulsanzahlen / FE verringert. Jedoch zeigt sich dieses Verhalten hier bei 90 % bzw. 95 % Pulsüberlapp nicht so deutlich wie beispielsweise bei Corning 7980. So ist der Abtrag bei gleicher Anzahl der Laserpulse für eine Fluenz von $2,0 \text{ J/cm}^2$ bei 95 % sogar größer als bei 90 %. Besonders auffällig ist aber die Abweichung der hier zur Wirkung kommenden Abtragsraten pro Puls von den durch die Einzelabträge bestimmten. Lagen diese durch Einzelabtrag ermittelten Abtragsraten für $2,0 \text{ J/cm}^2$ bei etwa 25 nm und bei einer Fluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ bei circa 100 nm so werden bei der Flächenstrukturierung nur etwa 10 nm bei $2,0 \text{ J/cm}^2$ bzw. 55 nm bei $3,0 \text{ J/cm}^2$ und einem Pulsüberlapp von 90% erreicht. Damit liegt sie bei der Flächenstrukturierung etwa bei der Hälfte der durch Einzelabträge ermittelten Werte.

Da bei Kalziumfluorid die Fluenz einen sehr großen Einfluss auf die Abtragstiefe hat (bei keinem bisher untersuchten Material hatte das Erhöhen der Fluenz eine Verdreifachung der Abtragsrate bei der Flächenstrukturierung nach sich gezogen, siehe Abbildungen 6.22 und 6.23) gilt dies selbstverständlich auch für ungewollte Leistungsschwankungen des Lasers. Somit sind sehr große Pulsüberlappungen zu vermeiden um eine regelmäßige Leistungsmessung und entsprechende Veränderung der Abschwächerstellung zu realisieren.

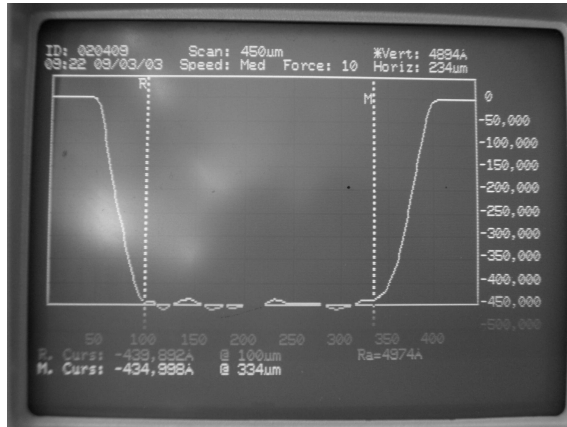
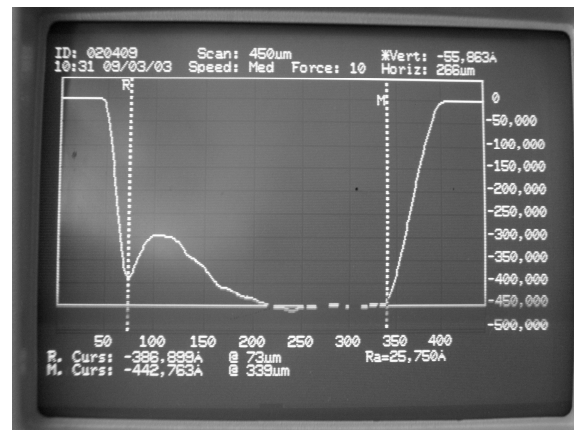


Abb. 6.25: Topographie des gleichen Strukturbodens, gemessen in y-Richtung.

Abb.6.24: Beispiel einer Strukturtopographie gefertigt bei $3,0 \text{ J/cm}^2$ und einer Überfahrt bei 98,75 % Pulsüberlapp, gemessen in x-Richtung.



Wie im Punkt 6.1.1 erläutert, findet der Flächenabtrag durch einen linienhaften Abtrag entlang der x-Richtung und einen schrittweisen Versatz in y-Richtung statt. Somit ist der Zeitraum vom Beginn der Strukturierung bis zu deren Ende, also der Zeit, in welcher die y-Ausdehnung der Struktur bearbeitet wird, sehr lang. An diesem Beispiel eines 98,75 %igen Pulsüberlappes bei 100 Hz Laserfrequenz und einem Strukturabmaß von $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ handelt es sich dabei um eine Prozesszeit von ca. 45 Minuten. Somit kann es aufgrund von Leistungsschwankungen des Lasers oder eine zunehmende Kontamination des Strahlenganges zu, wie in Abbildung 6.25 gezeigten, Abweichungen vom gewünschten, ebenen Strukturboden kommen. Dabei stellt der linke Rand des Profils der Messung in y-Richtung das Ende der Strukturierung dar. Die Pulsenergie wurde also zunächst geringer (etwa ab Strukturmitte) und wurde dann durch Erhöhung der Entladungsspannung wieder angeglichen.

Abb. 6.26: Lichtmikroskopische Aufnahme der Strukturoberfläche gefertigt mittels 3 J/cm^2 und 32 Überfahrten bei 90 % Überlapp. Die Strukturtiefe beträgt etwa $110 \text{ }\mu\text{m}$.

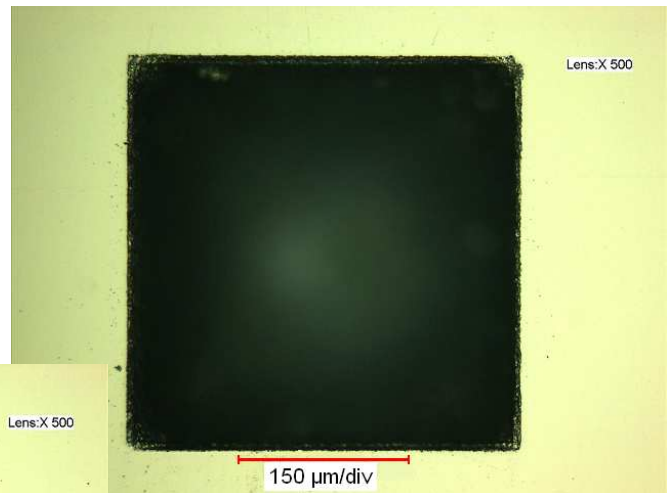
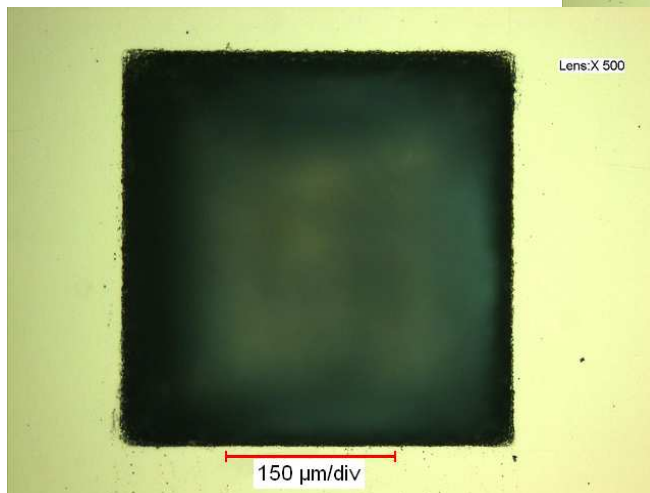


Abb. 6.27: Quadratstruktur ebenfalls mit 3 J/cm^2 jedoch 95 % Überlapp und 8 Überfahrten erzeugt, hier beträgt die Strukturtiefe ebenfalls circa $110 \text{ }\mu\text{m}$.

In Kalziumfluorid ließen sich Flächenabträge mit Tiefen jenseits der $100 \text{ }\mu\text{m}$ erzeugen. Diese weisen sehr gute Kantenqualitäten ohne Ausplatzungen und sehr wenig Debris auf. Auf obigen Abbildungen erkennt man in den Strukturrecken die geringere Abtragstiefe aufgrund der geringeren Pulsanzahlen und damit eingekoppelten Energie.

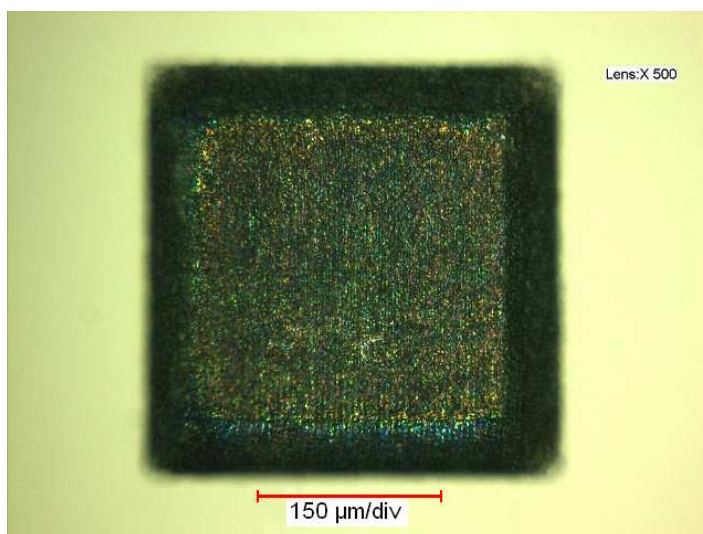


Abb. 6.28: Der Strukturboden eines mit 3 J/cm^2 , 95 % Pulsüberlapp und 2 Überfahrten gefertigten Flächenabtrages einer Tiefe um $20 \text{ }\mu\text{m}$.

6.1.5 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Magnesiumfluorid

Bei Magnesiumfluorid wurden die Grundlagenuntersuchungen nach dem gleichen Schema wie bei den bisher untersuchten Materialien durchgeführt. Doch bereits beim Abschätzen der ungefähren Schwellfluenz über das Verstellen des Abschwächers zeigte sich, dass bei Fluenzen um $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$ nur unregelmäßig ein Materialabtrag einsetzte. Bei Fluenzen ab etwa $3,5 \text{ J/cm}^2$ hingegen kam es sporadisch aber keineswegs selten zum Ausplatzen von Materialplättchen von zum Teil mehreren hundert μm Ausdehnung.

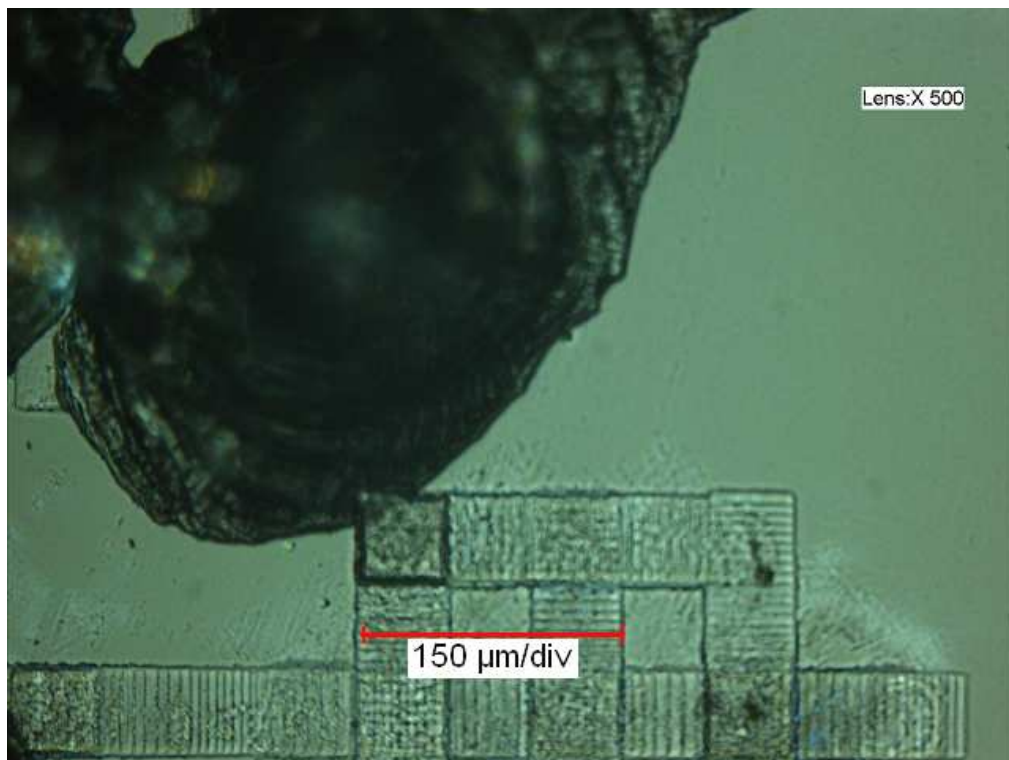


Abb. 6.29: Mikroskopische Aufnahme der Ausplatzungen in Magnesiumfluorid.

In obiger Abbildung kann erkannt werden, wie die Probe relativ zur abgebildeten Maske einer Kantenlänge von $50 \mu\text{m}$ verfahren wurde. Hierbei wurde die Transmission des Abschwächers während des Betriebs des Lasers erhöht, bis ein Abtrag einsetzte. Dies war gelegentlich bei einer Fluenz von 2 J/cm^2 der Fall, an anderen Stelle der Probe wiederum nicht. Diese Bereiche lagen jedoch durchaus nur wenige zehn μm voneinander entfernt. Bei etwa $3,0 \text{ J/cm}^2$ konnte ein regelmäßiger Abtrag festgestellt werden. Dies soll sich jedoch nicht auf die Abtragsrate beziehen sondern lediglich aussagen, dass der Materialabtrag ortunabhängig stattfand und es nicht zu Ausplatzungen kam. Bei einer Erhöhung der Fluenz auf $3,5 \text{ J/cm}^2$ kam es schlagartig zu Ausplatzungen, wie sie in der obigen Abbildung (dunkler Bereich) sichtbar sind. Entsprechend wurde die Bestimmung der Abtragsrate für Fluenzen

zwischen $2,0 \text{ J/cm}^2$ und $3,5 \text{ J/cm}^2$ und wie üblich einer Frequenz von 200 Hz durchgeführt. Bei der Tiefenbestimmung der so erzeugten Strukturen mit dem Oberflächenprofilometer Dektak 3030 musste festgestellt werden, dass die Tiefen nur einige zehn bis wenige hundert Nanometer betrugen. So lag sie beispielsweise bei $H = 3,0 \text{ J/cm}^2$ und 750 Pulsen bei lediglich 140 nm. In den Strukturen zeigten sich Aufwerfungen und kleine Ausplatzungen. Damit waren die Messwerte nicht geeignet durch eine Regression ausgewertet zu werden. Die Flächenstrukturierung erfolgte wie immer direkt im Anschluss an die Einzelabträge, also noch bevor diese ausgewertet wurden. Hierzu kamen bei Magnesiumfluorid Fluenzen von $3,0 \text{ J/cm}^2$ sowie $3,5 \text{ J/cm}^2$ bei der üblichen Variation der Pulsüberlappung und der Anzahl der Überfahrten zum Einsatz.

Des Weiteren wurden Flächenabträge bei 90 % ÜLP und 4 Überfahrten sowie 95 % Überlapp mit einer Überfahrt erzeugt. Hierbei wurden die Fluenzen von $2,25 \text{ J/cm}^2$ und $3,35 \text{ J/cm}^2$ genutzt. Die Repetitionsrate des Lasers betrug bei der Flächenstrukturierung 100 Hz.

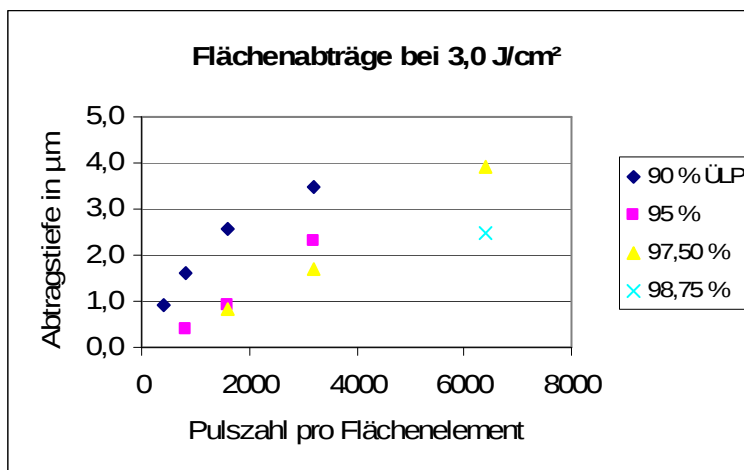


Abb. 6.30: Erreichte Strukturtiefen bei $H = 3,0 \text{ J/cm}^2$.

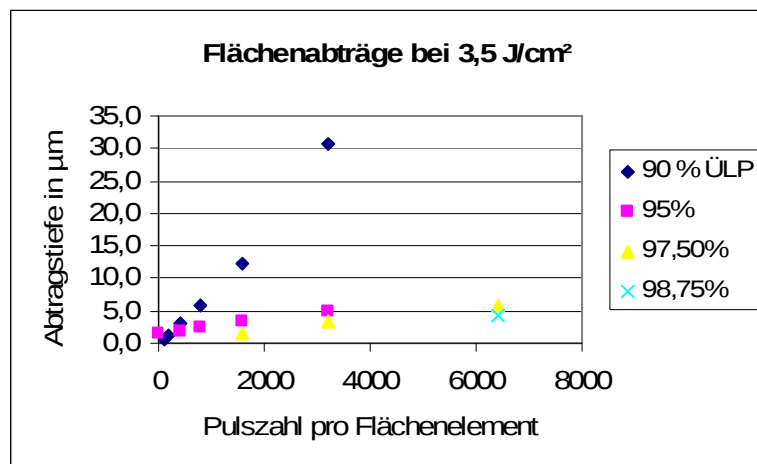


Abb. 6.31: Erreichte Strukturtiefen bei $H = 3,5 \text{ J/cm}^2$

Man sieht in vorangegangenen Diagrammen, dass auch in Magnesiumfluorid Flächenabträge generiert werden können. Die Abtragsraten sind dabei insbesondere bei einer Fluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ sehr gering. Diese kann zwar bei einer Erhöhung der Fluenz deutlich erhöht werden, doch kommt es hier zumeist beim Strukturierungsbeginn zu Ausplatzungen.

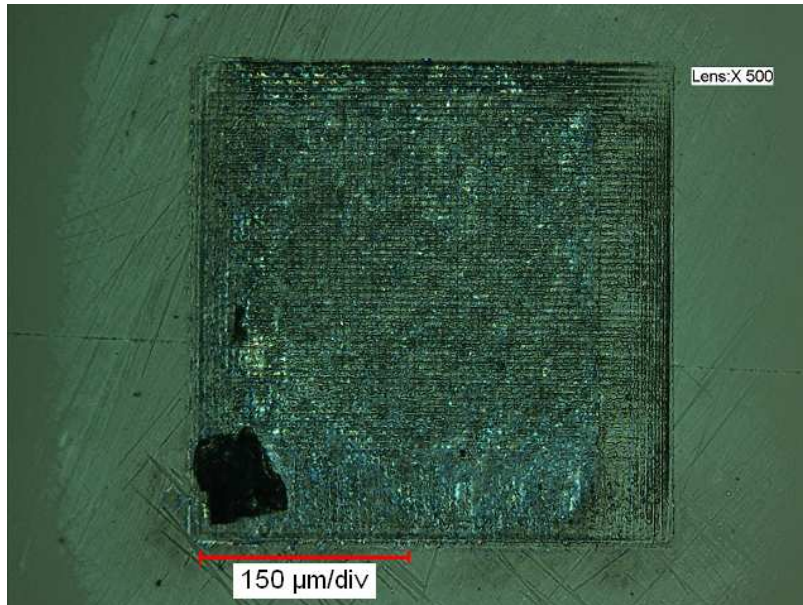


Abb. 6.32: Ausplatzung am Startpunkt (links unten) einer Flächenstrukturierung bei $3,5 \text{ J/cm}^2$.

In der oben dargestellten Abbildung sieht man recht starke Ablagerungen im gesamten Randbereich der Struktur obwohl die Strukturtiefe mit $1,2 \mu\text{m}$ und damit das ablatierte Volumen äußerst gering sind.

Die Erkenntnis, dass sich Magnesiumfluorid bei 100 Hz besser bearbeiten lässt als bei 200 Hz war jedoch Anlass genug, erneut eine Untersuchung der Abtragsrate, nun aber bei geringeren Laserfrequenzen, durchzuführen.

Hierzu wurden erneut Einzelabträge erzeugt, wobei in diesem Versuchsteil aus besagten Gründen nur eine Fluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ verwendet wurde. Jedoch wurde die Laserfrequenz zwischen 10 Hz und 50 Hz variiert und die Anzahl der Laserpulse lag im Bereich von 100 und 500 Pulsen. Es zeigte sich nur bei 50 Hz ein regelmäßiger Abtrag, während bei 10 Hz und 20 Hz bei 300 Pulsen kein Materialabtrag einsetzte.

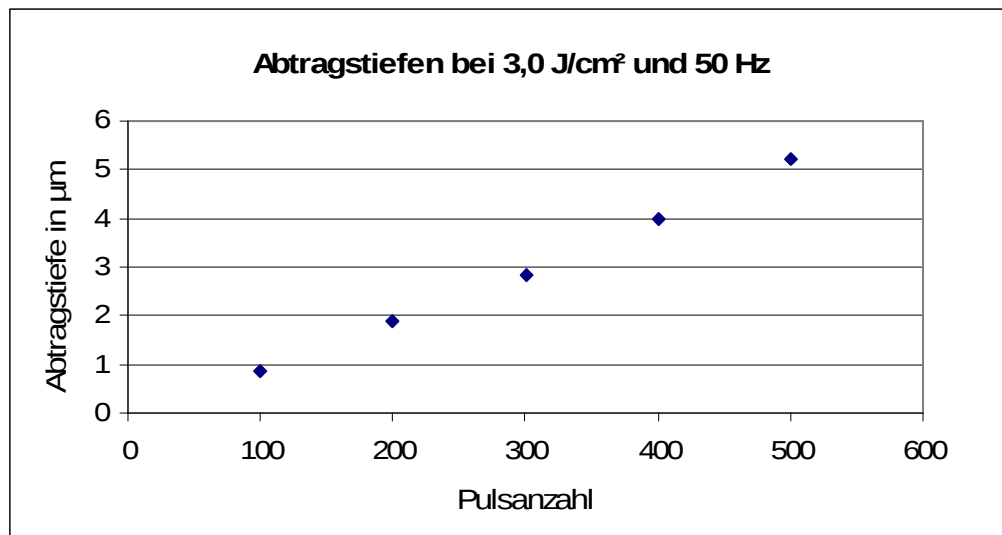


Abb. 6.33: Abtragstiefen in Magnesiumfluorid.

Für Magnesiumfluorid ergab sich nur eine Abtragsrate für eine Fluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ und eine Repetitionsrate von 50 Hz. Bei den weiteren untersuchten Parameterkombinationen stellte sich entweder kein reproduzierbarer Materialabtrag ein oder es kam zu Ausplatzungen.

Die so ermittelte Abtragsrate liegt bei 10 nm/Puls und ist damit deutlich geringer als bei den anderen untersuchten Materialien bei gleicher Fluenz. Im Zusammenspiel mit der geringen einsetzbaren Pulswiederholfrequenz von 50 Hz sind tiefere Strukturen in Magnesiumfluorid nur mit hohem Zeitaufwand realisierbar.

6.1.6 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für Saphir

Bei Saphir wurden zur Bestimmung der Abtragsraten Fluenzen von $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ bis $4,0 \text{ J/cm}^2$ gewählt. Die Laserpulsanzahlen betrugen dabei zwischen 1 und 1000.

Für einen und 5 Pulse konnten keine verlässlichen Werte für die Ablationstiefe ermittelt werden und auch bei 1000 Pulsen konnten die Strukturen aufgrund des zu großen Aspektverhältnisses nicht ausgemessen werden. Für die übrigen Werte ergab sich aber ein nahezu linearer Zusammenhang aus Pulsanzahl und Abtragstiefe (Diagramm ist in Anlage dargestellt), sodass diese zur Bestimmung der Abtragsraten hinzugezogen werden konnten.

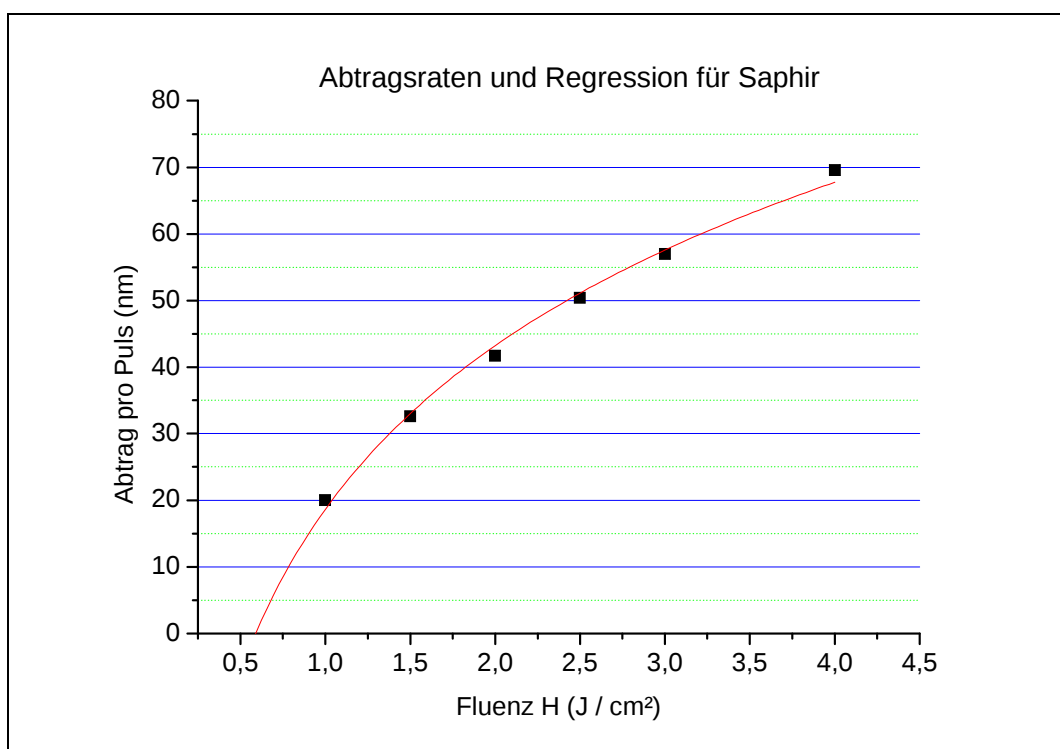


Abb. 6.34: Abtragsrate pro Puls in Saphir bei 200 Hz.

Bei diesem Material wurde die Schwellfluenz mittel Regression zu $H_S = 0,6 \text{ J/cm}^2$ bei einer Standardabweichung von 0,017 bestimmt. Der Absorptionskoeffizient beträgt bei einer Standardabweichung von $6,6 \cdot 10^{-4}$ $\alpha = 28,2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

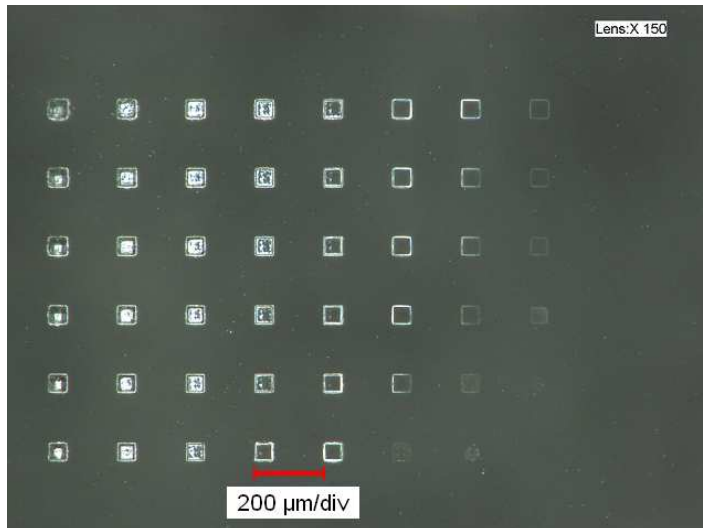


Abb. 6.35: Übersicht der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in Saphir.

Die in Anzahl der Überfahren und dem Überlapp variierten Flächenabträge wurden bei einer Fluenz von $2,0 \text{ J/cm}^2$ durchgeführt.

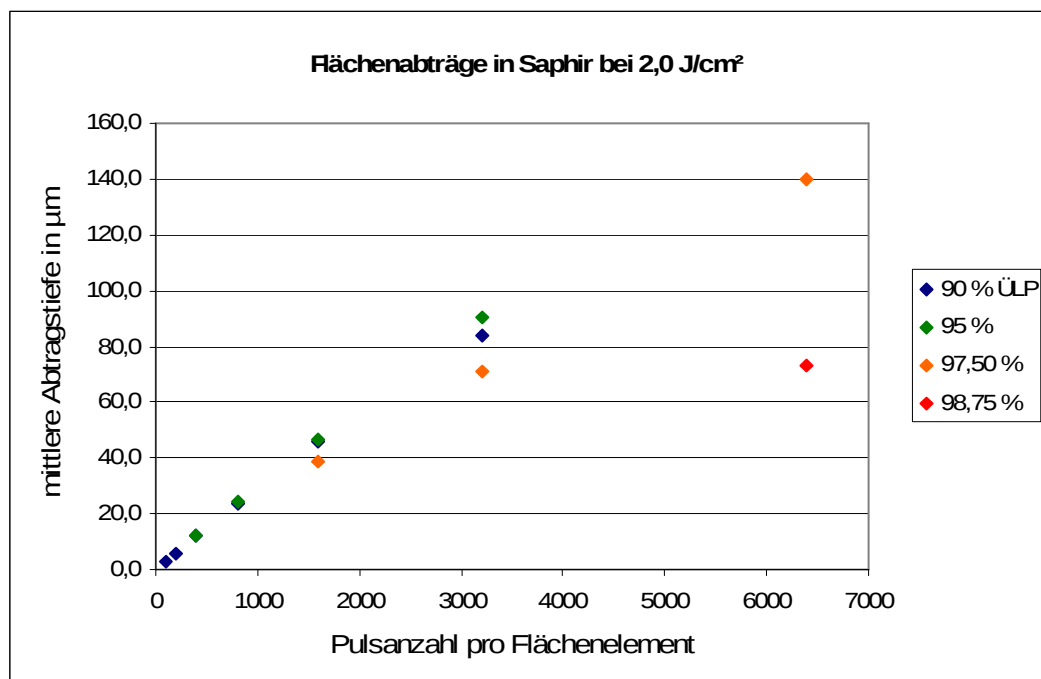


Abb. 6.36: Erreichte Strukturiefen bei konstanter Fluenz in Saphir.

Auch bei Saphir zeigt sich der Zusammenhang von einer geringer werdenden Abtragsrate bei Erhöhung der Überlappung. Jedoch sind auch hier bereits bei 90 % Pulsüberlappung die Werte der Abtragsrate geringer als sie mittels der Einzelabträge ermittelt wurden. Auch bei Saphir ist wieder die Strukturierung bei 90 % oder 95 % ÜLP zu empfehlen.

Bei den Flächenabträgen mit konstanter Laserpulszahl/FE (also 90 % ÜLP und 4 Überfahren bzw. 95 % ÜLP und 1 Überfahrt) kamen Fluenzen zwischen 1 J/cm^2 und 3 J/cm^2 zum Einsatz.

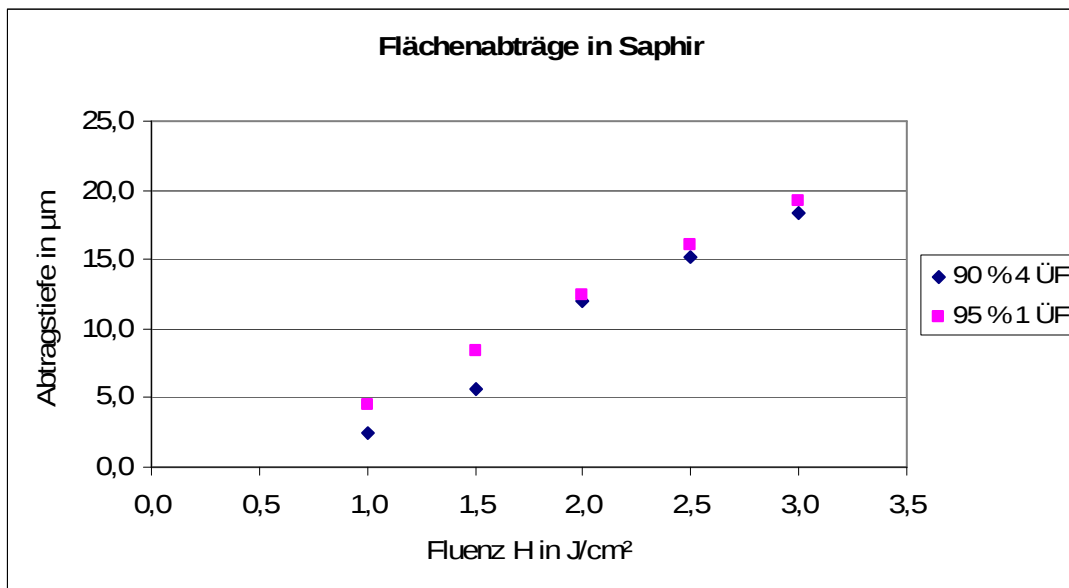


Abb. 6.37: Abtragstiefen unter verschiedenen Fluenzen erzeugter Flächenabträge.

Vergleicht man die Abtragstiefe der Flächenabträge in Saphir, bei welchen die Fluenz variiert wurde, so erkennt man, dass bei den Fluenzen $1,0 \text{ J/cm}^2$ und $1,5 \text{ J/cm}^2$ bei einer Pulsüberlappung von 95 % ein deutlich stärkerer Abtrag stattfand. Ab einer Fluenz von $2,0 \text{ J/cm}^2$ liegen die Abtragstiefen bei 95 % Pulsüberlapp zwar weiterhin über jenen bei einer Pulsüberlappung von 90 %, doch deutlich näher beieinander.

Es zeigte sich, dass bei der Strukturierung von Saphir eine Tröpfchenbildung auf dem Strukturboden einsetzt. Diese ist insbesondere bei Fluenzen bis $2,0 \text{ J/cm}^2$ stark ausgeprägt und nimmt bei höher werdenden Fluenzen etwas ab, bleibt jedoch auch hier nicht aus.

Mit Zunahme der Pulsüberlappung setzt ab 97,5 % ein fortschreitendes Zusetzen des Strukturbodens mit Debris ein, welcher nicht mit Ethanolbädern oder Zelluloseazetat zu entfernen war. Folgende Abbildungen zeigen eine Übersicht der Strukturböden, wie sie sich in Abhängigkeit der Parameterkombinationen ausgeprägt haben.

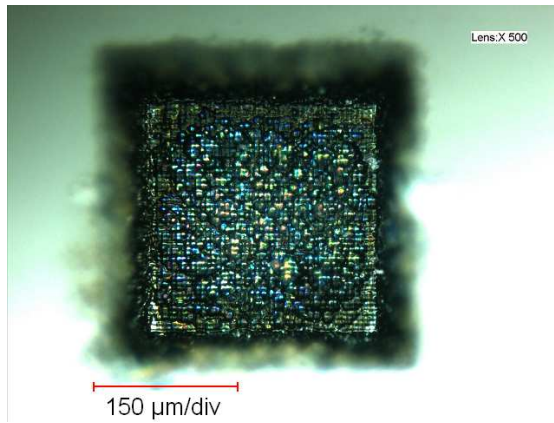


Abb. 6.38: 2 J/cm²; 90 % ÜLP; 16 ÜF.

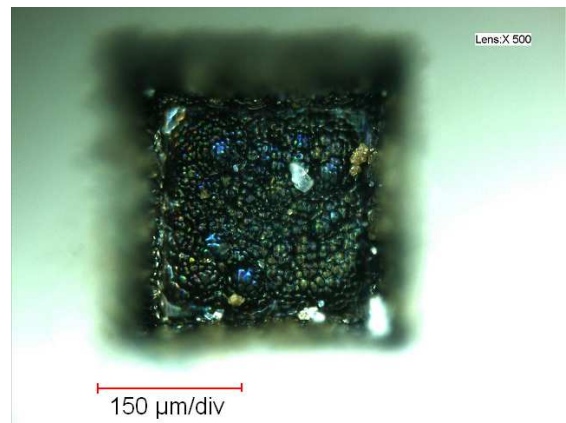


Abb. 6.39: 2 J/cm²; 90 % ÜLP; 32 ÜF.

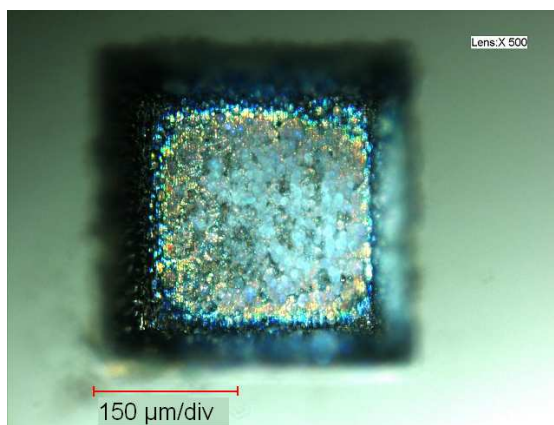


Abb. 6.40: 2 J/cm²; 95 % ÜLP; 4 ÜF.

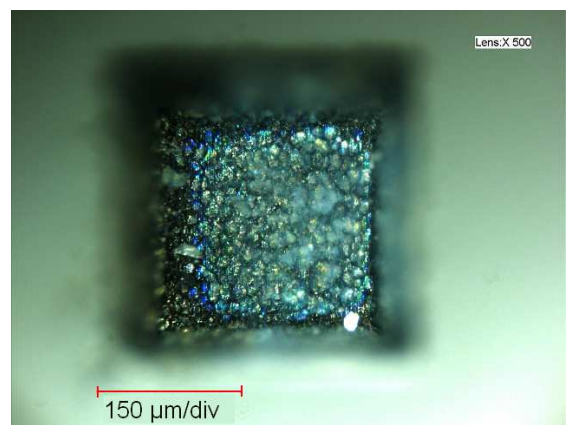


Abb. 6.41: 2 J/cm²; 95 % ÜLP; 8 ÜF.

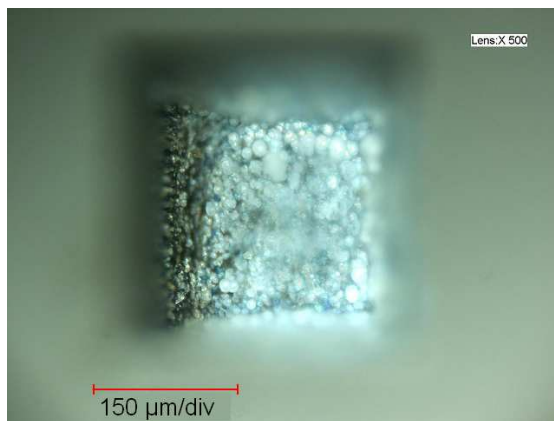


Abb. 6.42: 2 J/cm²; 97,5 % ÜLP; 4 ÜF.

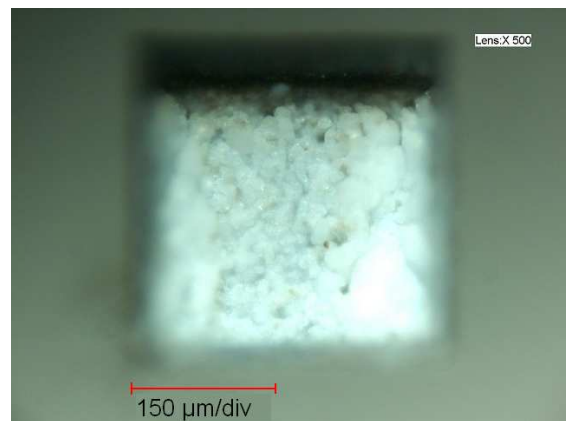
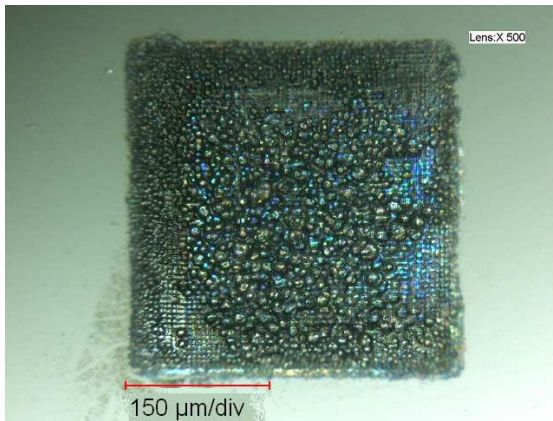
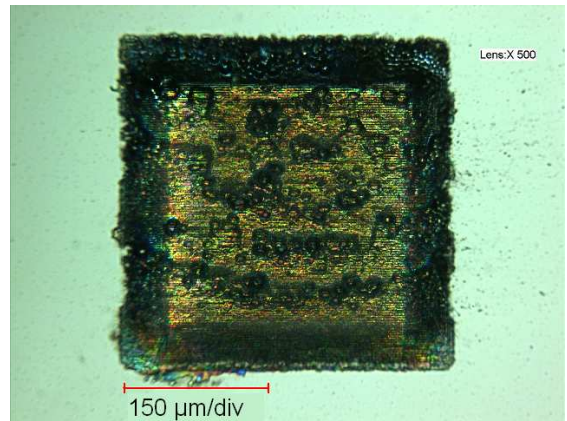
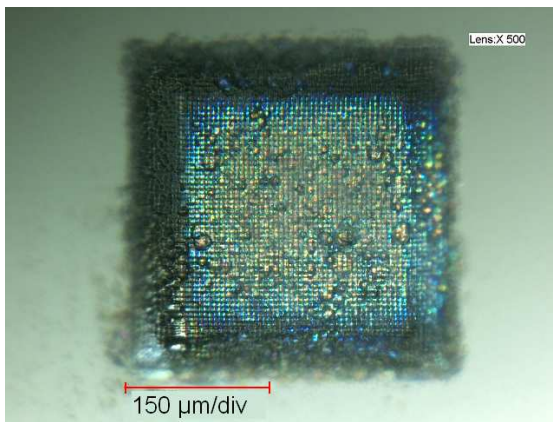
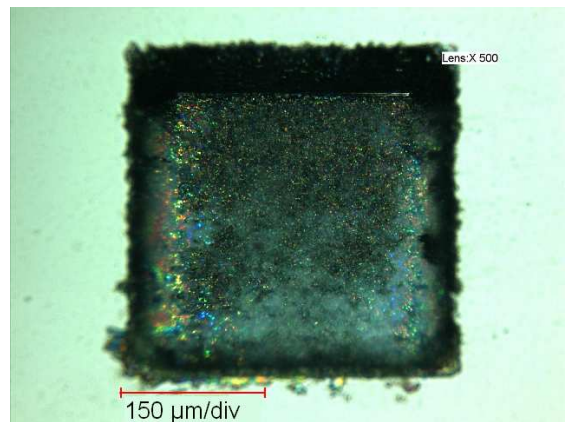


Abb. 6.43: 2 J/cm²; 98,75 % ÜLP; 1 ÜF.

Aus den Abbildungen geht hervor, dass mit Zunahme der Pulsüberlappung eine immer stärkere Ablagerung am Strukturboden stattfindet. Die Strukturtiefe und damit das ablatierte Volumen ist dafür nicht maßgebend.

**Abb. 6.44:** 1,5 J/cm²; 90 % ÜLP; 4 ÜF.**Abb. 6.45:** 1,5 J/cm²; 95 % ÜLP; 1 ÜF.**Abb. 6.46:** 3 J/cm²; 90 % ÜLP; 4 ÜF.**Abb. 6.47:** 3 J/cm²; 95 % ÜLP; 1 ÜF.

Bei einer Erhöhung der Fluenz kann eine Verringerung der Tröpfchenbildung erkannt werden. Es wurde jedoch bei keiner Parametervariation erreicht, dass diese Tröpfchenbildung ausbleibt. Zur Bearbeitung dieses Materials sind hohe Fluenzen um 3 J/cm² und geringe Pulsüberlappungen um 90 % bzw 95 % zu empfehlen.

6.1.7 Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen für TOPAS 5013

Da es sich bei TOPAS 5013 um einen Kunststoff handelt, konnte davon ausgegangen werden, dass die Schwellfluenz deutlich unter jenen der bisher untersuchten Materialien liegt. Auch eine höhere Abtragsrate konnte angenommen werden. Daher wurden die Laserpulsanzahlen zur Bestimmung der Abtragsrate bei diesem Material nur zwischen 1 Puls und 200 Pulse variiert um Strukturen zu erzeugen, welche für eine Vermessung mittels Dektak nicht zu tief sind. Bei einer Abschwächerstellung von 0° wurde eine Fluenz von $0,038 \text{ J/cm}^2$ gemessen, womit die Probe auch bestrahlt wurde. Dabei kam es, wenn auch nicht bei jedem Einzelabtrag, zur Ablation des Materials. Infolge dieser Beobachtung wurden zur Ermittlung der Abtragsraten Fluenzen zwischen $0,05 \text{ J/cm}^2$ und $1,0 \text{ J/cm}^2$ genutzt.

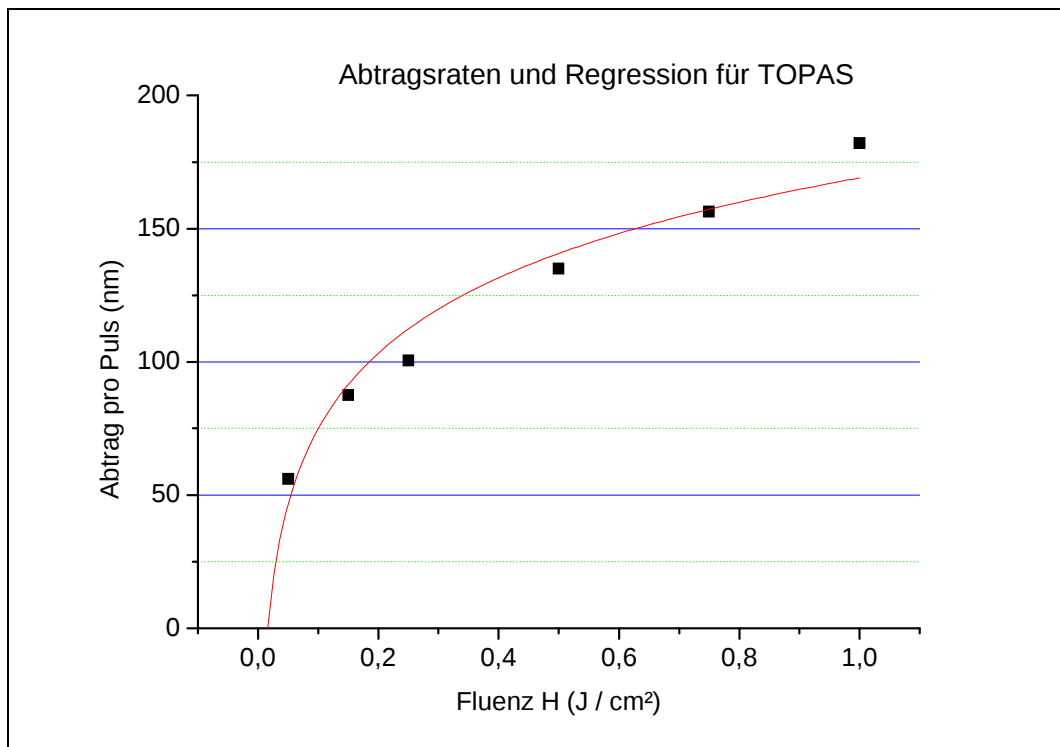


Abb. 6.48: Abtragsrate pro Puls in Topas 5013 bei 200 Hz.

Im Zuge der Regressionsrechnung ergaben sich für die Schwellfluenz $0,016 \text{ J/cm}^2$ bei einer Standardabweichung von $0,003$ sowie ein Absorptionskoeffizient von $24,5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ bei einer Standardabweichung von $0,0016$. Bei einer Fluenz von 1 J/cm^2 war eine starke Verfärbung der Randbereiche der Struktur zu erkennen. Infolge dessen kamen bei der Erzeugung der Flächenabträge nur Fluenzen bis $0,5 \text{ J/cm}^2$ zum Einsatz.

Da sich bisher Pulsüberlappungen von mehr als 95 % wegen ihrer geringer werdenden Abtragsraten und den zunehmenden Ablagerungen in den Strukturen als ungünstig erwiesen haben, wurden diese nicht untersucht. Es wurde eine Matrix an Flächenabträgen erzeugt, bei welcher die Fluenzen von $0,15 \text{ J/cm}^2$, $0,25 \text{ J/cm}^2$ sowie $0,5 \text{ J/cm}^2$ genutzt wurden. Bei der geringsten Fluenz wurden Flächenabträge bei 90 % ÜLP und 1, 2 und 4 Überfahrten sowie bei 95 % und 1 Überfahrt erzeugt. Bei den zwei höheren Fluenzen wurden Strukturen generiert, bei welchen für 90 % ÜLP 1 bzw. 2 Überfahrten, und bei 95 % wieder 1 Überfahrt, durchgeführt wurden.

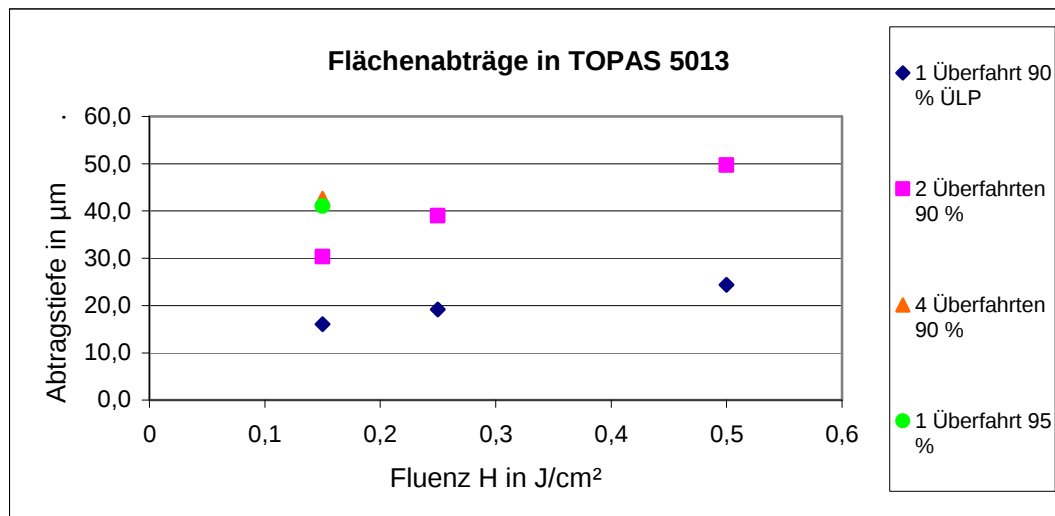


Abb. 6.49: Strukturtiefen in TOPAS 5013 bei verschiedenen Fluenzen.

Es zeigte sich, dass fluenzunabhängig mit der Verdopplung der Anzahl der Überfahrten von 1 auf 2 auch die Abtragstiefe auf den doppelten Wert steigt. Bei $0,15 \text{ J/cm}^2$ muss jedoch festgestellt werden, dass bei einer weiteren Verdopplung der Überfahrten und damit der Pulsanzahl pro Flächeneinheit nur ein Zuwachs der Strukturtiefe von 50 % erreicht wird. Hier ist die Abtragsrate pro Puls jedoch identisch mit jener von 95 % Pulsüberlappung.

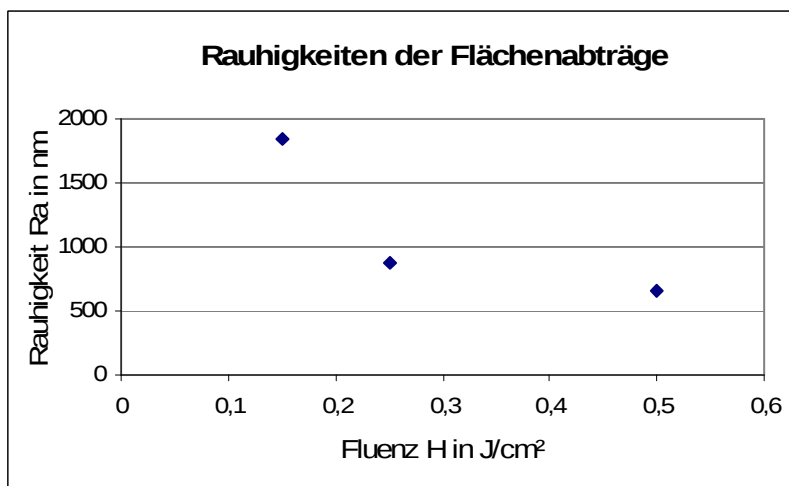


Abb. 6.50: Rauigkeiten der Strukturen bei 90 % ÜLP und 2 Überfahrten.

Betrachtet man die Rauigkeiten der verschiedenen Strukturböden so erkennt man, dass diese mit Zunahme der Fluenz geringer wird. Bei einer Untersuchung dieser Böden mit dem Digitalmikroskop Keyence zeigte sich, dass sich bei geringen Fluenzen Tröpfchen am Strukturboden ablagern. Die Fluenz, welche bei TOPAS 5013 zum Einsatz kommen kann, ist durch diesen Effekt also nach unten hin begrenzt. Als obere Grenze kann 1 J/cm^2 angesehen werden, da hier sehr starke Verfärbungen der Randbereiche um die Struktur auftreten.

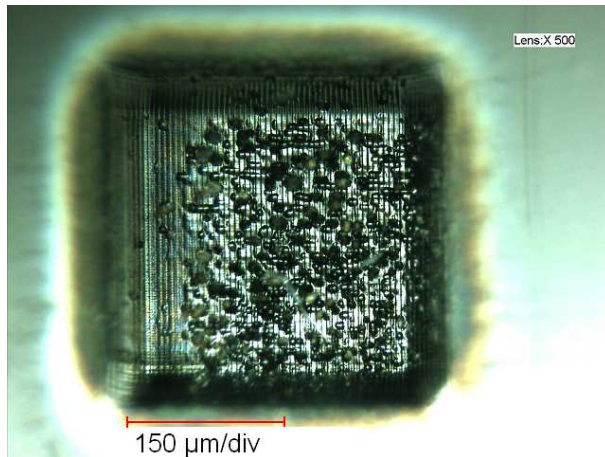


Abb. 6.51: Strukturboden bei $0,15 \text{ J/cm}^2$; 90 % Pulsüberlapp und 2 Überfahrten.

Abb. 6.52: Strukturboden bei $0,25 \text{ J/cm}^2$; 90 % Pulsüberlapp und 2 Überfahrten.

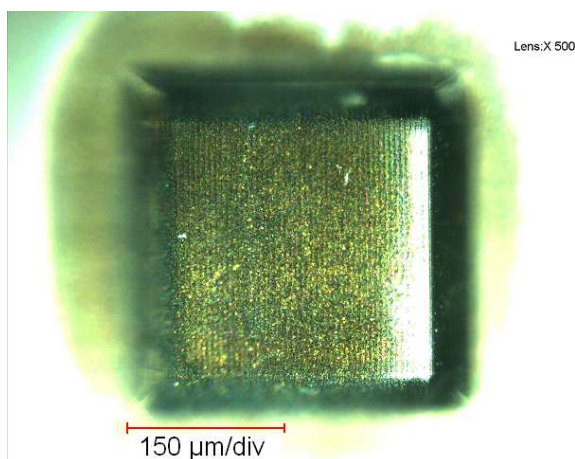
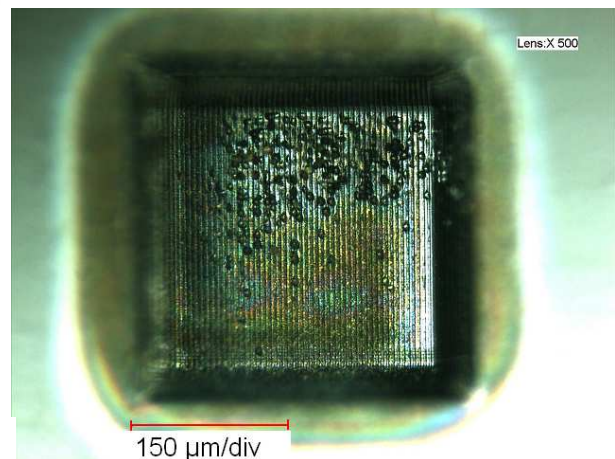


Abb. 6.53: Strukturboden bei $0,5 \text{ J/cm}^2$; 90 % Pulsüberlapp und 2 Überfahrten.

Auf diese Weise lies sich in TOPAS 5013 bei $0,5 \text{ J/cm}$ und 90 % ÜLP sowie 2 Überfahrten, also bei nur 200 Pulsen pro Flächeneinheit, eine Strukturtiefe von 50 µm erreichen.

6.2 Versuche zur Erzeugung von Sackbohrungen

6.2.1 Prinzipielle Verfahrensweise zur Erzeugung von Sackbohrungen

In der Mikrotechnologie haben Bohrungen kleinster Durchmesser jeher eine große Bedeutung. Sei es in der Mikrofluidik, zur exakten Dosierung von Flüssigkeiten, zur Perforierung hartspröder Werkstoffe oder in Rubinlagern in der Uhrenindustrie. Auch als Streubereich in Strahlmasken für Excimerlaser sind Mikrobohrungen speziell in wide-band-gap-materials denkbar.

Infolge der fortschreitenden Miniaturisierung in der Mikrotechnologie stoßen die mechanischen Verfahren insbesondere bei hartspröden Werkstoffen zusehends an ihre Grenzen. Und auch Ätzverfahren sind in ihrer Funktion aufgrund ihres isotropen Materialabtrags bei amorphen Stoffen wie technischen Gläsern zur Erzeugung von Bohrungen mit kleinen Durchmessern einiger 10 μm und großem Aspektverhältnis nur bedingt geeignet. Daher sind Untersuchungen zur Fertigung von Mikrobohrungen mittels Laserablation in den bisher bearbeiteten Materialien notwendig.

Hierzu wurden Löcher durch unterschiedliche Anzahl der Pulse in die Materialien eingebracht. Des Weiteren wurden stets zwei verschiedene materialabhängige Fluenzen eingesetzt und Frequenzen von 50 Hz beziehungsweise 200 Hz genutzt. Bei Magnesiumfluorid kamen zusätzlich noch 20 Hz Repetitionsrate zur Anwendung. Der Fokus des Laserstrahls lag dabei immer auf der Substratoberfläche.

Es wurden auf diese Weise Löcher der Durchmesser 75 μm , 50 μm und 25 μm strukturiert und auf ihre Aspektverhältnisse sowie Bohrungsgeometrien untersucht. Die Bestimmung der Strukturiefen war aufgrund der zu großen Aspektverhältnisse nicht mit dem Oberflächenprofilometer Dektak 3030 möglich und erfolgte mit dem Digitalmikroskop der Firma Keyence. Dabei wurde zuerst auf die Probenoberfläche fokussiert und über die skalierte Höhenachse auf den Boden der Bohrung verstellt. Dies stellte sich bei diesem optischen Mikroskop infolge der Transparenz der untersuchten Materialien als schwierig dar.

6.2.2 Untersuchungsergebnisse der Bohrungsversuche

Es konnten in sämtliche Materialien Sackbohrungen eingebracht werden. Dabei zeigte sich, dass die Tiefe der Bohrungen zwar mit der Anzahl der Laserpulse zunahm, jedoch einer maximalen Tiefe zustrebt. Diese ist sowohl von der Fluenz, dem Bohrungsdurchmesser und natürlich dem Material abhängig.

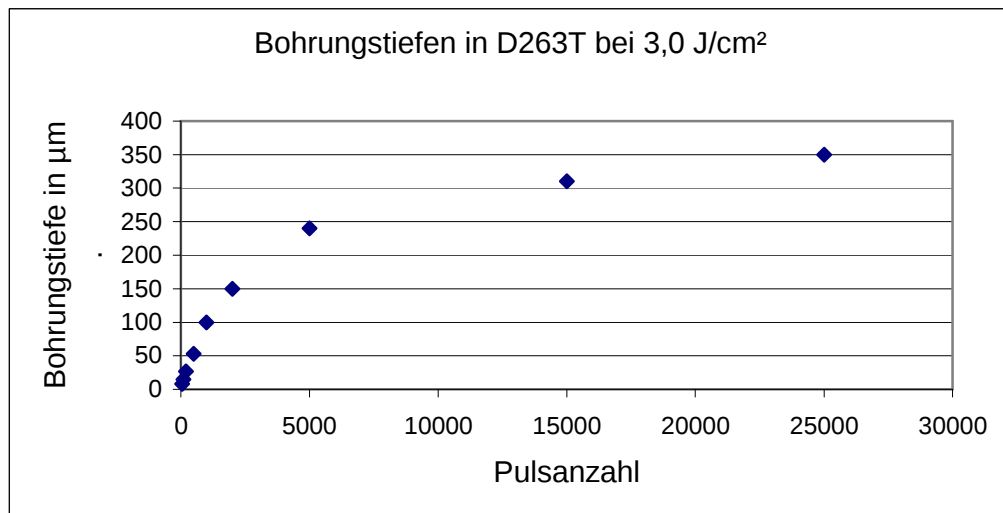


Abb. 6.54: Erreichte Bohrungstiefen in Borosilikatglas bei 75 µm Lochdurchmesser.

Obige Darstellung zeigt den prinzipiellen Verlauf der Bohrungstiefen. Die Tiefen waren bei sämtlichen Materialien bei einem Lochdurchmesser von 75 µm gut mit dem optischen Mikroskop zu bestimmen. Bei geringer werdenden Durchmessern stellte sich dies jedoch zunehmend schwieriger dar. Allerdings konnte das prinzipielle Verhalten, wie es oben beschrieben wurde für die Bohrungen geringerer Lserpulsanzahl und Tiefe auch hier bestätigt werden.

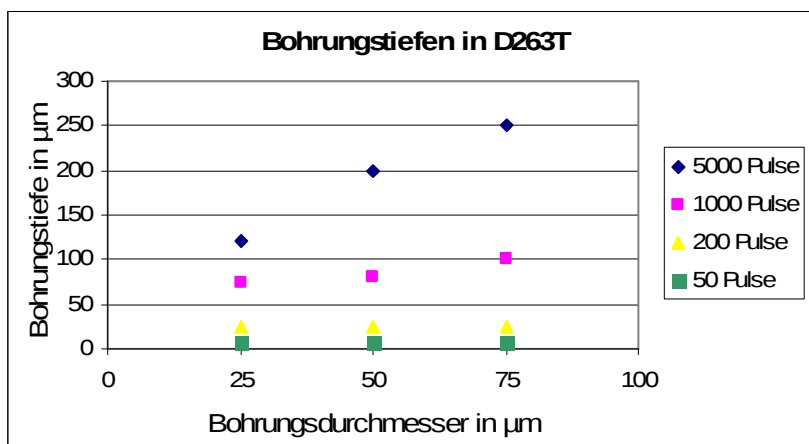


Abb. 6.55: Abtragstiefen in Borosilikatglas bei 3,0 J/cm².

Im vorangegangenen Diagramm kann erkannt werden, dass die Abtragstiefen bei der Erzeugung von Bohrungen nicht nur von Fluenz und Pulsanzahl bestimmt werden, sondern auch vom Bohrungsdurchmesser abhängen. Dies wird mit zunehmender Anzahl der Laserpulse und damit auch zunehmender Strukturtiefe immer deutlicher, während es bei nur 50 Pulsen noch keinen Tiefenunterschied gibt. Die Strukturtiefe beträgt hier 6 μm .

Bei einer Abtragsrate von etwa 115 nm pro Puls, wie sie bei den vorangegangenen Grundlagenuntersuchungen ermittelt wurde (vgl. Kapitel 6.1.3), hätte sich bei 50 Pulsen eine Bohrungstiefe von 5,75 μm ergeben sollen, was zeigt, dass diese Werte reproduzierbar und für Bohrungen geringer Tiefe übertragbar sind.

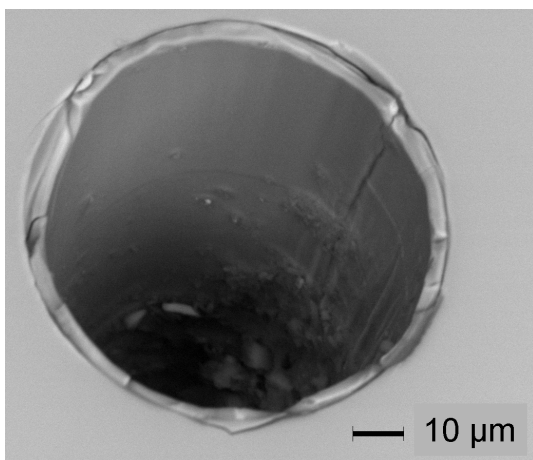


Abb. 6.56: REM-Aufnahme einer Bohrung mit 75 μm in D263T, gefertigt bei 3 J/cm^2 , 50 Hz und 25.000 Pulsen, die Tiefe beträgt etwa 350 μm .

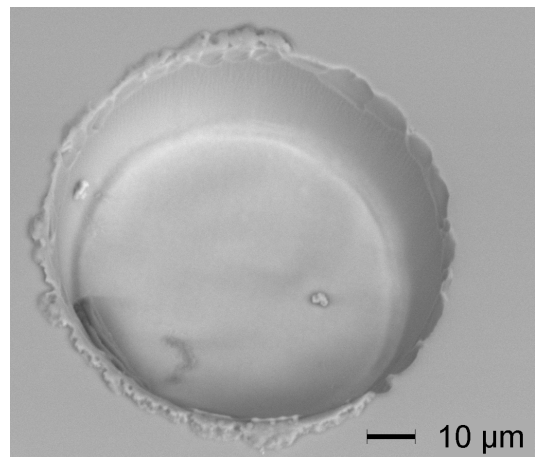


Abb. 6.57: REM-Aufnahme einer ca. 25 μm tiefen Bohrung wie oben, hier mit 200 Pulsen gefertigt.

Die oben abgebildeten Bohrungen im Borosilikatglas D263T weisen an der Oberfläche einen Durchmesser von 78 μm auf. Bei der 25 μm tiefen Struktur zeichnet sich bereits der konische Verlauf der Bohrung ab, was dazu führt, dass tiefere Strukturen spitz zulaufen und sich kein Bodenplateau ausprägt. Desweiteren bildet sich bei zunehmender Abtragstiefe eine an der

Bohrungswand haftende Schicht. Diese entsteht vermutlich aus in größeren Tiefen ablatiertem Material, welches sich beim Austrieb aus dem Loch an der Wandung ablagert. Dieser Effekt trat bei allen Materialien und Bohrungsdurchmessern auf. Je tiefer die Bohrung ist, desto stärker prägt sich diese Schicht aus. Gereinigt wurden die Proben nur in einem Ethanolbad.

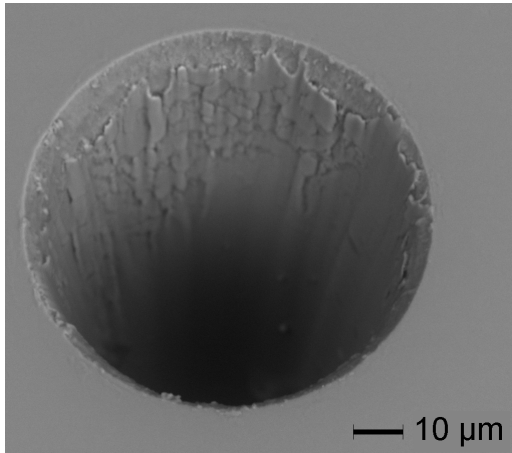
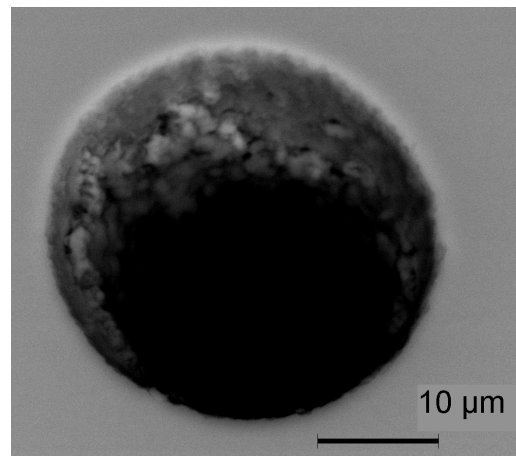


Abb. 6.58: REM-Aufnahme einer Bohrung in Saphir.

Diese wurde bei 3 J/cm², 200 Hz und mit 25.000 Pulsen gefertigt. Der Durchmesser beträgt an der Oberfläche 78 µm und die Tiefe ca. 200 µm. Die anhaftende Schicht bildete sich hier schwächer aus, was am Material, aber auch am kleineren ablatierten Volumen liegen kann.

Abb. 6.59: Bohrung mit einem Durchmesser von 30 µm in Kalziumfluorid. Sie wurde mit 2,5 J/cm², 50 Hz und 25.000 Pulsen erzeugt.

Materialunabhängig konnte bei 30 µm Durchmesser die Tiefe nur bis zu etwa 20 µm bestimmt werden. Somit ist keine Aussage über das maximale Aspektverhältnis möglich. Der Solldurchmesser betrug hier 25 µm.



Die tiefsten Bohrungen konnten in Quarzglas Corning 7980 und Borosilikatglas D263T mit Tiefen von jeweils bis 350 µm eingebracht werden (bei 75 µm Bohrungsdurchmesser). Dies entspricht einem Aspektverhältnis von mehr als 4:1. Bei Beibehaltung der Bearbeitungsparameter und Verringerung der Lochdurchmesser wurde auch die Abtragstiefe kleiner. Bei Saphir und Kalziumfluorid konnten bei 75 µm Lochdurchmesser Tiefen von bis zu 200 µm erreicht werden und in all diesen Materialien war das Fertigen von Bohrungen bis 30 µm Durchmesser möglich.

Anders stellte sich dies in Magnesiumfluorid dar. Hier konnten nur Bohrungen mit minimal 50 μm Durchmesser hergestellt werden, wobei die Abtragstiefen in diesem Material erwartungsgemäß gering ausfielen. So wurden maximale Tiefen von circa 60 μm bei 3,0 J/cm² und 25.000 Pulsen mit 50 Hz und 75 μm Bohrungsdurchmesser erzeugt werden. Es wurden auch Bohrungen bei 20 Hz Laserfrequenz in dieses Material eingebracht, doch wurden hier aus zeitlichen Gründen nur maximal 5000 Pulse realisiert.

Abb. 6.60: Halbkugelförmiger Abtrag in Magnesiumfluorid, gefertigt mit 3,0 J/cm², 20 Hz und 5000 Pulsen. Die Tiefe beträgt 36 μm bei einem Ist-Durchmesser von 78 μm .

Diese Struktur bietet sich zwar als Streuzentrum in Transmissionsmasken für Excimerlaser an, ist jedoch bei einer Prozesszeit von über 4 Minuten nur wenig praktikabel.

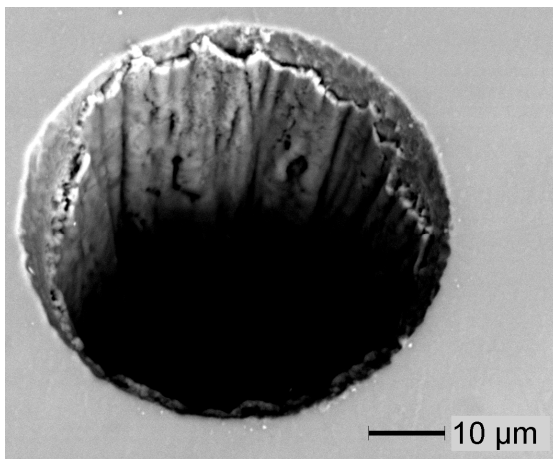
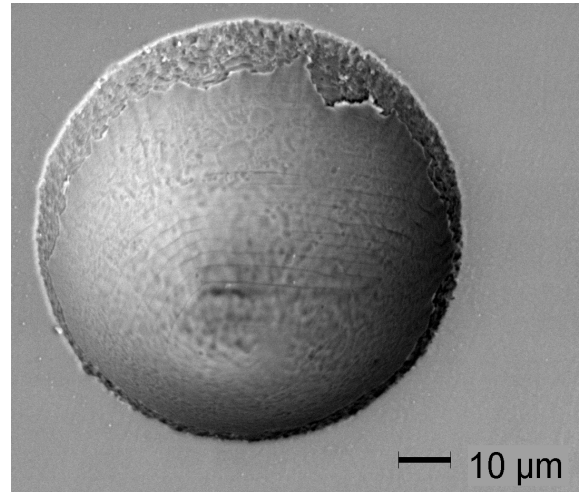


Abb. 6.61: REM-Aufnahme einer in Magnesiumfluorid erzeugten Bohrung mit 50 μm Durchmesser, hier wurde mit 50 Hz und 25.000 Pulsen bei einer Fluenz von 3,0 J/cm² gearbeitet.

Auch hier bildete sich eine Haftschrift am Rand der Struktur aus.

Bei den Bohrungsversuchen in den technischen Gläsern D263T und Corning 7980 sowie den optischen Kristallen Kalziumfluorid und Saphir konnten problemlos Aspektverhältnisse von 3:1 bzw. 2:1 erreicht werden. Die minimalen Durchmesser betrugen dabei 30 μm , wobei kleinere Masken noch nicht zum Einsatz kamen. Die Kanten der Löcher wiesen dabei keine oder nur geringe Ausplatzungen auf und waren annähernd kreisrund (abhängig von der Maskengeometrie). In Magnesiumfluorid waren hingegen nur Aspektverhältnisse kleiner eins möglich.

Wie in den Grundlagenuntersuchungen festgestellt wurde, ist die Schwellfluenz von TOPAS 5013 mit etwa 16 mJ/cm^2 ausgesprochen gering. Dies wirkte sich auf die Geometrie der Sacklochbohrungen aus, in dem sich der Bohrungskanal mit zunehmender Tiefe entsprechend der Strahldefokussierung aufweitete, anstatt sich wie bei den bisher untersuchten Materialien zu verjüngen.

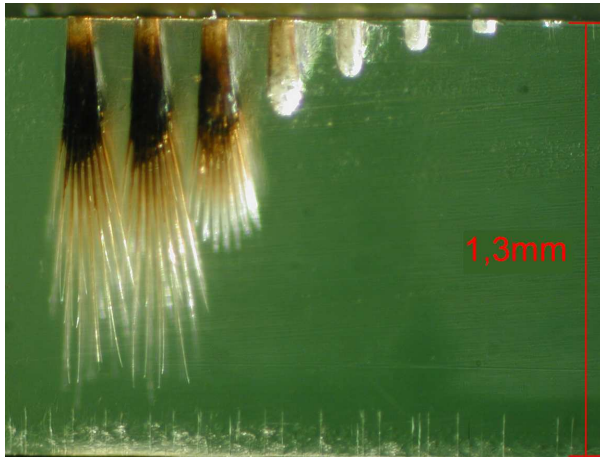


Abb. 6.62: Schliffbild der Bohrungen mit $75 \mu\text{m}$ Durchmesser in TOPAS 5013, die Laserpulszahl nimmt von links nach rechts von 25.000 Pulsen bis 100 Pulse ab.

Deutlich sind die Verfärbungen der Bohrungswände zu erkennen. Da die Schwellfluenz sehr gering ist kann davon ausgegangen werden, dass der Verlauf der Bohrungsgeometrie auch der Divergenz des Laserstrahles entspricht. Gestützt wird diese Vermutung durch das Ausfasern der Bohrung ab einer bestimmten (aber stets der gleichen) Strukturtiefe. Diese so entstehenden Kanäle bilden sich in diesem Material bei Bohrungen ausreichender Tiefe immer gleich aus, was darauf hindeutet, dass es sich um die, durch den in Kapitel 4.3 beschriebenen Homogenisierer erzeugten, Einzelstrahlen handelt.

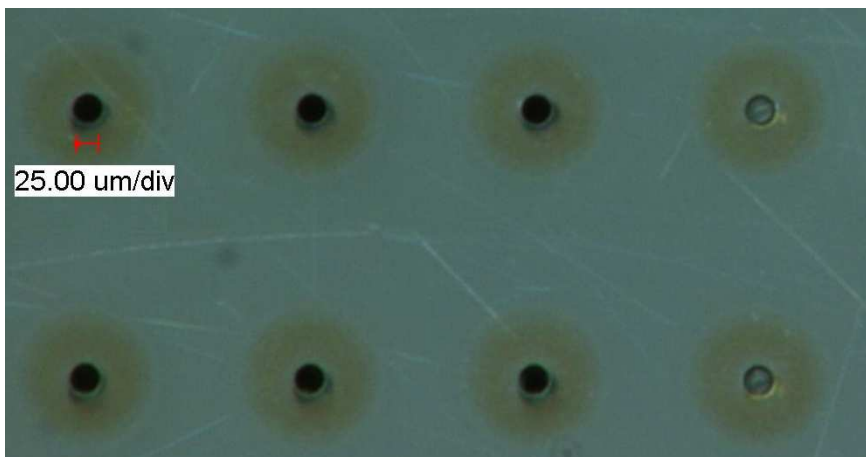


Abb. 6.63: Ausschnitt aus Bohrungsmatrix in TOPAS 5013.

In obiger Abbildung sind verschiedene Bohrungen eines Durchmessers von $30 \mu\text{m}$ zu sehen. In der oberen Zeile wurde dabei 50 Hz, in der unteren 200 Hz Repetitionsrate verwendet. Von links nach rechts verringerte sich dabei die Anzahl der Laserpulse von 2000 Pulsen auf 200. Die Fluenz betrug in diesem Versuch 2 J/cm^2 . Es kamen aber auch geringere Fluenzen bis hinab zu $0,5 \text{ J/cm}^2$ zum Einsatz (nicht in Abbildung).

6.3 Erkundung von Inkubationseffekten in Kalzium- und Magnesiumfluorid

6.3.1 Begriffsklärung der „Inkubation“

In den Grundlagenuntersuchungen dieser Diplomarbeit wurde die Schwellfluenz als jene Energieflussdichte betrachtet, ab welcher eine Materialzerstörung im Sinne eines Abtrages einsetzt. Wird das Material nicht einem Einzelpuls, sondern einer Reihe von Pulsen ausgesetzt, so kann bereits bei unterschwelliger Bestrahlung (Energieflussdichte ist kleiner als die Schwellfluenz) eine Ablation des Substrates einsetzen. Dies ist durch eine Materialveränderung durch jene unterschwelligen Pulse bedingt. Dieses Verhalten wird als Inkubation verstanden.

Nach [28] kann die UV-Bestrahlung transparenter Materialien zu strukturellen Veränderungen des Substrates führen. Die sich so ausbildenden Defektstellen erlauben zusätzliche energetische Übergänge für die Elektronen was eine erhöhte Absorption diskreter Wellenlängen durch das Dielektrikum bewirkt. Da es sich materialabhängig um scharf abgegrenzte Wellenlängen handelt, werden die Bereiche solcher Defektstellen als Farbzentren bezeichnet.

Eine weitere Möglichkeit einer Materialveränderung durch unterschwellige Laserpulse ist die mechanische Vorschädigung beispielsweise eines Kristallgitters an Gitterdefekten. Auf diese Weise ändern sich die Materialeigenschaften für die nachfolgenden Pulse.

6.3.2 Untersuchungsergebnisse zur Inkubation

Die Inkubationseffekte wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit für die Materialien Kalziumfluorid und Magnesiumfluorid durchgeführt. Hierzu wurden die Materialien mit unterschiedlichen Fluenzen um und deutlich unter den in den Grundlagenuntersuchungen ermittelten Schwellfluenzen bestrahlt. Der Fokus lag dabei wie immer auf der Materialoberfläche und der bestrahlte Bereich stellte ein Quadrat mit 50 µm Kantenlänge dar. Die Repetitionsrate betrug bei Kalziumfluorid 200 Hz und bei Magnesiumfluorid wegen der in Punkt 6.1.5 erlangten Erkenntnissen 50 Hz.

Der Laser wurde dabei im Burst-Modus betrieben, d.h. es wurde eine feste Position des Materials angefahren und der Laser zur Emission gebracht. Über die Möglichkeit der in situ-Beobachtung wurde visuell der Zeitpunkt eines einsetzenden Materialabtrages ermittelt und über den Zeitraum zwischen Emissionsbeginn des Lasers und dem Einsatz der Ablation auf die (ungefähre) nötige Pulsanzahl für einen Materialabtrag bei der jeweiligen Fluenz geschlossen. Für jede Energieflussdichte wurde dieser Versuch zehnmal

durchgeführt, wozu stets eine neue, bisher unbestrahlte Position der Probe untersucht wurde. Es zeigte sich, dass bei beiden Materialien ein Inkubationsverhalten auftrat, zwischen den Einzelmessungen bei gleichen Parametern jedoch zum Teil große Schwankungen auftraten. Dies kann zum einen an der Leistungsschwankung des Laser gerade bei längeren Pulszügen liegen, zum anderen sind auch verschiedene Konzentrationen an Defektstellen im Kristallgitter an den unterschiedlichen Positionen der Probe möglich, was ein unterschiedliches Absorptionsverhalten des Substrates nach sich zieht.

Die qualitativen und soweit wie möglich quantitativen Ergebnisse werden in folgenden Tabellen wiedergegeben.

Tabelle 6.2: Untersuchung zur Inkubation in Kalziumfluorid.

Die Schwellfluenz wurde für Kalziumfluorid zu 1,7 J/cm² bestimmt	
Fluenz H in J/cm²	Beobachtungen
2,0	sofortiger, über die gesamte Fläche verteilter, Materialabtrag
1,75	sofortiger, über die gesamte Fläche verteilter, Materialabtrag
1,5	nach wenigen 10 Pulsen einsetzender Materialabtrag durch Ausplatzen von kleinen Partikeln auf der gesamten bestrahlten Fläche
1,25	nach wenigen 10 Pulsen einsetzender Materialabtrag durch Ausplatzen von kleinen Partikeln aus der Strukturmitte heraus
1,0	auch nach 5000 Pulsen kein Materialabtrag

Tabelle 6.3: Untersuchung zur Inkubation in Magnesiumfluorid.

Für Magnesiumfluorid wurde in den Grundlagenuntersuchungen keine Schwellfluenz bestimmt	
Fluenz H in J/cm²	Beobachtungen
2,5	sofortiger ganzflächiger Materialabtrag
2,25	sofortiger Materialabtrag aus dem Strukturinneren heraus nach etwa 50 Pulsen ganzflächiger Abtrag
2,0	Materialabtrag setzt nach etwa 10 Pulsen an Keimzellen ein ganzflächiger Abtrag nach etwa 100 Pulsen
1,75	Materialabtrag setzt nach 20 bis 100 Pulsen ein oder bleibt aus
1,5	Materialabtrag setzt nach 700 bis 2300 Pulsen ein oder bleibt aus
1,25	Materialabtrag bleibt überwiegend aus gelegentlich setzt Materialabtrag nach ca. 5000 Pulsen ein

Da sich die Abtragsraten für die untersuchten Materialien in den Grundlagenuntersuchungen gegen die Laserpulsanzahl ab etwa 10 Pulsen annähernd linear verhielten und insbesondere bei Flächenstrukturierungen zumindest 100 Pulse je Flächeneinheit eingebracht werden (90 % ÜLP) spielt der Inkubationseffekt hier eine absolut untergeordnete Rolle. Auch bei Bohrungen werden in der Regel mindestens einige zehn Pulse in das Material eingekoppelt, so dass auch dabei nur ein Bruchteil der Ablationstiefe durch den Inkubationseffekt hervorgerufen wird. Zudem ist wegen der geringen Reproduzierbarkeit der Versuche kaum eine quantitative Auswertung dieses Versuches möglich. Für die Erzeugung von Strukturen mehrerer μm Tiefe bei Fluenzen deutlich über der Schwellfluenz braucht der Inkubationseffekt nicht zur Abschätzung der Ablationstiefe herangezogen werden. Zudem ist dessen, wenn auch geringer, Einfluss in den empirisch ermittelten Abtragstiefen der untersuchten Materialien bei verschiedenen Materialien inbegriffen, so dass die in den Grundlagenuntersuchungen erfassten Werte für spätere Strukturierungen bedenkenlos herangezogen werden können.

6.4 Erzeugung diffraktiver optischer Elemente

6.4.1 Begriffsklärung „diffraktives optisches Element“

Eine der grundlegenden Aufgaben in der Photonik ist es, eine vorliegende Intensitätsverteilung, beispielsweise eines Laserstrahls, durch geeignete Mittel in ein gefordertes Profil umzuformen. Die klassischen optischen Elemente Linse und Prisma nutzen zum Erfüllen dieser Forderung die physikalischen Phänomene Brechung (Linsen, Prismen) und Reflexion (Spiegel, Umlenkprismen).

Das Wirkprinzip diffraktiver optischer Elemente (DOEs) hingegen beruht auf der Beugung elektromagnetischer Wellen an Mikrostrukturen. Bekanntestes Beispiel hierfür ist wohl das Liniengitter, dessen Beugungsbild allgemein bekannt ist.

An den Gitterstrukturen mit lateralen Perioden und Stufenhöhen unter $1\ \mu\text{m}$, wie sie in DOEs auftreten, kommt es ebenfalls zu Beugungseffekten. Durch die so auftretenden unterschiedlichen Weglängen tritt eine Phasenmodulation auf, was zur Ausbildung von Interferenzmustern führt. Dies entspricht der geforderten Strahlformung. Durch konstruktive und destruktive Interferenz der einzelnen Wellen kommt es zudem zu einer Amplitudenmodulation, also einer Intensitätsveränderung.

Auf diese Weise können durch gezielte Oberflächenstrukturierung sowohl konventionelle optische Bauteile wie Linsen und Prismen ersetzt, als auch komplexe Strahlformungen wie bei computergenerierten Hologrammen oder Freiform-Phasenfunktionen erreicht werden. [29]

6.4.2 Vorgehen und Ergebnisse bei der Erzeugung von DOEs

Da an der Bearbeitungsstation EX-157 die Bestimmung der Fokusslage mittels der in situ-Beobachtung auf visuellem Wege erfolgt, ist dies für sehr kleine Strukturen mit Ausdehnungen von wenigen μm schwierig. Zudem würde eine Maske mit einer abgebildeten Quadratfläche von 1 μm Kantenlänge eine reale Größe von weniger als 30 μm Kantenlänge aufweisen. Die Fertigung einer solchen Maske war mit den zur Verfügung stehenden Mitteln (fs-Laseranlage) nicht möglich. Daher, und zur besseren visuellen und messtechnischen Auswertbarkeit, kam eine Quadratmaske mit einer abgebildeten Kantenlänge von 50 μm zum Einsatz. Auf diese Weise konnten auch die Stufenhöhen besser ermittelt werden.

Der Hauptaugenmerk lag bei der Durchführung dieses Versuches auf der Positioniergenauigkeit der Achsen, der Ausbildung des Bereiches zwischen zwei Feldern, den Stufenhöhen und den Oberflächen der Segmente eines DOEs.

Zu diesem Zweck wurden Matrizen von 20 x 20 Segmenten mit Laserpulszahlen zwischen 1 und 50 erzeugt. Dazu mussten die Fokusslage sowie der optimale Abstand zweier Einzelabträge bestimmt werden, um so einen möglichst fehlerfreien Bereich zwischen zwei Segmenten zu erreichen. Es sollten möglichst keine Stege zwischen zwei Feldern verbleiben, doch sollten sich zwei benachbarte Einzelabträge auch nicht durch Überlagerung beeinflussen.

Der dafür ermittelte Wert liegt mit 50 μm genau bei der Größe der abgebildeten Maske. Dies bedeutet gleichzeitig, dass der Fokus tatsächlich auf der Substratoberfläche lag. Zur Verwendung kamen in diesem Versuch die Materialien Corning 7980 (Quarzglas) sowie das Borosilikatglas D263T. Auch kamen verschiedene Fluenzen zum Einsatz, um so deren Einfluss auf die Stufenhöhen und die Ebenheit der Einzelsegmente zu erkunden.

Die genaue Verteilung der Laserpulszahlen ist in der Anlage 18 dargestellt. Die Reinigung der erzeugten Strukturen erfolgte mit Zelluloseazetat.

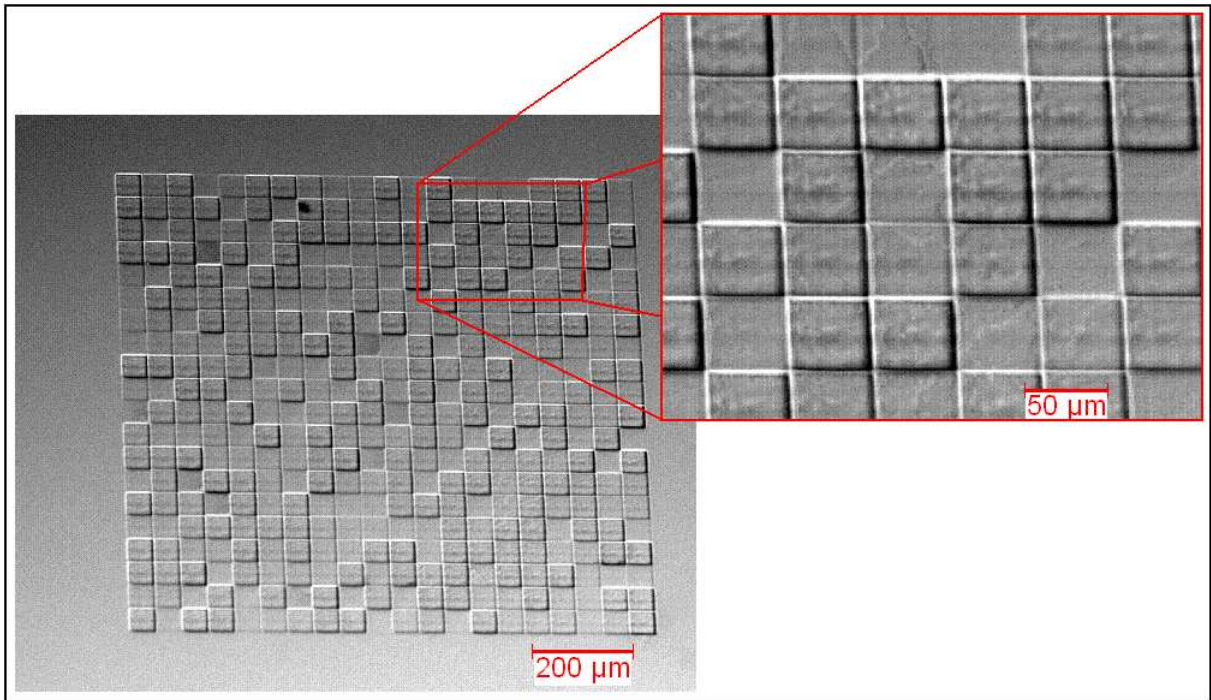


Abb. 6.64: REM-Aufnahme einer Versuchsmatrix in Corning bei 2 J/cm².

Die oben dargestellte Abbildung ist im Vergleich zur Ausrichtung bei der Fertigung (vgl. Anlage 18) um 90 ° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Man erkennt eine durchgängig genaue Probenpositionierung und dadurch sehr scharfe Übergänge zwischen den einzelnen Segmenten. Aber bei der Betrachtung der Segmentoberflächen zeigt sich, dass gerade bei höheren Anzahlen der Laserpulse eine horizontale Vertiefung auftritt, welche sich auf der gesamte Matrix fortsetzt. Dies weist auf eine inhomogene Intensitätsverteilung hin.

Es ist zur Erzeugung flacher und möglichst ebener Strukturen also zwingend nötig das Intensitätsprofil des Laserstrahls aufzunehmen und die Komponenten zur Strahlführung gegebenen Falls neu zu justieren.

Die Tiefe der mit einer Fluenz von 2 J/cm² beträgt maximal 4,5 µm (50 Pulse).

Es wurden in diesem Material auch Testfelder bei Fluenzen von 0,75 J/cm² und 1,25 J/cm² erzeugt. Bei letzterem beträgt die maximale Segmenttiefe 1,6 µm, was einer Stufung von 32 nm je Puls entspricht. Dieser Wert liegt geringfügig über dem Erwartungswert aus den Grundlagenuntersuchungen. Zudem zeigten sich hier geringfügige Aufwerfungen an den Segmentgrenzen. Bei dieser geringen Fluenz bildeten sich die einzelnen Segmente jedoch glatter aus als bei 2 J/cm².

Im Borosilikatglas D263T wurden die Teststrukturen mit Fluenzen von 0,5 J/cm², 0,75 J/cm² sowie 2 J/cm² erzeugt. Hier zeigte sich bei 2 J/cm² erneut jene Vertiefung in den Segmenten wie sie schon bei Corning festgestellt wurde.

Die Tiefe des Segmentes mit 50 eingebrachten Pulsen beträgt $4,5\text{ }\mu\text{m}$, was einer Abtragsrate von 90 nm je Puls entspricht. Dies stimmt gut mit dem im Kapitel 6.1.3 ermittelten Wert überein.

Bei einer geringeren Fluenz zeigte sich auch bei D263T eine ebenere Oberfläche der Einzelstrukturen. Bei einer Fluenz von $0,5\text{ J/cm}^2$ wurde eine maximale Segmenttiefe von $1\text{ }\mu\text{m}$ festgestellt, was einer Abtragsrate von 20 nm pro Puls entspricht und wiederum gut mit dem Erwartungswert übereinstimmt.

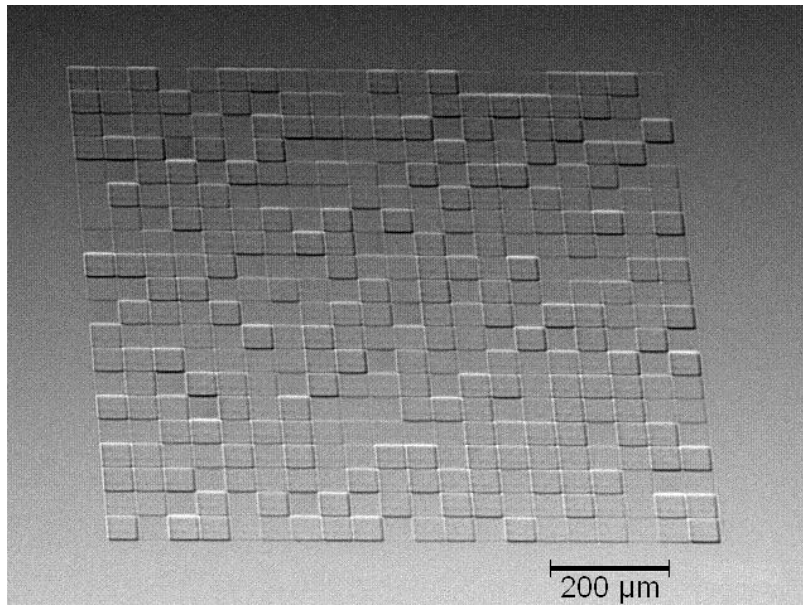


Abb. 6.65: Versuchsmatrix in D263T bei $0,5\text{ J/cm}^2$ gefertigt.

6.5 Erzeugen von Demonstrationsstrukturen

6.5.1 Prinzipielle Verfahrensweise

Die im Folgenden beschriebenen Demonstrationsstrukturen sollen verdeutlichen, welche Strukturauflösungen (minimale Detailgröße) mit der zur Verfügung stehenden Mikrobearbeitungsstation EX-157 und der Technologie des schichtweisen Abtrags möglich sind. Unter schichtweisem Abtrag soll verstanden werden, dass wie bei der Flächenstrukturierung (vgl. Abbildung 6.3) ein zeilenweiser Versatz stattfindet, bis eine (rechteckige) Fläche ablatiert wurde. An jenen Stellen, wo sich die Struktur befindet, also kein Material abgetragen werden soll, findet keine Emission des Lasers statt.

Unter einer $2^{1/2}$ D-Struktur soll eine Kontur in der Oberflächenebene des Substrates verstanden werden, welche sich in der Tiefe des Ablationsprozesses nicht verändert. Dazu zählen zum Beispiel Zylinder, Quader oder aus diesen zusammengesetzte Figuren. Eine 3D-Struktur hingegen ändert mit zunehmender Strukturtiefe ihre Kontur oder zumindest deren Abmaße. Hierzu können Pyramiden, Halbkugeln oder Rampen gezählt werden.

Um dieser Änderung der Kontur Rechnung zu tragen wird die Struktur in mehrere horizontale Schichten zerlegt (gesliced), in welchen jeweils neue Geometrien (2D) hinterlegt sind, welche nicht abgetragen werden sollen. Wird beispielsweise eine Pyramide erzeugt, so weist die erste (oberste) Schicht nur einen „Punkt“ auf, an welchem keine Ablation stattfinden soll. Mit zunehmender Ablationstiefe und damit Schichtanzahl beinhalten die Schichten immer größer werdende Quadrate welche in ihrer Gesamtheit mit den jeweiligen Abtragstiefen dem Volumen der im Material verbleibenden Pyramide entsprechen.

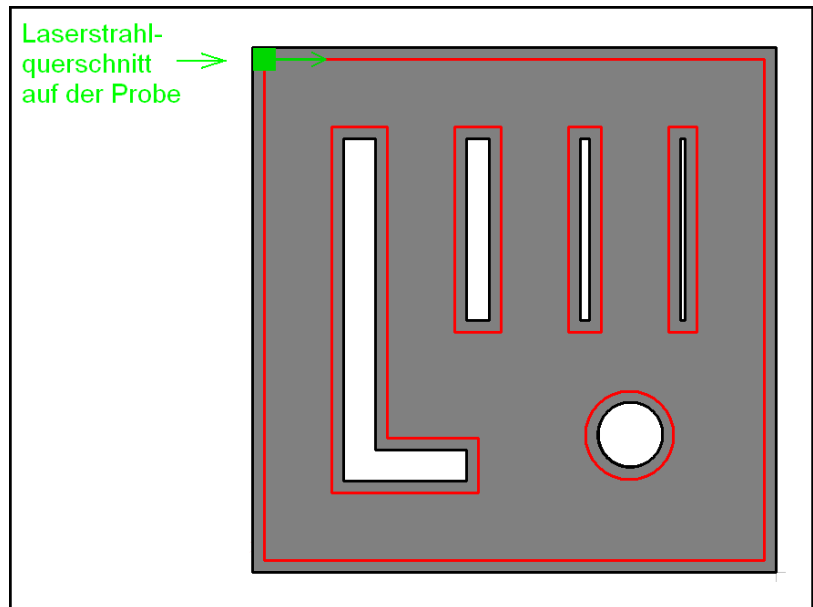
Um möglichst stufenfreie Flanken zu erzeugen sind also eine Vielzahl von Schichten (slices) nötig, was mit der Fluorlaseranlage jedoch einen immensen Zeitaufwand erfordern würde. Es wird im schrittsynchronen Betrieb gearbeitet, was eine Laserfrequenz von maximal 100 Hz zulässt, da es sonst aufgrund der Trägheit der Achsen (und des Koordinatentisches) zu fehlerhaftem Auslösen von Laserpulsen kommt. Aus diesem Grund wurden in der Folge ausschließlich $2^{1/2}$ D-Strukturen erzeugt. Diese Volumen wurden jedoch auch gesliced um in jeder Schicht die Bearbeitungsrichtung um 90 ° drehen zu können. Auf diese Weise sollen eventuelle Vorzugsrichtungen und durch die Bearbeitungsdauer auftretende Leistungsschwankungen des Lasers kompensiert werden.

Um eine $2^{1/2}$ D- oder eine 3D-Struktur in ein Material einbringen zu können muss diese Mikrostruktur zunächst in einem geeigneten Konstruktionsprogramm generiert werden. Zu beachten ist hierbei, dass nicht der Körper, welcher im Material verbleiben soll, konstruiert wird, sondern jenes Volumen, dass es abzutragen gilt.

Hierzu wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit das Konstruktionsprogramm „Solid Works 2004“ verwendet.

Weiterhin ist zu beachten, dass den Konstruktionabmaßen ein, von der Maskengröße abhängiger, Offset hinzugegeben werden muss. Die programmierten Positionen entsprechen bei der Programmabarbeitung dem Maskenmittelpunkt, was bedeutet, dass in alle lateralen Richtungen um die halbe Maskengröße versetzt auch noch ablatiert wird.

Abb. 6.66:
Veranschaulichung der
Strukturkonstruktion mit
Offset.



In obiger Prinzipskizze stellen die schwarzen Kanten die entstehenden Strukturgrenzen dar, die roten Geometrien entsprechen den zu konstruierenden Konturen.

Die konstruierten Volumen werden als STL - File gespeichert und mit Hilfe eines Konverters in ein G – Code Maschinenprogramm umgewandelt. In der Bedieneroberfläche des Konverters sind verschiedene Eingaben vorzunehmen, unter anderem die Anzahl der Slices. Diese richtet sich nach der gewünschten Strukturtiefe und den Abtragsparametern, welche den Abtrag je Slice bestimmen. Hier wird auch definiert, wie sich die Bearbeitungsrichtung von Schicht zu Schicht ändern soll.

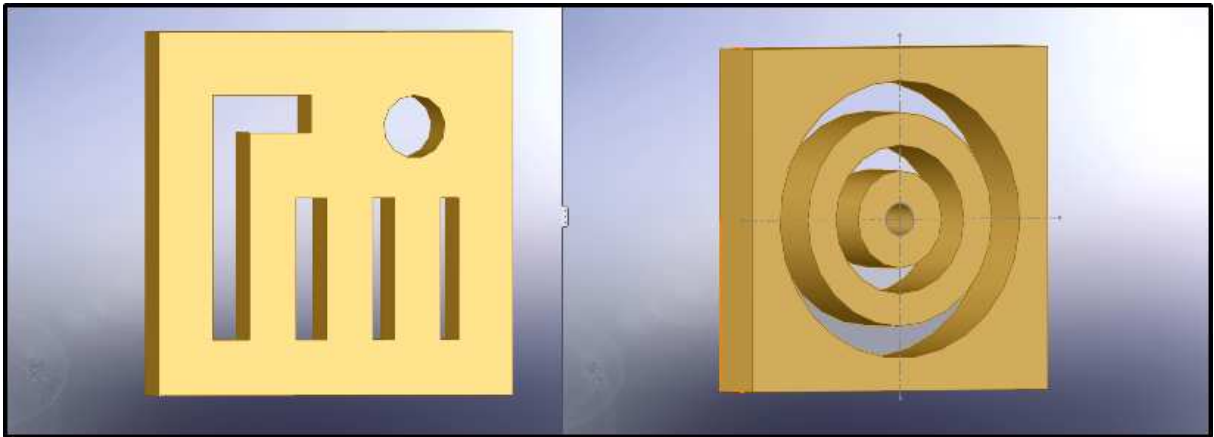


Abb. 6.67: Ansicht der konstruierten abzutragenden Volumina.

Die links abgebildete Struktur stellt das abzutragende Volumen der folgend Eckstruktur genannten Form dar. Die verbleibenden Stege weisen unter Verwendung der 25- μm -Quadratmaske Breiten von 35 μm , 25 μm , 10 μm und 5 μm (von links nach rechts) auf. Der Solldurchmesser des Zylinders liegt bei 75 μm , die Gesamtgröße bei 575 μm . Bei der Fertigung mit der 10- μm -Quadratmaske (in Abbildung) ist die Sollbreite der Stege identisch mit oben genannten, jedoch liegt der Durchmesser des Zylinders hier nur bei 35 μm und die Gesamtgröße bei 225 μm .

Die rechts dargestellte Struktur wird in der Folge Ringstruktur genannt. Die Verbleibenden Zylinder beziehungsweise Hohlzylinder weisen dabei unter Verwendung einer, in der Abbildung, 25 μm großen Kreißmaske von innen nach außen Größen von 15 μm Durchmesser sowie 10 μm und 25 μm Wandstärke auf. Die Gesamtausdehnung der Struktur beträgt dabei 555 μm .

Kommt hingegen eine 10 μm große Kreismaske zum Einsatz, so beträgt die Gesamtgröße 260 μm , der Durchmesser des Zylinders 10 μm und die Wandstärken der Hohlzylinder 10 μm bzw. 25 μm .

Diese Vier Demonstrationsstrukturen wurden in einen sprödharten Werkstoff, hier stellvertretend Corning 7980 sowie in den Kunststoff TOPAS 5013 eingebracht und im Nachgang vermessen.

6.5.2 Ergebnisse der Demonstrationsstrukturen

Die einzelnen Demonstrationsstrukturen wurden unter verschiedenen Parametern strukturiert. Bei Corning 7980 wurde bei einer Fluenz von 3 J/cm^2 gearbeitet. Für die mit der $25\text{-}\mu\text{m}$ -Quadratmaske gefertigte Eckstruktur kamen dabei 4 Überfahrten zum Einsatz, bei der kleinen Eckstruktur waren es deren 5, bei der großen Ringstruktur wurden 12 Schichten abgearbeitet und bei der kleinen 3.

Beim Kunststoff TOPAS 5013 wurde stets mit einer Fluenz von $H = 1 \text{ J/cm}^2$ gearbeitet. Bis auf die große Ringstruktur, bei welcher nur einmal überfahren wurde, kamen immer 4 Überfahrten zum Einsatz. Die Laserfrequenz lag bei jeder Struktur bei 100 Hz , die Pulsüberlappung bei 90% . Nach der Bearbeitung wurden sämtliche Strukturen mit Zelluloseazetat gereinigt.

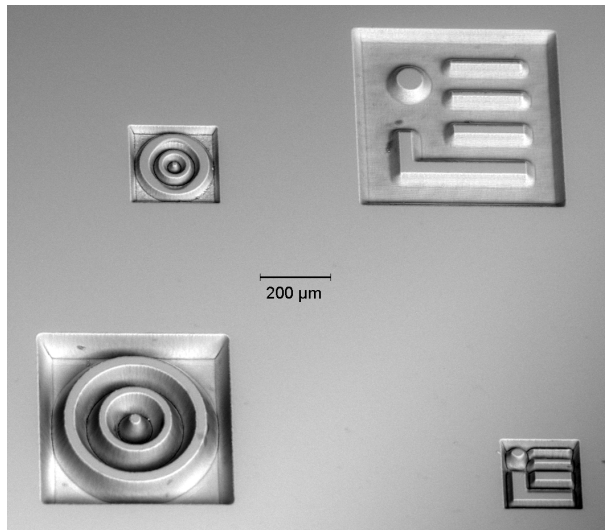
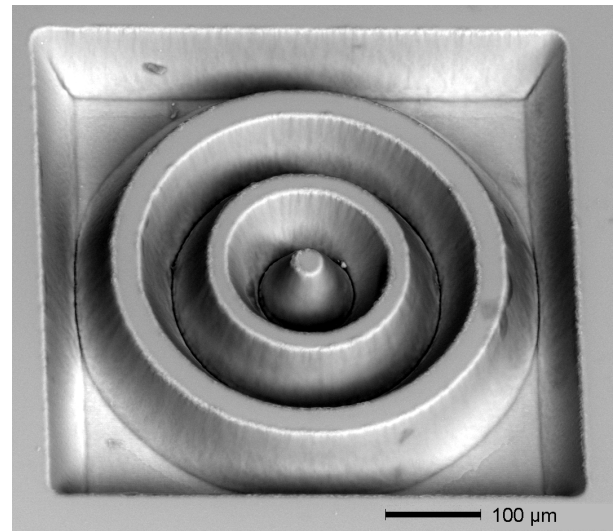


Abb. 6.68: Übersicht der in Quarzglas eingebrachten Demonstrationsstrukturen.

Da die Pulsüberlappung konstant bei 90% lag wurde der Puls-zu-Puls-Abstand mit geringer werdender Maskengröße ebenfalls kleiner. Unter Verwendung der Masken mit einer lateralen Ausdehnung von $10 \mu\text{m}$ auf dem Substrat abgebildet betrug der Weg, den die Achsen zwischen zwei Pulsen verfahren mussten lediglich einen μm . Ein Messsystem wertet mit entsprechender Software die Verfahrstrecke aus und nach einem μm wird ein weiterer Laserpuls ausgelöst. Beachtet man nun die Masse der Achsen und des Koordinatentisches, so ist verständlich, dass es gerade bei Beschleunigungsabschnitten zum fehlerhaften Auslösen von Pulsen kommen kann. So können sich die Achsaufbauten aufschwingen oder aufgrund ihrer Trägheit beim Beschleunigen verwinden.

Abb. 6.69: REM-Aufnahme der mit der 25 μm großen Maske (abgebildet) erzeugten Ring-Struktur.



Bei einer Puls-zu-Puls-Distanz von 2,5 μm sind keine fehlerhaften Abträge zu erkennen. Die Ringe bildeten sich kreisrund aus, die äußeren Kanten sind glatt und gerade. Es sind auch keine Ausplatzungen zu sehen. Die geneigten Ebenen wirken sehr glatt und weisen keinerlei Stufen auf. Der Strukturboden in den Ecken erscheint sehr eben. Allerdings hätten sich auch zwischen den Ringen ebene Bereiche von 25 μm Breite ausbilden sollen. Die ist durch die große Strukturtiefe von 70 μm nicht mehr gegeben, da sich die Strukturkanten wie in den Grundlagenuntersuchungen gezeigt nur bis zu einem bestimmten Winkel ausbilden und dann durch den zunehmenden Reflexionsgrad und der zunehmenden bestrahlten Fläche kein Materialabtrag an den Kanten sondern nur an deren Übergang zum Strukturboden stattfindet.

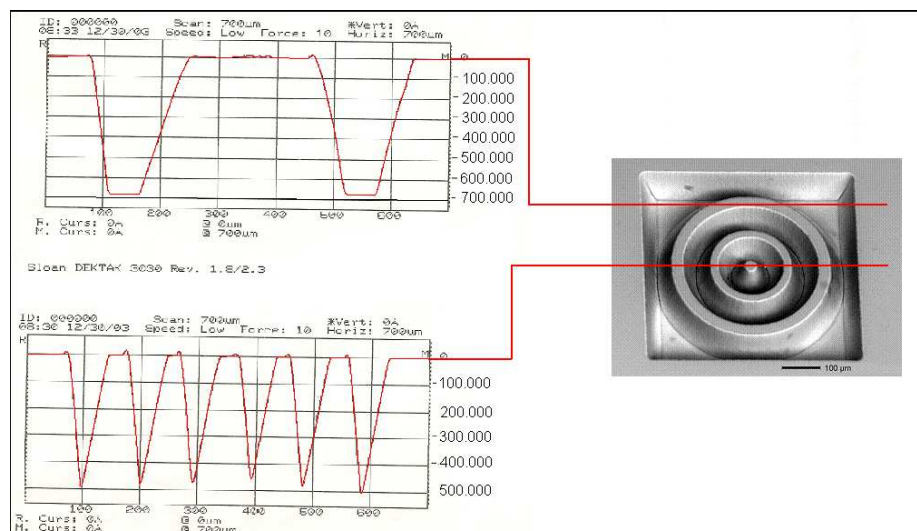


Abb. 6.70: Profilaufnahme der Ringstruktur mit Dektak 3030.

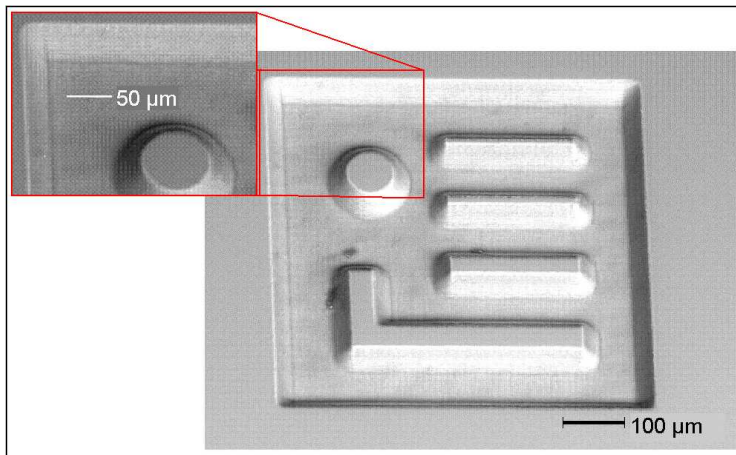


Abb. 6.71: REM-Aufnahme der mit der 25 µm großen Maske (abgebildet) erzeugten Eck-Struktur.

Auch die größere Eckstruktur bildet sich ähnlich hochwertig aus. Es traten keine Ausplatzungen oder Abtragsfehler auf und der Strukturboden wirkt sehr eben. Da sich die Struktur lediglich etwa 40 µm tief ausbildet liegt an der geringeren Anzahl der Überfahrten. In diesem Versuchsteil wurden nur 4 Überfahrten realisiert. Auch die schmalen Stege von bis hinab zu 5 µm werden mit sehr guten Kantenqualitäten erzeugt. Am Zylinder eines Durchmessers von 75 µm an der Oberfläche (aufgrund der Kantenneigung erscheint er als Kegelstumpf) zeigt sich, dass auch runde oder gekrümmte Geometrien bei ausreichender Größe mit Quadratmasken gefertigt werden können.

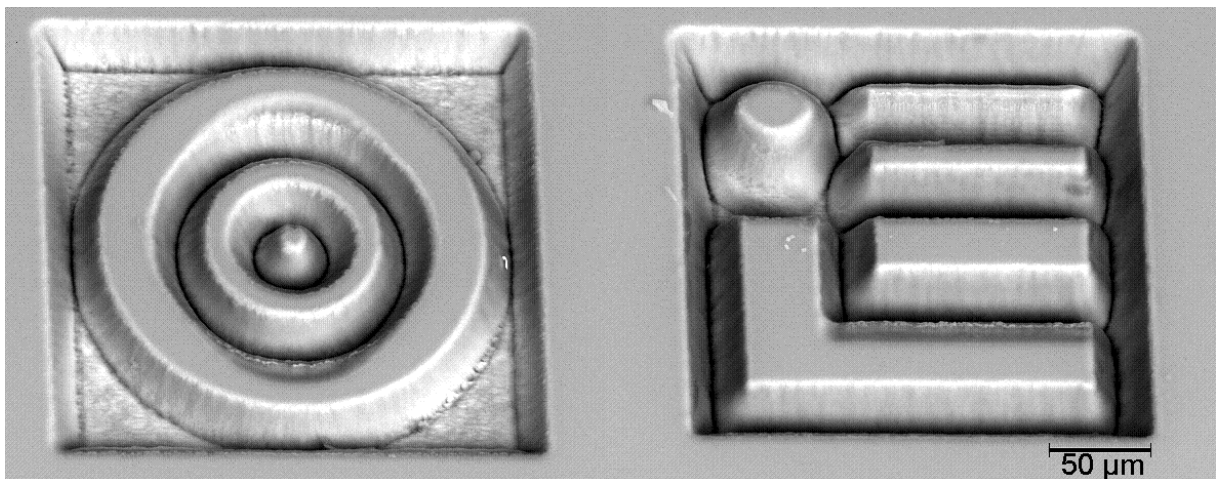


Abb. 6.72: REM-Aufnahme der kleineren Demonstrationsstrukturen in Corning 7980.

In den kleinen Demonstrationsstrukturen können deutliche Abtragsfehler erkannt werden. So zeigt sich an der ober- und Unterseite des Zylinders in der Eckstruktur ein zu starker Abtrag. Dies tritt auch am „L“ der Eckstruktur (hier liegend und gespiegelt) auf. Und auch bei der Ringstruktur ist an der Innenseite des äußeren Ringes ein solcher Fehler zu erkennen. Da dies nur in der einen Richtung auftritt obwohl sämtliche Bearbeitungsrichtungen zum Einsatz kamen lässt sich damit erklären, dass die eine Achse des Positionierungssystems die andere trägt, um so ein zweidimensionales Verfahren zu ermöglichen. Damit trägt die

untere Achse auch eine größere Last, was zu einer erhöhten Trägheit führt. Während diese „schwere“ Achse also bei diesen Beschleunigungen zum Verkippen und damit Auslösen von Pulsen an den falschen Stellen führt ist die obere noch ausreichend „leicht“, um den Geschwindigkeitswechseln ohne Positionierfehlern folgen zu können. Eine Möglichkeit, diese Strukturierungsfehler zu vermeiden ist es, die Strecken, auf welchen nicht ablatiert werden soll mit der gleichen Geschwindigkeit zu bearbeiten wie jene Strecken mit Materialabtrag. Bisher kam hier die 5fache Geschwindigkeit zum Einsatz, was zu Beschleunigungen und Verzögerungen führte.

Es zeigte sich, dass die Quarzglasprobe sehr gut mit Zelluloseazetat zu reinigen war. Da die Strukturenoberflächen recht glatt und die Flanken nicht zu steil waren löste sich das ausgehärtete Reinigungsmittel mitsamt des Debris vollständig. Anders verhielt es sich bei den kleinen Strukturen in TOPAS 5013.

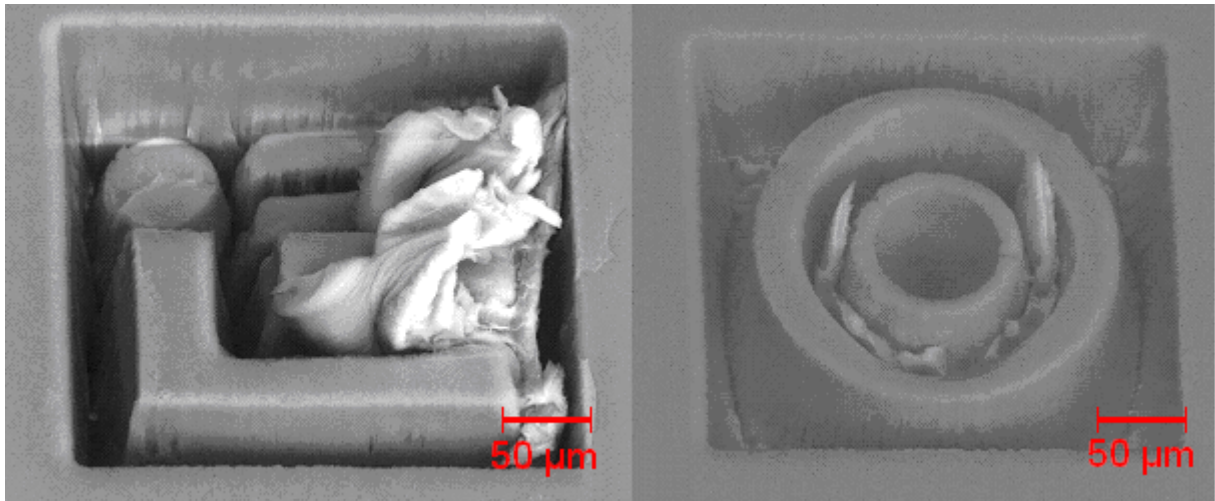


Abb. 6.73: REM-Aufnahme der kleineren Strukturen in TOPAS 5013.

In obiger Abbildung sind die kleine Eckstruktur sowie die kleine Ringstruktur abgebildet. Diese weisen Tiefen von ca. 100 µm auf. Da sich die Kanten in TOPAS aufgrund des größeren Absorptionskoeffizienten und der geringeren Schwellfluenz deutlich steiler ausbilden als in Corning treten auch Spalte mit einem größeren Aspektverhältnis auf. Aus diesen lässt sich das ausgehärtete Zelluloseazetat deutlich schlechter entfernen. Es reißen ganze Stücke von der abzuziehenden Folie ab und verbleiben in der Struktur. Die Reinigung mit Zelluloseazetat ist also nur bis zu einer gewissen Strukturtiefe und Detailgröße sinnvoll. Auch sind bei diesen Strukturen wieder die nur in einer Richtung (in der Abbildung in der Vertikalen) auftretenden Abtragsfehler zu erkennen.

7 Zusammenfassung / Ausblick

Im Verlauf der Arbeiten konnten die untersuchten Materialien Corning 7980, D263T, Saphir, Kalziumfluorid, Magnesiumfluorid sowie der Kunststoff TOPAS 5013 hinsichtlich ihres Abtragsverhaltens erkundet und charakterisiert werden. Dabei stellte sich Magnesium als ein nur sehr zeitaufwendig und in einem nur sehr engen Parameterfenster bearbeitbarer Werkstoff heraus.

Für alle zum Einsatz gekommenen Werkstoffe wurden Tabellen und Grafiken derer Abtragsraten in Abhängigkeit der eingebrachten Fluenz sowie des Abtragsverhaltens bei verschiedenen Laserparameterkombinationen erstellt. Diese können in kommenden Untersuchungen und gezielten Strukturierungen als Richtwerte verwendet, und so beispielsweise zum Abschätzen der Strukturtiefe, herangezogen werden.

Weiterhin wurde gezeigt, dass Bohrungen mit Tiefen von bis zu 350 μm und Durchmessern bis 25 μm erzeugt werden können. Auch hier stellte sich Magnesiumfluorid als das am schwierigsten zu strukturierende Material heraus.

Bei der Erzeugung von diffraktiven optischen Elementen konnte die Positioniergenauigkeit der Laseranlage als den Anforderungen genügend charakterisiert werden und auch die Einzelabträge mit einer Stufung von wenigen 10 nm je nach Material und Fluenz entsprechen den Anforderungen an DOEs. Allerdings musste hier erkannt werden, dass das Beobachtungssystem nicht zur Kontrolle von Strukturen weniger μm Größe geeignet ist. So war es nicht möglich, bei Strukturen von 5 μm die Abbildungsebene zu bestimmen. Entsprechend kann so auch der Versatz der Einzelabträge nicht bestimmt werden.

Zudem musste in diesem Versuchsteil festgestellt werden, dass der Laserstrahl inzwischen eine inhomogene Intensitätsverteilung aufweist. So erscheint es als notwendig die Komponenten der Strahlführung und -formung nach dreijährigem Betrieb der Anlage neu zu justieren. Die erzeugten Demonstrationsstrukturen verdeutlichten, dass eine Schrittweite von 1 μm bei einer Laserfrequenz von 100 Hz zu fehlerhaften Abträgen führt. Eine Vermeidung dessen lässt sich nur durch einen Erhöhten Zeitaufwand erkaufen werden.

Zukünftig sollte geprüft werden, ob eine flächige Strukturierung sowohl in der Hin- als auch in der Rückfahrt möglich ist, um so die Bearbeitungsdauer zu minimieren. Hierfür müssen gegebenenfalls die Konverter angepasst werden.

Auch ein System zur Abstandsmessung direkt in der Bearbeitungskammer ist geplant, um die erreichte Strukturtiefe ohne Probenentnahme zur anschließenden Weiterbearbeitung messen zu können.

Um elektrische Überschlüsse im Lasergerät bei sehr hohen Luftfeuchtigkeiten zu vermeiden sollte zudem die ins Lasergehäuse angesaugte Luft getrocknet werden.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 3.1: Mikrogehobelttes Abformwerkzeug. [5].
- Abbildung 3.2: Prinzip der Ultraschallbearbeitung.
- Abbildung 3.3: Prinzip des Abrasivwasserstrahlens.
- Abbildung 3.4: 12-stufige Mikrostruktur [6].
- Abbildung 3.5: Optisch wirkende Gitterstrukturen in ta-C und Quarzglas [8].
- Abbildung 3.6: In SQ1 eingebrachte Kreuzstrukturen [8].
- Abbildung 3.7: Aufnahme der in eine Glasfaser eingebrachten Bohrungen [8].
- Abbildung 4.1: Mikrobearbeitungssystem EX-157.
- Abbildung 4.2: Der Laser LPF 220i [10].
- Abbildung 4.3: Querschnitt des Resonators [11].
- Abbildung 4.4: Anordnung der optischen Komponenten.
- Abbildung 4.5: Transmissionsverhalten des Abschwächers [10].
- Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau des Strahlabschwächers.
- Abbildung 4.7: Prinzip der Strahlteilung mittels zweier Treppenspiegel [12].
- Abbildung 4.8: Definition der Strahlachsen [10].
- Abbildung 4.9: Quadratmaske mit einer Kantenlänge von ca. 200 μm .
- Abbildung 4.10: Objektiv mit Schutzgasdüse.
- Abbildung 4.11: Bedienplatz der Bearbeitungsstation.
- Abbildung 5.1: Transmissionsverhalten einer Quarzglasprobe [15].
- Abbildung 5.2: Transmissionsverhalten von D263T [18].
- Abbildung 5.3: Transmissionsverhalten einer CaF₂-Probe [20].
- Abbildung 5.4: Qualitatives Transmissionsverhalten von Magnesiumfluorid [22].
- Abbildung 5.5: Transmissionsverhalten einer 3 mm dicken Saphirprobe [25].
- Abbildung 5.6: Chemischer Aufbau des Copolymers TOPAS [27].
- Abbildung 5.7: Transmissionsverhalten einer 3 mm dicken TOPAS-Probe [27].
- Abbildung 6.1: Matrix der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten.
- Abbildung 6.2: Messtiefe des Oberflächenprofilometers *Sloan Dektak 3030*.
- Abbildung 6.3: Bearbeitungsregime eines Flächenabtrages.
- Abbildung 6.4: Theoretischer Kantenneigungswinkel.
- Abbildung 6.5: Beispiel einer Rauigkeitsmessung.
- Abbildung 6.6: Abtragsrate pro Puls in Corning 7980.
- Abbildung 6.7: Erreichte Strukturturen der Flächenabträge in Corning 7980.
- Abbildung 6.8: Rauigkeiten der Flächenabträge in Corning.
- Abbildung 6.9: Strukturturen von Flächenabträgen bei variierter Fluenz.
- Abbildung 6.10: Übersicht der verschiedenen Abtragsraten für Corning 7980.

- Abbildung 6.11: Flächenstruktur mit 32 Überfahrten.
- Abbildung 6.12: Strukturboden.
- Abbildung 6.13: Abtragsrate pro Puls in D263T.
- Abbildung 6.14: Abtragstiefen der bei 2,0 J/cm² erzeugten Strukturen.
- Abbildung 6.15: Abtragstiefen der bei 3,0 J/cm² erzeugten Strukturen.
- Abbildung 6.16: Flächenstrukturierung mit 16 Überfahrten.
- Abbildung 6.17: Strukturboden.
- Abbildung 6.18: Struktur gefertigt mit 3 J/cm², 95 % Pulsüberlapp.
- Abbildung 6.19: Struktur mit 3 J/cm², 97,5 % Pulsüberlappungsgrad.
- Abbildung 6.20: Struktur bei 98,75 % ÜLP
- Abbildung 6.21: Abtragsrate pro Puls in Kalziumfluorid.
- Abbildung 6.22: Abtragstiefen der bei 2,0 J/cm² erzeugten Strukturen.
- Abbildung 6.23: Abtragstiefen der bei 3,0 J/cm² erzeugten Strukturen.
- Abbildung 6.24: Beispiel einer Strukturtopographie.
- Abbildung 6.25: Topographie in y-Richtung.
- Abbildung 6.26: Lichtmikroskopische Aufnahme der Strukturoberfläche.
- Abbildung 6.27: Quadratstruktur bei 95 % Überlapp.
- Abbildung 6.28: Der Strukturboden eines Flächenabtrages.
- Abbildung 6.29: Aufnahme der Ausplatzungen in Magnesiumfluorid.
- Abbildung 6.30: Erreichte Strukturiefen bei H = 3,0 J/cm².
- Abbildung 6.31: Erreichte Strukturiefen bei H = 3,5 J/cm².
- Abbildung 6.32: Ausplatzung einer Flächenstrukturierung.
- Abbildung 6.33: Abtragstiefen in Magnesiumfluorid.
- Abbildung 6.34: Abtragsrate pro Puls in Saphir.
- Abbildung 6.35: Übersicht der Einzelabträge in Saphir.
- Abbildung 6.36: Erreichte Strukturiefen bei konstanter Fluenz in Saphir.
- Abbildung 6.37: Abtragstiefen bei verschiedenen Fluenzen.
- Abbildung 6.38: 2 J/cm²; 90 % ÜLP; 16 Überfahrten.
- Abbildung 6.39: 2 J/cm²; 90 % ÜLP; 32 Überfahrten.
- Abbildung 6.40: 2 J/cm²; 95 % ÜLP; 4 Überfahrten.
- Abbildung 6.41: 2 J/cm²; 95 % ÜLP; 8 Überfahrten.
- Abbildung 6.42: 2 J/cm²; 97,5 % ÜLP; 4 Überfahrten.
- Abbildung 6.43: 2 J/cm²; 98,75 % ÜLP; 1 Überfahrt.
- Abbildung 6.44: 1,5 J/cm²; 90 % ÜLP; 4 Überfahrten.
- Abbildung 6.45: 1,5 J/cm²; 95 % ÜLP; 1 Überfahrt.
- Abbildung 6.46: 3 J/cm²; 90 % ÜLP; 4 Überfahrten.
- Abbildung 6.47: 3 J/cm²; 95 % ÜLP; 1 Überfahrt.

- Abbildung 6.48: Abtragsrate pro Puls in Topas 5013.
- Abbildung 6.49: Strukturtiefen in TOPAS 5013 bei verschiedenen Fluenzen.
- Abbildung 6.50: Rauigkeiten der Strukturen.
- Abbildung 6.51: Strukturboden bei 0,15 J/cm².
- Abbildung 6.52: Strukturboden bei 0,25 J/cm².
- Abbildung 6.53: Strukturboden bei 0,5 J/cm².
- Abbildung 6.54: Bohrungstiefen in Borosilikatglas bei 75 µm Lochdurchmesser.
- Abbildung 6.55: Abtragstiefen in Borosilikatglas bei 3,0 J/cm².
- Abbildung 6.56: REM-Aufnahme einer Bohrung mit 75 µm und 25.000 Pulsen.
- Abbildung 6.57: REM-Aufnahme einer Bohrung mit 75 µm und 200 Pulsen.
- Abbildung 6.58: REM-Aufnahme einer Bohrung in Saphir.
- Abbildung 6.59: Bohrung mit einem Durchmesser von 30 µm in Kalziumfluorid.
- Abbildung 6.60: Halbkugelförmiger Abtrag in Magnesiumfluorid.
- Abbildung 6.61: REM-Aufnahme einer mit 50 µm Durchmesser.
- Abbildung 6.62: Schliffbild von Bohrungen in TOPAS 5013.
- Abbildung 6.63: Ausschnitt aus Bohrungsmatrix in TOPAS 5013.
- Abbildung 6.64: REM-Aufnahme einer Versuchsmatrix in Corning bei 2 J/cm².
- Abbildung 6.65: Versuchsmatrix in D263T bei 0,5 J/cm² gefertigt.
- Abbildung 6.66: Veranschaulichung der Strukturkonstruktion mit Offset.
- Abbildung 6.67: Ansicht der konstruierten abzutragenden Volumina.
- Abbildung 6.68: Übersicht der in Quarzglas eingebrachten Demonstrationsstrukturen.
- Abbildung 6.69: REM-Aufnahme der Ring-Struktur in Corning.
- Abbildung 6.70: Profilaufnahme der Ringstruktur mit Dektak 3030.
- Abbildung 6.71: REM-Aufnahme der Eckstruktur in Corning.
- Abbildung 6.72: REM-Aufnahme der kleineren Demonstrationsstrukturen in Corning 7980.
- Abbildung 6.73: REM-Aufnahme der kleineren Strukturen in TOPAS 5013.

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 4.1: Technische Parameter des Positioniersystems. [12]
- Tabelle 5.1: Übersicht der Eigenschaften von Quarzglas [14].
- Tabelle 5.2: Übersicht der Eigenschaften von D263T [17].
- Tabelle 5.3: Übersicht der Eigenschaften von Kalziumfluorid [19].
- Tabelle 5.4: Übersicht der Eigenschaften von Magnesiumfluorid [23].
- Tabelle 5.5: Übersicht der Eigenschaften von Saphir [26].
- Tabelle 6.1: Übersicht der Pulse / FE bei verschiedenen Parametern.
- Tabelle 6.2: Untersuchung zur Inkubation in Kalziumfluorid.
- Tabelle 6.3: Untersuchung zur Inkubation in Magnesiumfluorid.

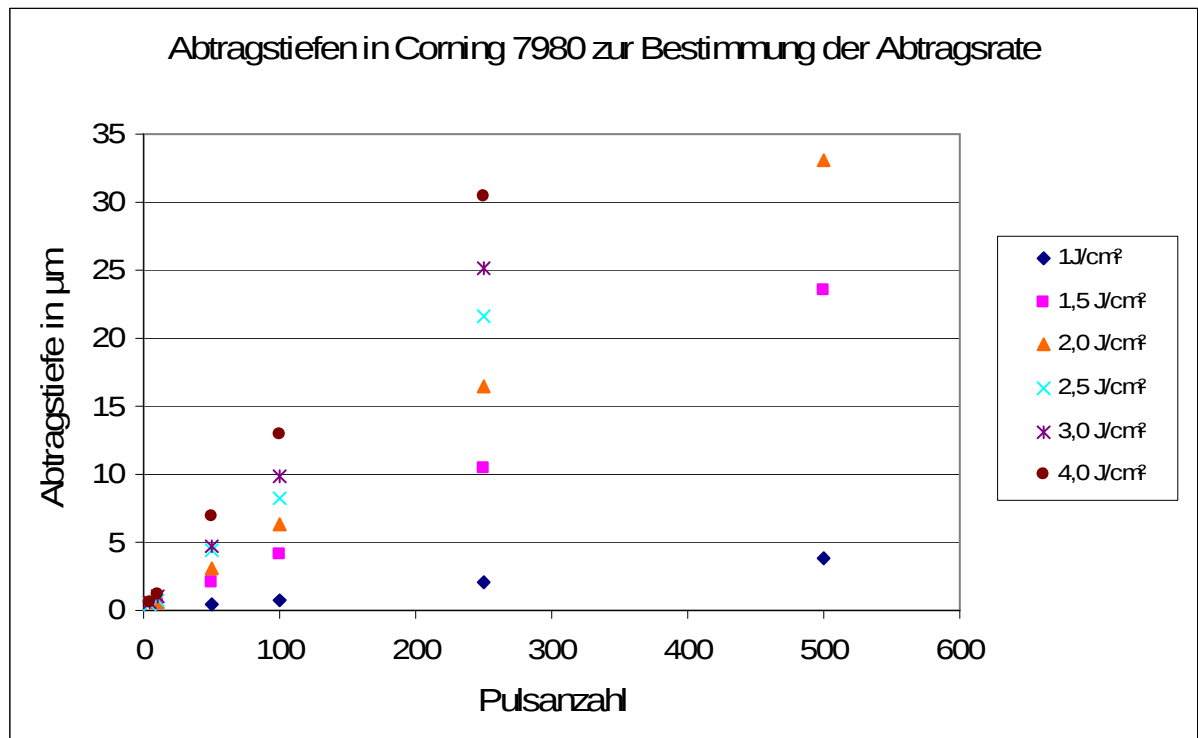
Literaturverzeichnis

- [1] Technische Universität Ilmenau, FG Glas- und Keramiktechnologie
URL:<http://www.leuze-verlag.de/gt/heft/aufsatz/200710/MST-2530-2538.pdf> -
verfügbar am 27.07.2009
- [2] mikrogas chemtech GmbH
URL:http://www.mikrogas.com/index.php?PAGE_ID=522# -
verfügbar am 27.09.2009
- [3] RWTH Aachen University
URL:<http://www.zlw-ima.rwth-aachen.de/micro/htm/download/BWAW/glasmikrotech.pdf> - verfügbar am 27.07.2009
- [4] Forschungszentrum Karlsruhe
URL:http://www.fzk.de/fzk/groups/ttb/documents/internetdokument/id_057441.pdf - verfügbar am 27.07.2009
- [5] Wolfgang Ehrfeld
„Handbuch Mikrotechnik“
Carl Hanser Verlag München Wien 2002
- [6] Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG
URL:<http://www.boehringer-ingelheim.de/produkte/mikrosystemtechnik/technologien/mikrostrukturierung.htm> - verfügbar am 27.07.2009
- [7] Pfeiffer, Manuel:
Femtosekundenlaserstrukturierung von wide-bandgap-Materialien,
Diplomarbeit 2008 Mittweida
- [8] Hähnel, Falk: Arbeitsunterlagen Mikrobearbeitungsstation EX-157
- [9] Fritz Kurt Kneubühl, Markus Werner Sigrist
„Laser“, 6.durchgesehene Auflage
Teubner Verlag Wiesbaden 2005
- [10] Hähnel, Falk: Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser,
Diplomarbeit 2006 Mittweida
- [11] Gebrauchsanleitung LPF 200i – User Manual
- [12] 3D-Micromac, Chemnitz
Handbuch zur Mikrobearbeitungsstation EX-157
- [13] Corning Incorporated
URL:http://www.corning.com/docs/specialtymaterials/pisheets/H0607_hpfs_Standard_ProductSheet.pdf - verfügbar am 27.07.2009
- [14] GVB – Solutions in Glass
URL:http://www.g-v-b.de/kat/pros/q_roehren_d.pdf - verfügbar am 27.07.2009

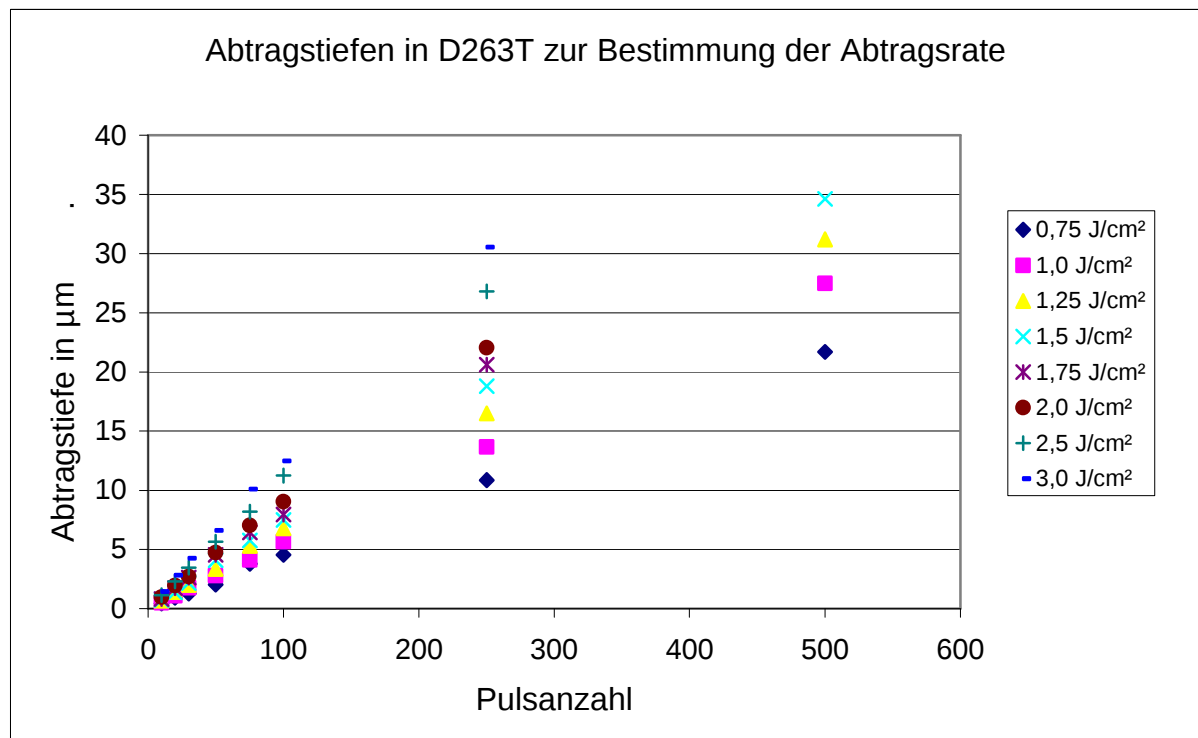
- [15] Präzisions Glas & Optik GmbH
URL:[http:// www.pgo-online.com/de/katalog/kurven/quarzglas-transmission.html](http://www.pgo-online.com/de/katalog/kurven/quarzglas-transmission.html) -
verfügbar am 27.07.2009
- [16] Gaeta Group - Quantum and Nonlinear Photonics
URL:[http:// .focus.aep.cornell.edu/Papers/autosilica.pdf](http://.focus.aep.cornell.edu/Papers/autosilica.pdf) -
verfügbar am 27.07.2009
- [17] Präzisions Glas & Optik GmbH
URL:[http:// www.pgo-online.com/de/katalog/D263.html](http://www.pgo-online.com/de/katalog/D263.html) - verfügbar am 27.07.2009
- [18] Präzisions Glas & Optik GmbH
URL:[http://www.pgo-online.com/de/katalog/kurven/pdfkurven/D/
D263TUV280400d.pdf](http://www.pgo-online.com/de/katalog/kurven/pdfkurven/D/D263TUV280400d.pdf) - verfügbar am 27.07.2009
- [19] Korth Kristalle GmbH
URL:<http://www.korth.de/de/503728952d091450d/503728952d09c361d.htm> -
verfügbar am 27.07.2009
- [20] Crystal GmbH
URL:<http://www.crystal-gmbh.com/pdf/OPTIK/CAF2.PDF> -
verfügbar am 27.07.2009
- [21] Wiley InterScience
URL:[http://www3.interscience.wiley.com/journal/110557363/abstract?
CRETRY=1&SRETRY=0](http://www3.interscience.wiley.com/journal/110557363/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0) - verfügbar am 27.07.2009
- [22] TRINOS Vakuum-Systeme GmbH
URL:[http://shop.trinos.de/vakuum_s/trinos-optisches-glas-magnesium-fluorid,pd
2070!0,,GSGxxx-mag.html](http://shop.trinos.de/vakuum_s/trinos-optisches-glas-magnesium-fluorid,pd2070!0,,GSGxxx-mag.html) - verfügbar am 27.07.2009
- [23] Korth Kristalle GmbH
URL:<http://www.korth.de/de/503728952d091450d/503728952d0b56737.htm> -
verfügbar am 27.07.2009
- [24] Almaz Optics
URL:<http://www.almazoptics.com/MgF2.htm> - verfügbar am 27.07.2009
- [25] Korth Kristalle GmbH
URL:[http://www.korth.de/de/printable/503728952d091450d/50372895520a
0e608.htm](http://www.korth.de/de/printable/503728952d091450d/50372895520a0e608.htm) – verfügbar am 27.07.2009
- [26] GWI - Grazyna Walawski Industriesaphire
URL:http://www.sappro.de/contentDEU/GWI_Saphir_Eigenschaften.pdf -
verfügbar am 27.07.2009

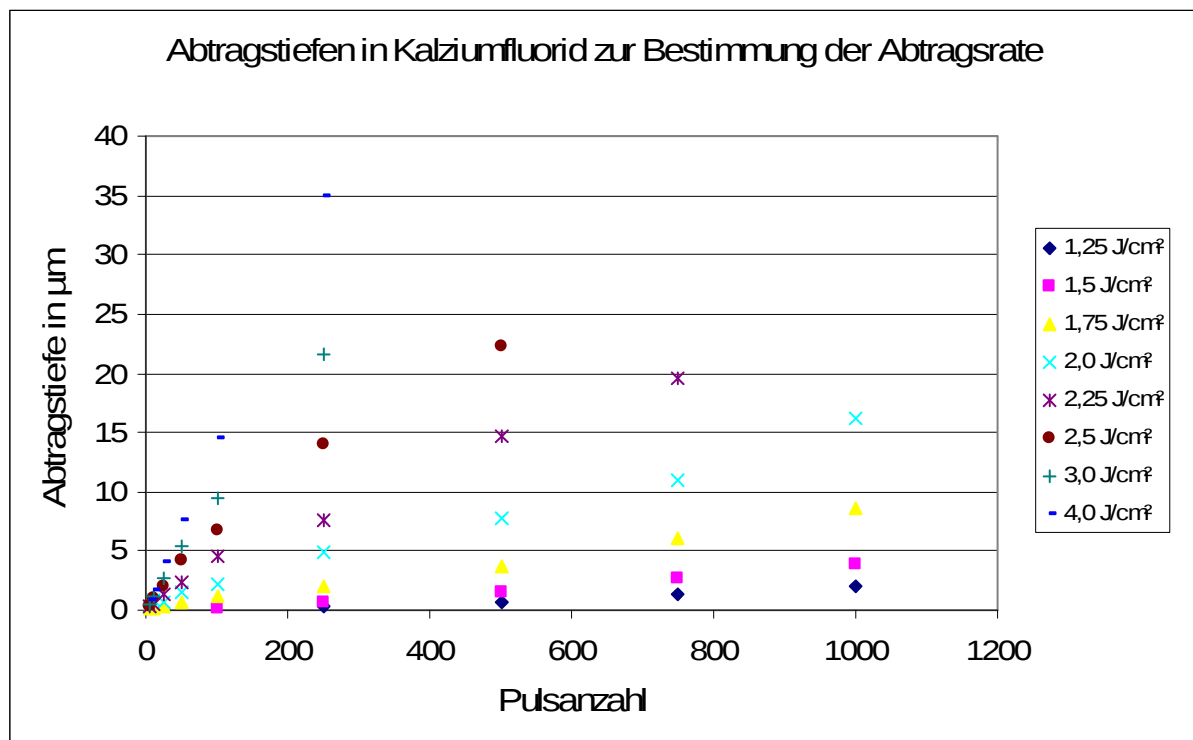
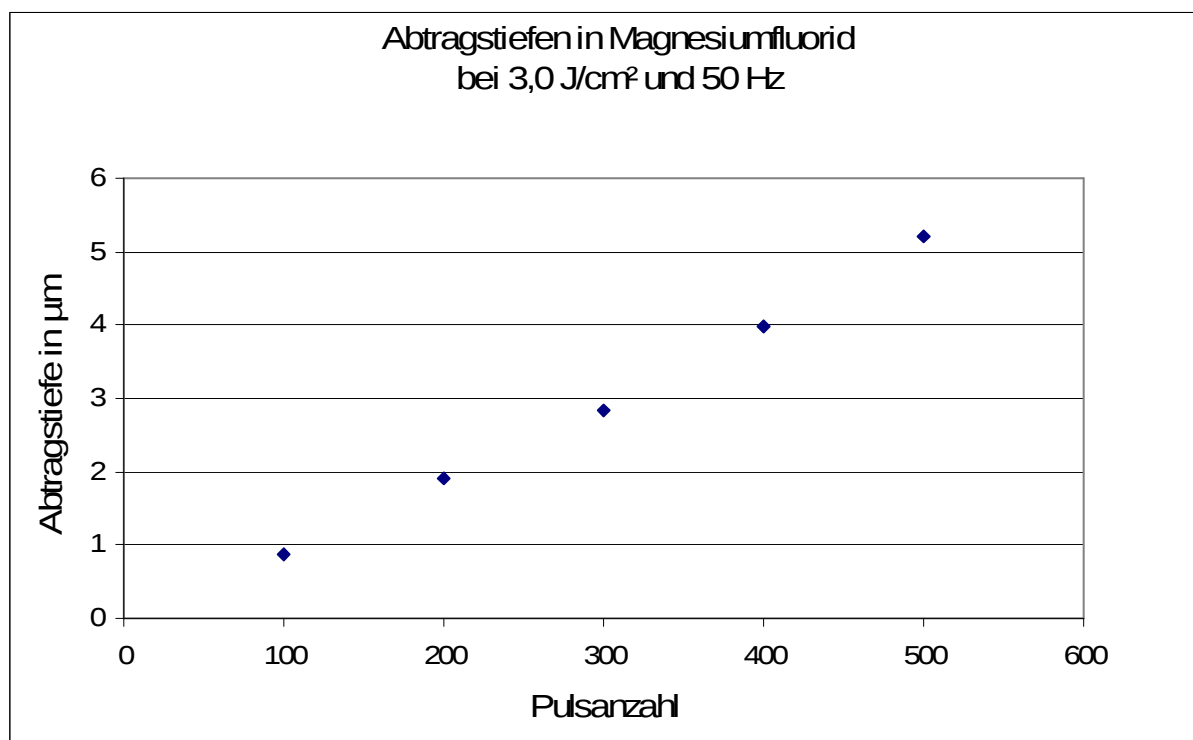
- [27] Ticona GmbH
URL:http://www.ticona.at/at/topas_broschuere_deutsch.pdf -
verfügbar am 27.07.2009
- [28] S. Martin – Dissertation, Freie Universität Berlin 2004
URL:http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000001589/02_2-Grundlagen.pdf?hosts= - verfügbar am 29.07.2009
- [29] Fachhochschule Darmstadt
URL:http://www.ttn-hessen.de/npkpublish/filestore/77/01_doe.pdf -
verfügbar am 29.07.2009

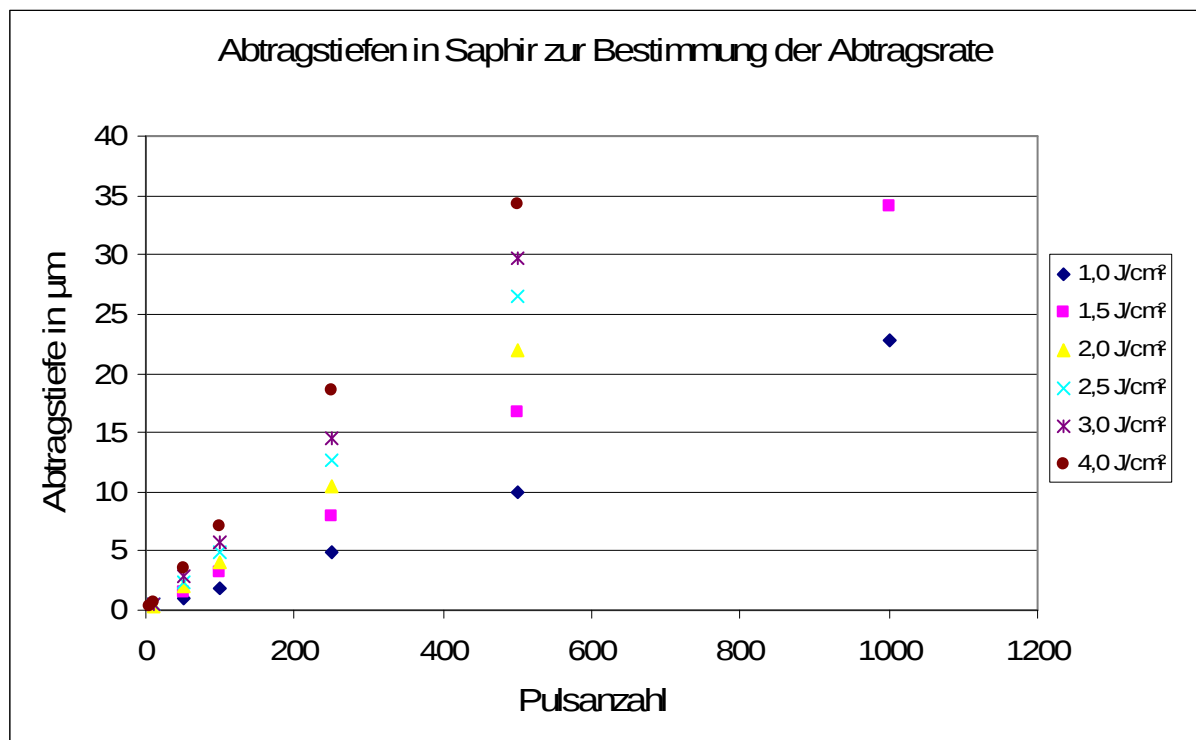
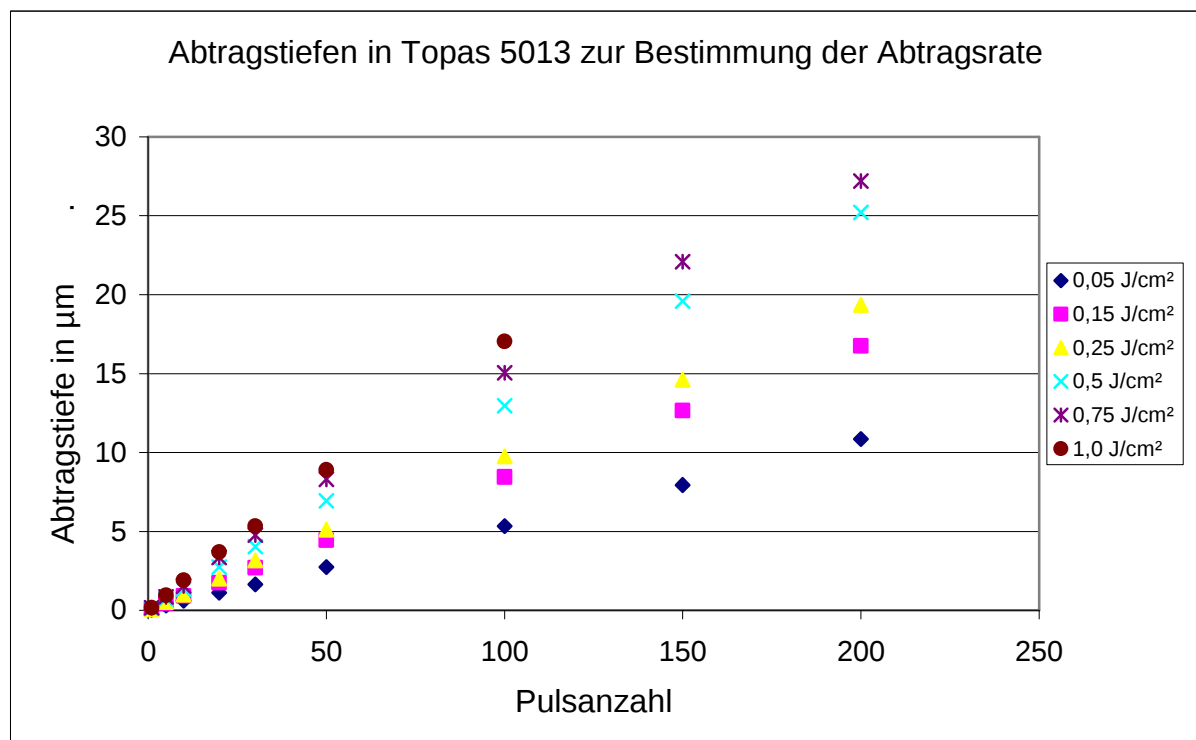
Anlage 1: Tiefen der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in Corning 7980.



Anlage 2: Tiefen der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in D263T.



Anlage 3: Tiefen der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in Kalziumfluorid.**Anlage 4:** Tiefen der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in Magnesiumfluorid.

Anlage 5: Tiefen der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in Saphir.**Anlage 6:** Tiefen der Einzelabträge zur Bestimmung der Abtragsraten in TOPAS 5013.

Anlage 7: Tiefen der Flächenabträge in Corning 7980 bei variierten Fluenzen.

Überlappungs- grad	Fluenz [J/cm ²]	mittlere Tiefe [µm]	Abtrags- rate [µm / Puls]
90 % 4 ÜF	1,0	1,9	4,75
	1,5	10,8	27
	2,0	18,9	47,25
	2,5	25,8	64,5
	3,0	32,6	81,5
95 % 1 ÜF	1,0	1,4	3,5
	1,5	10,2	25,5
	2,0	17,8	44,5
	2,5	24,6	61,5
	3,0	31	77,5

Anlage 8: Tiefen der Flächenabträge in Corning 7980 bei 2,0 J/cm².

Überlappungs- grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags- tiefe [µm]
90%	1	100	4,7
	2	200	9,4
	4	400	18,9
	8	800	36,8
	16	1600	70,1
	32	3200	125
95%	1	400	17,8
	2	800	34,4
	4	1600	60,9
	8	3200	111,6
97,50%	1	1600	43,6
	2	3200	86,2
	4	6400	137
98,75%	1	6400	70,5

Anlage 9: Tiefen der Flächenabträge in D263T bei 2,0 J/cm².

Überlappungs- grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags- tiefe [µm]
90%	1	100	7,5
	2	200	15,1
	4	400	30,8
	8	800	59,3
	16	1600	110
	32	3200	200
95%	1	400	30,2
	2	800	58,2
	4	1600	113,5
	8	3200	205
97,50%	1	1600	84,6
	2	3200	150
	4	6400	180
98,75%	1	6400	135

Anlage 10: Tiefen der Flächenabträge in D263T bei 3,0 J/cm².

Überlappungs- grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags- tiefe [µm]
90%	1	100	11,2
	2	200	22,5
	4	400	43,4
	8	800	87,3
	16	1600	165
	32	3200	290
95%	1	400	42,1
	2	800	85,7
	4	1600	155
	8	3200	250
97,50%	1	1600	110
	2	3200	210
	4	6400	325
98,75%	1	6400	180

Anlage 11: Tiefen der Flächenabträge in Kalziumfluorid bei 2,0 J/cm².

Überlappungs-grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags-tiefe [µm]
90%	1	100	1,36
	2	200	1,4
	4	400	3,38
	8	800	7,65
	16	1600	14,73
	32	3200	35,45
95%	1	400	6,65
	2	800	12,5
	4	1600	23,12
	8	3200	37,15
97,50%	1	1600	8,57
	2	3200	15,53
	4	6400	29,62
98,75%	1	6400	14,65

Anlage 12: Tiefen der Flächenabträge in Kalziumfluorid bei 3,0 J/cm².

Überlappungs-grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags-tiefe [µm]
90%	1	100	5,5
	2	200	10,63
	4	400	20,7
	8	800	37,8
	16	1600	65,6
	32	3200	107
95%	1	400	10,3
	2	800	19,8
	4	1600	40,4
	8	3200	104,5
97,50%	1	1600	25,3
	2	3200	46,2
	4	6400	91,9
98,75%	1	6400	43,4

Anlage 13: Tiefen der Flächenabträge in Magnesiumfluorid bei 3,0 J/cm².

Überlappungs-grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags-tiefe [µm]
90%	1	100	-
	2	200	0,2
	4	400	0,9
	8	800	1,6
	16	1600	2,6
	32	3200	3,5
95%	1	400	-
	2	800	0,4
	4	1600	0,9
	8	3200	2,3
97,50%	1	1600	0,8
	2	3200	1,7
	4	6400	3,9
98,75%	1	6400	2,5

Anlage 14: Tiefen der Flächenabträge in Magnesiumfluorid bei 3,5 J/cm².

Überlappungs-grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags-tiefe [µm]
90%	1	100	0,6
	2	200	1,2
	4	400	3
	8	800	5,7
	16	1600	12,2
	32	3200	30,6
95%	1	400	1,8
	2	800	2,4
	4	1600	3,5
	8	3200	4,8
97,50%	1	1600	1,5
	2	3200	3,3
	4	6400	5,8
98,75%	1	6400	4,3

Anlage 15: Tiefen der Flächenabträge in Saphir bei variierten Fluenzen.

Überlappungs- grad	Fluenz [J/cm ²]	mittlere Tiefe [µm]	Abtrags- rate [µm / Puls]
90 % 4 ÜF	1,0	2,5	6,25
	1,5	5,6	14
	2,0	12	30
	2,5	15,2	38
	3,0	18,4	46
95 % 1 ÜF	1,0	4,5	11,25
	1,5	8,4	21
	2,0	12,4	31
	2,5	16,1	40,25
	3,0	19,3	48,25

Anlage 16: Tiefen der Flächenabträge in Saphir bei 2,0 J/cm².

Überlappungs- grad	Anzahl Überfahrten	Anzahl Pulse / FE	Abtrags- tiefe [µm]
90%	1	100	2,8
	2	200	5,9
	4	400	12
	8	800	23,6
	16	1600	45,9
	32	3200	84,3
95%	1	400	12,4
	2	800	24,3
	4	1600	46,7
	8	3200	90,7
97,50%	1	1600	38,5
	2	3200	70,7
	4	6400	140
98,75%	1	6400	73,4

Anlage 17: Tiefen der Flächenabträge in TOPAS 5013.

Überlappungs- grad [%]	Fluenz H [J/cm ²]	ÜF	mittlereTiefe [µm]
90%	0,5	1	24,4
		2	49,7
	0,25	1	19,2
		2	39,0
	0,15	1	16,1
		2	30,3
		4	42,6
90%		1	41,0

Anlage 18: Verteilung der Laserpulszahlen zur Erzeugung der DOEs.

39	23	49	45	15	44	12	37	29	2	11	48	6	13	11	14	39	34	39	33
6	20	40	34	17	35	30	38	16	32	8	41	17	22	40	4	37	8	23	20
43	4	40	23	41	25	2	46	18	31	47	36	17	4	18	34	43	25	32	35
36	32	4	17	41	2	44	21	25	26	41	24	10	41	35	41	1	10	26	3
8	8	33	48	36	43	36	21	17	42	15	37	34	30	32	14	37	21	5	13
16	33	23	27	37	21	20	19	47	10	14	2	29	27	18	42	11	8	26	32
24	2	25	45	40	35	5	16	18	6	29	12	26	36	8	30	45	36	7	29
37	47	19	22	23	12	47	36	50	23	16	9	47	12	4	15	6	46	37	19
34	7	38	19	12	4	19	49	28	38	10	34	36	45	13	23	3	35	25	9
3	28	30	45	13	6	16	2	19	31	36	14	1	6	26	22	13	31	19	14
22	17	43	47	12	34	32	33	22	2	11	20	9	47	20	7	18	43	21	37
28	46	36	18	14	39	7	19	37	39	48	44	37	19	15	45	30	48	10	14
6	37	49	49	40	35	39	10	19	22	8	27	3	25	43	17	37	6	36	44
42	25	28	40	25	8	42	28	6	38	39	26	31	29	28	49	32	45	40	9
19	26	49	42	44	25	23	18	49	14	25	48	5	16	16	47	19	14	47	3
22	48	43	36	44	45	46	31	6	42	11	8	13	29	36	13	36	49	44	6
21	25	41	16	7	28	43	27	44	48	25	10	30	42	26	23	5	42	43	26
9	14	14	25	44	40	44	48	15	26	31	10	16	50	8	28	36	7	37	37
21	43	3	45	38	16	22	5	40	30	22	40	19	24	17	6	39	12	20	34
45	35	7	40	4	15	24	46	2	45	24	31	12	42	23	19	8	43	6	7

Erklärung

Hiermit erkläre ich, diese Arbeit selbstständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt zu haben.

Mittweida, den 12. August 2009

René Bertram