

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr

**Marcel Wolf**

## **Mikrostrukturierung von Metallen und Wide Band Gap Materialien mit ultrakurzen Laserpulsen**

Mittweida, 2015



---

**BACHELORARBEIT**

---

**Mikrostrukturierung von  
Metallen und Wide Band Gap  
Materialien mit ultrakurzen  
Laserpulsen**

Autor:  
**Herr**

**Marcel Wolf**

Studiengang:  
**Physikalische Technik**

Seminargruppe:  
**PT12wL-B**

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

Zweitprüfer:  
**M.Sc. Hagen Grüttner**

Einreichung:  
**Mittweida, 16.Oktober.2015**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2015**



# Bibliografische Beschreibung:

Wolf, Marcel:

Mikrostrukturierung von Metallen und Wide Band Gap Materialien mit ultrakurzen Laserpulsen. - 2015. - ,9, 3,68,15 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2015

## Referat:

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden Strukturierungsexperimente an verschiedenen Materialien mittels ultrakurzen Laserpulsen durchgeführt. Die untersuchten Materialien sind Stahl (Thyrodur 2990), Wolframcarbid, Quarzglas und PMMA. Die Versuche wurden mit der Laseranlage FS-150-10 durchgeführt. Ziel der Versuche war es Erkenntnisse über das Ablationsverhalten der untersuchten Materialien bei einer Pulsdauer von ca. 35 fs zu gewinnen. Diese Ergebnisse sollten mit denen für 150 fs verglichen werden um den Einfluss der Pulsdauer zu charakterisieren. Desweiteren sollten Einflussfaktoren, welche sich auf die Oberflächenrauheit auswirken untersucht werden. Dazu wurden Testfelder erzeugt und auf ihre Strukturtiefe und Oberflächenrauheit der strukturierten Bereiche untersucht.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Motivation zum Einsatz von Fs - Lasern</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Stand der Technik</b> .....	<b>5</b>
<b>4 Erzeugung der 35 fs Pulse im Versuch</b> .....	<b>9</b>
<b>5 Wechselwirkung Laserstrahl und Material</b> .....	<b>11</b>
5.1 <i>Das Zwei-Temperaturen-Modell</i> .....	12
<b>6 Die Bearbeitungsanlage</b> .....	<b>13</b>
6.1 <i>Das Lasergerät CPA 2010</i> .....	14
6.2 <i>Äußere Strahlführung und Zusatzsystem</i> .....	15
<b>7 Versuchsvorbereitungen</b> .....	<b>17</b>
7.1 <i>Abschwächerkurve des ersten Abschwächers</i> .....	17
7.2 <i>Liu Methode</i> .....	18
7.3 <i>Bestimmung des Fokusradius nach der Liu Methode</i> .....	19
7.4 <i>Bestimmung der Pulsdauer</i> .....	20
7.5 <i>Versuchsablauf</i> .....	21
<b>8 Auftretende Probleme</b> .....	<b>23</b>
<b>9 Eigenschaften der untersuchten Materialien</b> .....	<b>25</b>
9.1 <i>Stahl (Thyrodur 2990)</i> .....	25
9.2 <i>Wolframcarbid</i> .....	26
9.3 <i>Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade</i> .....	27

9.4	<i>PMMA Kunststoff</i> .....	27
<b>10</b>	<b>Die Analysetechnik</b> .....	<b>29</b>
<b>11</b>	<b>Auswertung der Versuche</b> .....	<b>31</b>
11.1	<i>Untersuchungen an Stahl Thyrodur 1.2990</i> .....	32
11.1.1	Ablationsverhalten von Stahl Thyrodur 1.2990 .....	32
11.1.2	Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit .....	34
11.1.3	Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit .....	36
11.1.4	Zusammenfassung für das Material Stahl .....	38
11.2	<i>Untersuchungen an Wolframcarbid</i> .....	39
11.2.1	Ablationsverhalten von Wolframcarbid .....	39
11.2.2	Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit .....	42
11.2.3	Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit .....	43
11.2.4	Zusammenfassung für das Material Wolframcarbid .....	45
11.3	<i>Untersuchungen an Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade</i> .....	46
11.3.1	Ablationsverhalten von Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade ...	46
11.3.2	Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit .....	49
11.3.3	Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit .....	50
11.3.4	Zusammenfassung für das Material Quarzglas .....	52
11.4	<i>Untersuchungen an PMMA (Polymethylmethacrylat) Kunststoff</i> .....	54
11.4.1	Ablationsverhalten von PMMA Kunststoff .....	54
11.4.2	Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit .....	58
11.4.3	Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit .....	59
11.4.4	Zusammenfassung für das Material PMMA .....	61
<b>12</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b> .....	<b>63</b>
12.1	<i>Schwankung der spektralen Verbreiterung</i> .....	63
12.2	<i>Der Schweif im Strahlprofil</i> .....	64
12.3	<i>Instabilität der spektralen Verbreiterung</i> .....	66
<b>13</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>67</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>69</b>
	<b>Anlagen</b> .....	<b>A-I</b>
	<b>Anlagen, Messwerte für Stahl</b> .....	<b>A-III</b>
	<b>Anlagen, Messwerte für Wolframcarbid</b> .....	<b>A-V</b>
	<b>Anlagen, Messwerte Quarzglas</b> .....	<b>A-IX</b>



---

<b>Anlage, Messwerte PMMA .....</b>	<b>A-XIII</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>X</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Schematischer Systemaufbau. ....	14
Abbildung 2 : Spektrum nach der Faser .....	20
Abbildung 3 : Überführtes Spektrum in den Frequenzraum .....	21
Abbildung 4 : Transformiertes Spektrum in Abhängigkeit der Pulsdauer .....	21
Abbildung 5 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.1.1.....	32
Abbildung 6 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.1.2.....	34
Abbildung 7 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.1.3.....	36
Abbildung 8 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.2.1.....	39
Abbildung 9 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.2.2.....	42
Abbildung 10 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.2.3.....	43
Abbildung 11 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.3.1.....	46
Abbildung 12 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.3.2.....	49
Abbildung 13 : verwendetes Spektrum in Versuch 11.3.3.....	50
Abbildung 14 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.4.1.....	54
Abbildung 15 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.4.2.....	58
Abbildung 16 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.4.3.....	59
Abbildung 17 : verwendete Spektren im Versuch 12.2. ....	63
Abbildung 18 : Bearbeitungsspektrum.....	66
Abbildung 19 : Spektrum nach Zusammenbruch.....	66



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Eigenschaften von dem verwendeten Thyrodur 2990 Substrat [18].	25
Tabelle 2 : Eigenschaften von dem verwendeten Wolframcarbid Substrat [19].	26
Tabelle 3 : Eigenschaften von Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade [20].	27
Tabelle 4 : Eigenschaften von dem verwendeten PMMA Substrat [21].	27
Tabelle 5 : Tiefenmesswerte Stahl im Versuch 11.1.1.	A-III
Tabelle 6 : Rauheitsmesswerte Stahl im Versuch 11.1.1.	A-III
Tabelle 7 : Rauheitsmesswerte Stahl im Versuch 11.1.2.	A-IV
Tabelle 8 : Rauheitsmesswerte Stahl im Versuch 11.1.3.	A-IV
Tabelle 9 : Tiefenmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.1.	A-V
Tabelle 10 : Rauheitsmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.1.	A-V
Tabelle 11 : Tiefenmesswerte Wolframcarbid verstimmtes Spektrum im Versuch 12.1.	..... A-VII
Tabelle 12 : Rauheitsmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.2.	A-VII
Tabelle 13 : Rauheitsmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.3.	A-VII
Tabelle 14 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.	A-IX
Tabelle 15 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.	A-IX
Tabelle 16 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.	A-X
Tabelle 17 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.	A-X
Tabelle 18 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.	A-XI
Tabelle 19 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.	A-XI

---

Tabelle 20 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.2.....	A-XII
Tabelle 21 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.3.....	A-XII
Tabelle 22 : Tiefenmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1. ....	A-XIII
Tabelle 23 : Rauheitsmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1. ....	A-XIII
Tabelle 24 : Tiefenmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1. ....	A-XIII
Tabelle 25 : Tiefenmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1. ....	A-XIV
Tabelle 26 : Rauheitsmesswerte PMMA im Versuch 11.4.2. ....	A-XIV
Tabelle 27 : Rauheitsmesswerte PMMA im Versuch 11.4.3. ....	A-XIV

# Aufgabenstellung

*„Femtosekundenlaser- Mikrobearbeitung von Metallen und Wide Band Gap Materialien mittels Pulsdauern von ca. 35 Femtosekunden“*

## Aufgabenstellung

- Literaturrecherche zur Femtosekundenlaser- Mikrobearbeitung, zu den Grundlagen der Wechselwirkung von Femtosekundenlaserpulsen mit verschiedenen Materialgruppen, welche sowohl den Stand der Technik als auch die bereits im Laserinstitut vorliegenden Ergebnisse auf dem Gebiet widerspiegelt. Beschaffung und Auswertung der Literatur.
- Justage des Lasersystems ( Faser , Strahlführung , Optik usw.)
- Bestimmung der Strahlparameter ( Strahlradius )
- Aufnahme der Abschwächerkurven ( 1. und 2. Abschwächer) zur Einstellung der Laserfluenz
- Untersuchung des Femtosekundenlaser- Ablationsprozesses an ausgewählten Materialien, insbesondere Quarzglas, Wolframcarbid-Hartmetall, einem ausgewählten Stahl und PMMA. Bestimmung und Vergleich der Ablationsschwellen und der Ablationsraten, für 35 fs sowie für 150 fs, in Abhängigkeit von der Energiefluenz bei der flächenhaften Strukturierung.
- Untersuchung des Einflusses, des Puls zu Puls Abstandes, auf die Rauheit der Strukturoberfläche
- Untersuchung des Einflusses der Strukturtiefe auf die Rauheit der Bodenstruktur

Für die Durchführung der Arbeitsaufgaben stehen die Femtosekundenlaseranlage FS-150-10 sowie Hollowcore-Faser mit Kompressor zur Verfügung.

Die für die Auswertung der erzeugten Strukturen erforderliche Mess- und Analysetechnik (optische Mikroskope, AFM, REM, Oberflächenprofilometer, Laserscanningmikroskop, Querschliffpräparation) wird durch die Hochschule Mittweida bzw. das Laserinstitut Mittelsachsen zur Verfügung gestellt.





# 1 Vorwort

Laser haben sich schon vor einigen Jahren in der Industrie, sowie in der Forschung, mithilfe ihrer zahlreichen Vorteile behauptet und etabliert. Es ist zu beobachten, dass der Bedarf an leistungsfähigen Lasern, für industrielle Anwendungen, stetig ansteigt und somit auch ein größerer Forschungsanteil, in dieser Richtung, erforderlich wird. Ob in der Medizin oder Autoindustrie, Laser haben ein sehr breites Einsatzspektrum. Von der Materialbearbeitung, über Beschriftungsarbeiten, bis hin zu diversen Messaufgaben. In der Medizintechnik werden Laser, zum Beispiel zur Behandlung von Fehlsichtigkeit, verwendet. In der Autobranche, am Beispiel von VW, werden die Dachnähte der Karosserien mithilfe von Laserstrahlung gelötet. Natürlich sind für verschiedene Einsatzgebiete, verschiedene Laser mit verschiedenen Eigenschaften notwendig. Für viele Arbeitsaufgaben eignet sich der Laser am Besten. In der Mikrostrukturierung ist der Laser als Werkzeug nicht mehr wegzudenken. Intensive Forschungen lassen auf industriell nutzbare Systeme in nicht allzu ferner Zukunft hoffen. Prinzipiell stellt der Laser eine sehr gute Alternative zu herkömmlichen Fertigungsverfahren dar.



## 2 Motivation zum Einsatz von Fs - Lasern

Mithilfe von Lasersystemen kann eine sehr präzise und feine Bearbeitung realisiert werden doch speziell bei der Mikrobearbeitung geraten die herkömmlichen Lasersysteme schnell an ihre Grenzen. Da aber ein wachsender Bedarf an Mikrosystemen und Strukturen zu verzeichnen ist, wird nach neuen Möglichkeiten zur Herstellung immer kleinerer Strukturen gesucht. Um diese Grenzen zu erweitern setzt man Ultrakurzpulslaser für die Mikrobearbeitung ein, welche mit ihren speziellen Vorteilen einen sehr kleinen Volumenabtrag erzielen, was eine kontrollierte Bearbeitung ermöglicht.

Die Vorteile von diesen Lasersystemen sollen im nachstehenden etwas näher beschrieben werden. Laser, die mit Pulsdauern im Femtosekunden Bereich ( $10^{-15}$  s) arbeiten, können die Energie ihrer Strahlung weitestgehend ohne Wechselwirkung mit den Randgebieten in das zu bearbeitende Material deponieren. Daraus folgt eine hohe Präzision bei der Bearbeitung. Zum anderen entstehen durch die kurze Pulsdauer sehr hohe Intensitäten, mit denen durch Ausnutzung nicht linearer Absorptionsprozesse auch für diese Wellenlängen transparente Substrate bearbeitet werden können. Das Substrat, welches bestrahlt wird, sublimiert durch die hohe eingekoppelte Energie. Dies zieht eine geringe thermische Belastung des Substrates nach sich. Durch den kurzen Wechselwirkungszeitraum, der durch die kurze Pulsdauer gegeben ist, kommt es kaum zu Gefügeveränderungen (Legierungen) im zu bearbeitenden Material. Des Weiteren werden gut wärmeleitende Substrate, wie zum Beispiel Kupfer, gut bearbeitbar. Mittels UKP – Laser können Materialien unabhängig ihrer optischen Eigenschaften bearbeitet werden. Der sehr kleine realisierbare Fokusedurchmesser von kleiner  $1\ \mu\text{m}$  ermöglicht eine hochpräzise Bearbeitung. Der Einsatz von Ultrakurzpulslasern zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität in Sicht auf die Anwendbarkeit auf verschiedene Materialien aus. Mittels UKP – Lasern können Metalle, Halbleiter, Polymere, Keramiken, Gläser und auch Komposit-Materialien bearbeitet werden. Auch die allg. Vorteile der Laserbearbeitung kommen mit zum Tragen. Dies betrifft zum Beispiel die berührungslose, kräftefreie Bearbeitung, welche beispielsweise bei der Strukturierung von Folien unabdingbar ist. Ebenso die Möglichkeit spröde Materialien zu verarbeiten ohne mechanische Beschädigungen wie Abplatzungen oder ausgeprägte Gratbildungen herbeizuführen. Deswegen ist der UKP - Laser in der Materialbearbeitung und vor allem in der Mikrostrukturierung, nicht mehr wegzudenken [16]. Da das Interesse für möglichst kurze Pulse in der Industrie immer größer wird, werden neue Lasersysteme mit immer kürzeren Pulsdauern notwendig. Um diese Entwicklung voranzutreiben wurden in dieser Arbeit Pulse mit Pulsdauern von ca. 35 fs untersucht. Um die physikalischen Vorgänge, bei der Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen, besser zu verstehen, näher zu charakterisieren und eventuelle Vorteile von solch kurzen Pulsdauern aufzuzeigen.



### 3 Stand der Technik

In Vorbetrachtung wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Das Augenmerk lag hierbei auf Literatur, die sich mit Pulsdauern von  $< 50$  fs befassten. Um Laserpulse im ultrakurzen Bereich zu erzeugen, gibt es verschiedene Varianten. Im Folgenden werden einige davon näher erläutert. Eine sehr verbreitete Möglichkeit, zur Erzeugung solcher kurzen Pulse, stellt die passive Modenkopplung da. Der erste Laser, der die passive Modenkopplung nutzte, war ein Ti:Saphir Laser im Jahr 1991. Dieses Verfahren nutzt den Kerr-Linsen Effekt, wodurch Pulsdauern von 5 fs erreicht wurden [1]. Der Kerr-Linsen Effekt beschreibt die Erscheinung der Selbstfokussierung von Laserstrahlung in Kristallen. Dieser Effekt wird beobachtbar, wenn sich hochintensive Laserstrahlung, zum Beispiel durch einen Ti:Saphir Kristall bewegt. Dies wird mit einem Pump Laserstrahl, welcher in die Mitte des Kristalls fokussiert wird, realisiert. Dadurch wird der Kristall im Zentrum auch am Stärksten gepumpt. Daraus ergibt sich in der Mitte eine hohe Intensität, der emittierten Strahlung, welche nach außen hin abnimmt. Diese über den Kristallquerschnitt verteilte emittierte Laserstrahlung, bewirkt eine Brechzahländerung in Abhängigkeit der Intensität, welche eine Selbstfokussierung nach sich zieht. Die Pulse, die die höchste Fokussierung aufweisen, werden verstärkt. Ultrakurze Laserpulse sind aber auch durch externe Kompression erzeugbar. 1981 wurde diese Methode erstmals verwendet. Hier werden die Selbstphasenmodulation- und Dispersionseffekte, von den Gruppenlaufzeiten, ausgenutzt. Indem man den Puls in eine Singlemode Glasfaser einkoppelte, wurde 1987 eine Pulsdauer von 6 fs bei einer Wellenlänge von 620 nm, realisiert. Unter Verwendung einer Dispersionskompensation, konnte im Jahr 1997 bei einer Hauptwellenlänge von 800 nm die Pulsdauer auf 4,5 fs gesenkt werden [1]. Als Dispersionskompensation wird ein Verfahren zur Reduzierung störender Dispersionserscheinung bezeichnet. Diese Bauteile sind speziell dotierte Glasfasern [4]. Das Verfahren, welches eine Singlemode-Glasfaser nutzt, wird durch diese auf Pulsenergien von geringen Nanojoule begrenzt, da eine höhere Pulsenergie die Zerstörung der Glasfaser herbeiführen würde. Im Folgenden soll ein grober Einblick in ausgewählte Experimente welche Pulsdauern  $< 50$  fs nutzen gegeben werden. Es wurde ein Experiment durchgeführt, welches sich mit der Thematik Mikrostrukturierung von organischen Materialien beschäftigte. Hier wurden Pulsdauern von 35 fs, unter Zuhilfenahme der pulse shaping Technologie [9], verwendet. Diese Pulse wurden bei einer Wellenlänge von 790 nm mit einem Ti:Saphir Verstärker erzeugt. Zur Bearbeitung wurden Biopolymere (Gelatin, Chitosan) verwendet. Es wurden die erzeugten Oberflächen und die dazugehörigen Durchmesser verglichen. Des Weiteren konnten Aussagen zum Einfluss der Lawinenionisation und Mehrphotonenabsorption getroffen werden. Zusammenfassend ist zu sagen, dass mithilfe der pulse shaping Technik geringere Durchmesser der erzeugten Strukturen erreicht wurde.

Eine weitere Untersuchung mit einer verwendeten Pulsdauer von 40 fs befasste sich mit der 3-D Bearbeitung von Quarzglas [10]. In diesem Substrat wurden in den Seitenwänden sogenannte Nanorippel [10] eingebracht. Diese besitzen unterschiedliche, adaptiv über die Polarisation der Strahlung einstellbare Azimutwinkel. In die bearbeiteten Strukturen werden im Nachgang LC- (liquid Crystal) Kristalle gegeben, welche sich in Abhängigkeit von den Nanorippel ausrichten. In diesem Versuch wurde ein verstärkter Modengekoppelter Ti:Saphir Laser verwendet, der bei einer zentralen Wellenlänge von 800 nm arbeitet. Die Repetitionsrate lag bei 1 kHz. Das Quarzglassubstrat wurde durch einen computergesteuerten XY-Tisch bewegt. Der Fokusbereich betrug rund 2  $\mu\text{m}$ . Die Bearbeitung wurde linienweise vorgenommen. So entstand eine 80  $\mu\text{m}$  lange, 20  $\mu\text{m}$  breite und 70  $\mu\text{m}$  tiefe Struktur. Die Strukturierung erfolgte mit einer Verfahrgeschwindigkeit von 10  $\mu\text{m}/\text{s}$ , bei einer Pulsenergie von 3  $\mu\text{J}$ . Durch die steigende Tiefe wurde die Pulsleistung durch leichtes Erhöhen angeglichen. Nach der Strukturierung wurden Materialablagerungen (Debris) mittels Ultraschall entfernt. Durch das Überlappen der Pulse wurde eine gleichmäßige Verteilung der Rippel erzielt. Mithilfe der Variation des Puls zu Puls Abstandes wurden Veränderungen in der Rippelstruktur beobachtet. Ebenso wurde durch langsameres Abfahren von 1  $\mu\text{m}/\text{s}$ , die Entstehung von sogenannten Bumps [10] (Hügel) und daraus folgend eine rauere Oberfläche beobachtbar. Die an den Seiten entstandenen Rippel wiesen eine Periode von etwa 170 nm auf. Der Boden der Struktur zeigt eine hohe Rauigkeit (aufgrund der Bumps) und keine Ausbildung gleichverteilter Rippel. Die Seitenwandrippel werden auf der einen Seite mithilfe in X-Richtung polarisierter und die andere Seite mit einer in Y-Richtung polarisierter Strahlung erstellt. In Zukunft verspricht diese Technik große Fortschritte zu erzielen und kann Verbesserungen in sogenannten LOC (lab on a chip) Anwendungen herbeiführen [10]. In einer anderen Abhandlung, die die Herstellung einer Mikrolinse mithilfe von fs Laserstrahlung behandelt, wird mit einer Pulsdauer von 40 fs gearbeitet [11]. Durch die sehr kleinen thermalen Effekte können mittels fs - Laserpulsen sehr genaue 3D Strukturen hergestellt werden. Da Quarzglas ein sehr verbreitetes optisches Material darstellt, wurde es zur Versuchsdurchführung ausgewählt. Quarzglas ist im Wellenlängenbereich von 190 nm bis ca. 3,5  $\mu\text{m}$  transparent und eignet sich damit gut für optische Anwendungen. Die Zwei Photonen-Floreszenz-Mikroskopie (TPFM) [11], ist ein wichtiges Hilfsmittel bei 3D Scans von organischen Gewebe. Demzufolge besteht ein großer Bedarf an mikro-optischen Elementen, wie zum Beispiel Mikrolinsen, Mikroprismen und Mikrofasern speziell für medizinische Anwendungen. In diesem Experiment wurde, mithilfe von fs Laserstrahlung und anschließendem Ätzen mit OH Flame polishing, eine Mikrolinse produziert. Zum Experiment selbst soll an dieser Stelle nur ein grober Überblick gegeben werden. Als Substrat wurde ein beidseitig polierter 1 mm dicker Quarzglaschip, mit einem Brechungsindex von 1,453 bei einer Wellenlänge von 800 nm, verwendet. Zur Bearbeitung wurde ein Ti:Saphir Laser mit einer Pulsdauer von 40 fs, einer Wellenlänge von 795 nm und einer Repetitionsrate von 1 kHz verwendet. Die direkte Bearbeitung erfolgte Linienweise. Die produzierte Linse wird charakterisiert durch einen Durchmesser von 800  $\mu\text{m}$ , einen Krümmungsradius von 430  $\mu\text{m}$  und einer Dicke von 270  $\mu\text{m}$ . Die Bearbeitungsgeschwindigkeit betrug 70  $\mu\text{m}/\text{s}$  bei einer mittleren Laserleistung von rund 5 mW. Der Fokusbereich lag bei ca. 1  $\mu\text{m}$ . Durch die Ausnutzung der nicht

linearen Absorbtiionsprozesse wurde das Quarzglas erst bearbeitbar. Nach der Bearbeitung erfolgte ein 80 minütiges Reinigungsverfahren in einem Ultraschallbad, welches aus 10 prozentiger Flusssäure bestand. Anschließend wurde die Linse noch poliert. Die Oberfläche wies leichte Fehler auf, welche auf das Ätzen der Bearbeitungsrückstände zurückzuführen sind [16].





## 4 Erzeugung der 35 fs Pulse im Versuch

Das in der Anlage integrierte Lasergerät erzeugt Laserpulse mit der Hauptwellenlänge 775 nm und Pulsdauern von 150 fs. Die Erzeugung dieser Pulse wird im Abschnitt 6.1 ausführlich erklärt. Da diese Pulse aber für die angestrebten Untersuchungen zu lang sind, wird ein Zusatzsystem (Abschnitt 6.2) zur Verkürzung der Pulsdauer notwendig. Dieses Zusatzsystem umfasst einen mit Argongas gefüllten Rezipienten mit integrierter Hohlleiter und einen reflektiven Gitterkompressor. Dieses Verfahren nutzt die spektrale Verbreiterung in Edelgasen und wurde 1996 entwickelt. Diese spektrale Verbreiterung macht es möglich höhere Pulsenergien zerstörungsfrei, über optische Elemente, zu übertragen und zu noch kürzeren Pulsdauern zu komprimieren. Mit dieser Art der Erzeugung von Laserpulsen sind aktuell Pulsdauern von 8 fs und Pulsenergien von einigen mJ erreichbar [1]. Im Folgenden soll, speziell im vorliegenden Fall, die Erzeugung dieser kurzen Pulsdauern etwas näher erläutert werden. Der Eingangspuls, den das Lasergerät CPA 2010 erzeugt, wird in die Mitte der Hohlleiter fokussiert. Aufgrund des in der Hohlleiter befindlichen Argongases, kommt es, durch den Effekt der Selbstphasenmodulation, zu einer spektralen Verbreiterung des Eingangspulses. Der Effekt der Selbstphasenmodulation beschreibt die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Intensität. Durch diese Änderung werden die Laufzeiten der einzelnen Teile des Laserpulses beeinflusst. Dies führt zu einer zeitlichen Veränderung der Phase und dementsprechend ebenfalls zur Beeinflussung der Frequenz [17]. Durch die Ausnutzung dieser Phänomene wird die spektrale Verbreiterung generiert. Dieses nun aus vielen verschiedenen Wellenlängen bestehende Spektrum wird nun mithilfe des reflektiven Gitterkompressors komprimiert, indem die Laufzeitunterschiede der einzelnen im Spektrum enthaltenen Wellenlängen ausgenutzt werden. Vereinfacht gesagt werden die langen Wellenlängen bewusst auf kürzere Wege geleitet, unter Ausnutzung der wellenlängenabhängigen Beugung am Gitter.



## 5 Wechselwirkung Laserstrahl und Material

Am Anfang der Wechselwirkung von Laserstrahlung und Material stehen die Reflexion, Transmission, Streuung und Absorption. Diese sind abhängig von der Wellenlänge, der Pulsdauer, und dem Material selbst. Zur Beschreibung vom Absorptionsverhalten von Materialien wird der Absorptionsgrad  $\alpha$  genutzt. Der Absorptionsgrad gibt an wie viel Energie, eines auftreffenden Laserstrahls vom Material aufgenommen wird. Wenn man nur lineare Prozesse betrachtet kann man prinzipiell sagen, dass der Absorptionsgrad von der Wellenlänge der Strahlung abhängt. Eine Beschreibung der Eindringtiefe der Strahlung ist über das Lambert-Beer'schen Gesetz möglich. Die Eindringtiefe der Energie ins Material ist abhängig vom Absorptionsgrad des Materials und der zur Bearbeitung verwendeten Intensität der Strahlung. Wenn aber die Pulsdauer extrem kurz und somit hohe Intensitäten auftreten, kann es zu nichtlinearen Absorptionsprozessen (z.B. Mehrphotonenabsorption) kommen. Durch dieses Phänomen werden Materialien, die eigentlich für eine Wellenlänge transparent sind, mit dieser bearbeitbar [8]. Um einen Abtrag mithilfe von Laserstrahlung zu realisieren, muss die eingekoppelte Energie pro Flächeneinheit die sogenannte Ablationsschwelle (Schwellfluenz) übersteigen. Diese ist für jedes Material unterschiedlich. Im Folgenden sollen die generellen physikalischen Abläufe, die bei der Materialbearbeitung mithilfe von Lasersystemen, zum Tragen kommen, erläutert werden. Zunächst ist es vom Material abhängig, ob freie Ladungsträger vorhanden (z.B. Stahl) sind oder erst generiert werden müssen (z.B. Quarzglas). Im Folgenden soll am Beispiel von Stahl der Ablauf der Vorgänge beschrieben werden. Der Laserstrahl trifft auf das Substrat (Stahl) und wird von dem Elektronengas (freibewegliche Ladungsträger) absorbiert. Das angeregte Elektronengas ist bestrebt, die aufgenommene Energie an das Atomgittersystem zu übertragen. Dadurch werden Phononen angeregt und es kommt zur sogenannten Elektronen-Phononen Kopplung. Zur Beschreibung der erläuterten Vorgänge, ausschließlich in Metallen, wird das Zwei-Temperaturen-Modell verwendet (Abschnitt 5.1). Bei Materialien, die keine freibeweglichen Ladungsträger aufweisen (z.B. Quarzglas), müssen diese erst generiert werden. Der Laserstrahl trifft auf das zu bearbeitende Material und überträgt seine Energie an die Elektronen des Festkörpers. Diese nehmen im Zuge dessen gequantelte Energien auf, die sie in einen angeregten Zustand versetzen. Wenn diese Energie die Ionisationsenergie des Materials übersteigt, bilden sich Ionen aus [8]. Diese nun freien Elektronen stellen das „erzeugte Elektronengas“ dar, welches weiter angeregt wird und seine Energie an das Gitter mittels Anregung von Phononen (Elektronen-Phononen Kopplung) abgibt. Durch die extrem kurze Wechselwirkung zwischen Laserpuls und Material werden die Elektronen, aufgrund ihrer geringen Wärmekapazität, auf sehr hohe Temperaturen erhitzt. Desweiteren steigt, infolge der starken Erwärmung der Elektronen, der Elektronengasdruck. Wenn die Kraft des Elektronengasdruckes die Bindungskräfte im Festkörper übersteigt, resultiert ein Materialabtrag [3].

## 5.1 Das Zwei-Temperaturen-Modell

Das Zwei Temperaturen Modell wird zur Beschreibung des Materialabtrages mit ultrakurzen Laserpulsen, in Metallen, verwendet. In diesem Modell wird das Elektronen- und Phononensystem, sowie die Kopplung zwischen beiden betrachtet. Jedem System werden eine Temperatur, Elektronen- und Phonontemperatur, zugewiesen [12].

Um die Hauptgleichungen zu erläutern, folgt nun eine Legende der in den Gleichungen vorkommenden Variablen.

Legende :  $C_{el}$  ... Wärmekapazität (Wärmespeicherzahl) der Elektronen [15]

$C_{ph}$  ... Wärmekapazität (Wärmespeicherzahl) der Phononen [15]

$T_{el}$  ... Temperatur der Elektronen [13]

$T_{ph}$  ... Temperatur der Phononen [13]

$H(T_{el}, T_{ph})$  ... Elektronen - Phononen Kopplung [13]

$$(1) C_{el}(T_{el}) \frac{\partial}{\partial t} T_{el} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{el} \frac{\partial}{\partial z} T_{el} \right) - H(T_{el}, T_{ph}) + S(z, t) \quad [13]$$

$$(2) C_{ph}(T_{ph}) \frac{\partial}{\partial t} T_{ph} = H(T_{el}, T_{ph})$$

In der eindimensionalen Betrachtung beschreibt die Gleichung (1), mithilfe der Wärmekapazität der Elektronen und der zeitlich abhängigen Temperatur, die sich ändernde Energiedichte im Elektronengas. Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt die Diffusion der Elektronen. Der zweite Term  $H(T_{el}, T_{ph})$  charakterisiert den Energietransport zwischen Elektronen und Gitter. Der letzte Term in der Gleichung (1) stellt die Wärmequelle dar [13] [14]. Bei der Bearbeitung von Metallen werden 2 Ablationsregime sichtbar (siehe Diagramm 3). Daraus resultieren 2 unterschiedliche logarithmische Anpassungsfunktionen der einzelnen Regime. Das erste Ablationsregime lässt sich mit dem Lambert-Beer'schen Gesetz beschreiben. Wobei die logarithmische Funktion im 2. Ablationsregime den Einfluss der Wärmediffusionslänge der Elektronen beinhaltet [5].

## 6 Die Bearbeitungsanlage

Bei der verwendeten Anlage, handelt es sich um eine FS-150-10 der Firma 3D Micromac AG. Die Spezifikationen dieser Anlage sollen im Folgenden beschrieben und die Funktionsweise der wichtigsten Bauteile etwas näher erläutert werden. Zunächst kann diese Anlage in 2 Geräteebenen unterteilt werden (Abb.1). Auf der ersten Ebene befinden sich der erste Abschwächer sowie der Bearbeitungstisch. Das verbaute Achsensystem, welches den Bearbeitungstisch bewegt, besitzt einen Verfahrbereich von 200 mm x 200 mm und eine Verfahrgeschwindigkeit von bis zu 12 m/min. Die maximale Auflösung beschränkt sich auf 100 nm und die Positioniergenauigkeit liegt bei 1µm. Die Anlage besitzt außerdem einen klimatisierten Bearbeitungsraum. Das komplette System ist aufgebaut auf ca. 20 cm starken Granitplatten. Dies bringt einige Vorteile, wie zum Beispiel eine hohe Stabilität und Schwingungsunanfälligkeit, begründet durch die hohen Massen der Granitplatten, sowie eine geringe Wärmeausdehnung mit sich. Das Gehäuse ist durch Edelstahlplatten, die einzeln abnehmbar sind, verschlossen. Als optische Bänke nutzt man Boschprofile bestehend aus Aluminium, welche fest mit den Granitplatten verbunden sind. Auf Ebene 2, sind die optischen Bänke mit den Platten über eine Aluminiumkonstruktion verbunden. All das wird von einer Stahlkonstruktion fixiert, welche das Gerüst der Anlage bildet [5] [6] [16].



**Bild 1 : FS-150-10 3D Micromac AG**

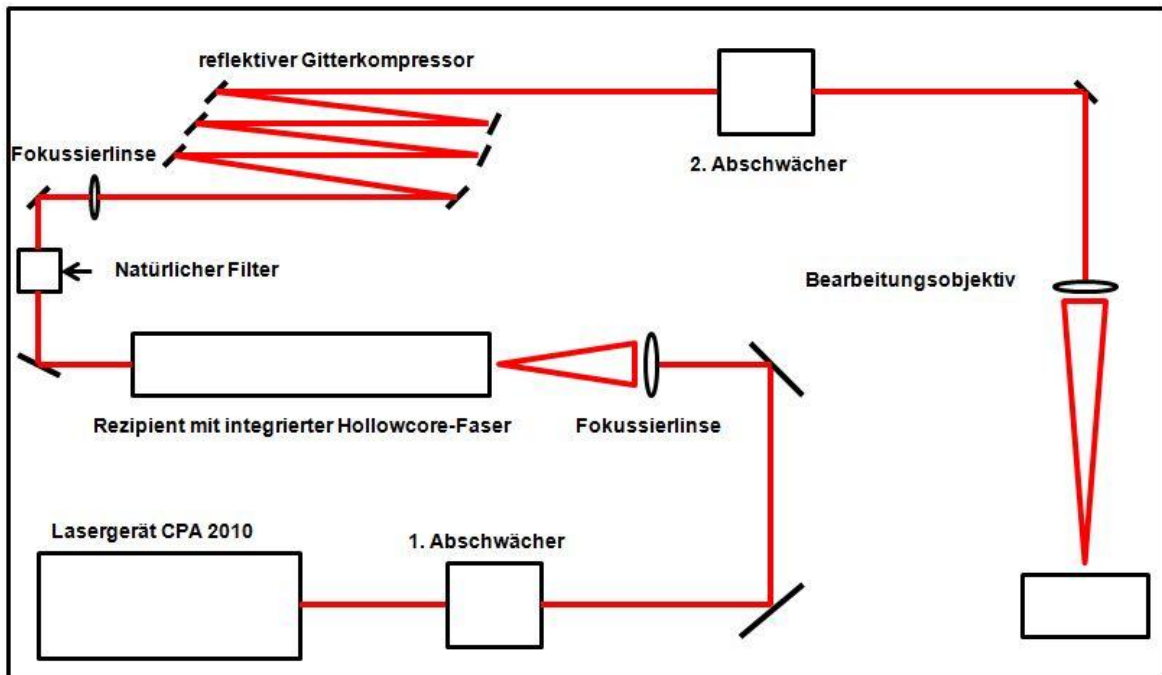


Abbildung 1 : Schematischer Systemaufbau.

## 6.1 Das Lasergerät CPA 2010

Im Folgenden Abschnitt soll der Aufbau und die Funktionsweise des Lasergerätes CPA 2010 erläutert werden. Das Lasergerät ist in 2 Ebenen unterteilt. In der unteren Ebene befindet sich der Seed Laser. Dies ist ein erbiumdotierter Faserlaser mit der Wellenlänge von 1550 nm, welcher Pulse mit  $\tau_p = 100\text{fs}$  und einer Repetitionsrate von 35 MHz, erzeugt. Die Repetitionsrate wird auf die Pulswiederholfrequenz geregelt, die zur Bearbeitung gefordert ist. Diese ist regulierbar von ca. 160 Hz bis 2,5 kHz. Die emittierten Seed Pulse werden nun in einen Frequenzverdopplerkristall eingekoppelt, welche die Wellenlänge auf 775 nm halbiert. Nun muss dieser Puls, um die Zerstörschwelle der optischen Elemente bei der Verstärkung nicht zu überschreiten, zeitlich verbreitert werden. Dies geschieht über den Stretcher. Der Stretcher nutzt die wellenlängenabhängige Beugung am Gitter und die daraus resultierenden Laufzeitunterschiede der einzelnen Wellenlängen. So wird der Puls zeitlich auf ca. 200 ps verbreitert. Auf der oberen Ebene befindet sich der Nd:YAG Pumplaser, der bei einer Wellenlänge von 1064 nm arbeitet, der regenerative Verstärker und der Kompressor. Der Pumplaser wird mithilfe von Blitzlampen angeregt und unter Verwendung eines akustooptischen-Modulators, mit Pulszeiten von ca. 200 ps, gepulst. Nun wird im nächsten Schritt die Strahlung des Nd:YAG Lasers Frequenz verdoppelt. Seine Wellenlänge liegt nun bei 532 nm. Die mittlere Leistung beträgt 7,5 Watt. Jetzt wird der Strahl mithilfe von Umlenkspiegeln in den Ti:-Saphir Verstärkerkristall eingekoppelt. Dadurch werden die Elektronen des Titans in ein höheres Energieniveau gepumpt. Der von der unteren Ebene hoch reflektierte Seed Laserpuls wird nun in den gepumpten regenerativen Verstärker eingestrahlt. Durch mehrfaches Durchlaufen dieses optisch aktiven Mediums, wird eine induzierte Emission und so eine gezielte Verstärkung

des Seed Laserpulses gewährleistet. Unter Verwendung einer Pockelszelle wird der Laserstrahl dann aus dem Verstärker ausgekoppelt. Nun wird der verstärkte Laserstrahl in einen Pulskompressor geleitet, der den Puls auf etwa 150 fs komprimiert. Dieser funktioniert genau wie ein Stretcher, nur in umgekehrter Richtung. Danach verlässt der Laserstrahl das Lasergerät und wird in das Strahlführungssystem der Anlage eingekoppelt [5] [6] [7] [16].



**Bild 2 : Lasergerät CPA – 2010.**

## 6.2 Äußere Strahlführung und Zusatzsystem

Der aus dem Lasergerät austretende Laserstrahl wird mithilfe von Umlenkspiegeln zu einem Abschwächersystem reflektiert. Dieses System besteht aus einer  $\lambda/2$  Platte und einer Brewsterplatte. Da der Laserstrahl, der aus dem Lasergerät austritt, linear polarisiert ist, kann durch Verdrehen der  $\lambda/2$  Platte die Polarisationsrichtung der Strahlung gedreht werden. Da die Brewsterplatte nur eine Komponente des elektrischen Feldstärkevektors passieren lässt, wird durch die vorgeschalteten  $\lambda/2$  Platte, die Leistung stufenlos variierbar. Die maximal mögliche Transmission dieses Abschwächersystems liegt bei ca. 91% und die minimale Grenze liegt bei ca. 5%. Anschließend wird die Polarisationssebene erneut über eine zweite  $\lambda/2$  Platte, für die Einkopplung in die Faser, optimiert.



**Bild 3 : erster Abschwächer und untere Strahlführungsebene.**

Der Laserstrahl wird nun über Umlenkspiegel auf die 2 Ebene der Strahlführung, wo sich das Zusatzsystem zur Verkürzung der Pulsdauer befindet, reflektiert. Dieses System besteht aus einem Argon gefüllten Rezipienten, in welchem eine Hohlfaser platziert ist, und einem Pulskompressor (siehe Abb.1). Nun wird der Strahl mithilfe einer Linse, auf das Faserende fokussiert. Beim durchlaufen dieser Faser wird das Spektrum des Strahls erheblich verbreitert (siehe Abschnitt 4). Das ist notwendig um solche kurzen Pulse zu erzeugen. Denn je breiter das Spektrum, desto kürzere Pulse können generiert werden (siehe Abschnitt 7.4). Nach dem Verlassen der Faser weist der Strahl eine hohe Divergenz auf, was einen Kollimator notwendig macht. Danach wird der Strahl in den reflektiven Gitterkompressor geleitet, welcher dann die Pulsdauer extrem verkürzt. Nun wird der komprimierte Laserpuls mithilfe von Umlenkspiegeln zurück auf Ebene 1 und dann zur Transmissionsoptik geleitet, wo er dann zur Bearbeitung genutzt werden kann [5] [6] [16].



## 7 Versuchsvorbereitungen

### 7.1 Abschwächerkurve des ersten Abschwächers

Zunächst wurde der Abschwächer in seine Grundposition gebracht und mithilfe des Leistungsmesskopfes die Eingangsleistung vor dem Abschwächer bestimmt. Diese belief sich auf 1,02 W. Nun wurde der Messkopf hinter dem Abschwächer postiert und die  $\lambda/2$  Platte in  $0,5^\circ$  Schritten verstellt. Aus diesen Werten wird folgende Abhängigkeit vom Verdrehwinkel der  $\lambda/2$  Platte und resultierende Leistung erkennbar. Aus Diagramm 1 lässt sich das Minimum der Abschwächerkurve auf  $21,5^\circ$  und das Maximum auf  $67^\circ$  festlegen. Bei allen folgenden Bearbeitungen wird der erste Abschwächer auf sein Maximum ( $67^\circ$ ) und die nachfolgende  $\lambda/2$  Platte auf  $55^\circ$  eingestellt. Dies ist notwendig, da sich im Zusatzsystem eine Brewsterplatte befindet, die dazu verwendet wird unerwünschte Effekte zu filtern. Um möglichst verlustfrei in die Faser einzukoppeln, wurde eine optimale Einstellung der  $\lambda/2$  Platte von  $55^\circ$  ermittelt [16].

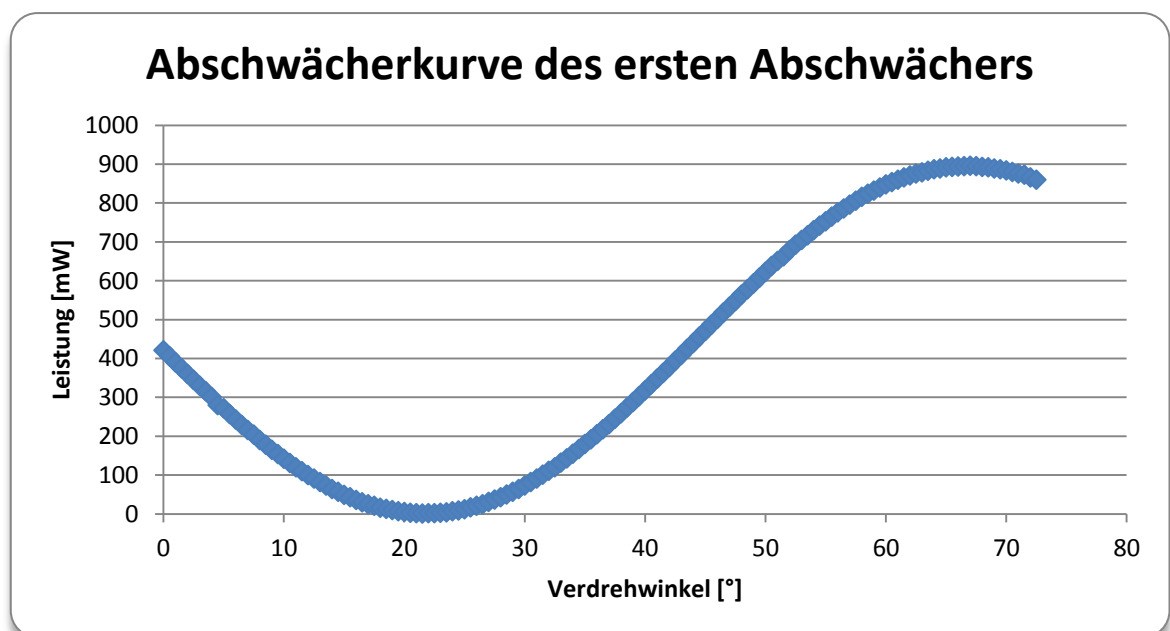


Diagramm 1 : resultierender Leistung in Abhängigkeit vom Verdrehwinkel.

## 7.2 Liu Methode

Aufgrund der kurzen Pulsdauer und die dadurch resultierende hohe Intensität der Pulse, war es leider nicht möglich den Strahlradius mithilfe einer Messung zu ermitteln. Deswegen wurde hier die Liu Methode verwendet, welche im Folgenden näher erläutert werden soll. Ausgangspunkt hier bietet das Lambert-Beersche Gesetz in folgender Form [16].

$$H_r = H_0 * e^{-2 * \left(\frac{w_r}{w_0}\right)^2}$$

Durch Umformung erhält man:

$$\frac{H_r}{H_0} = e^{-2 * \left(\frac{w_r}{w_0}\right)^2}$$

$$\ln\left(\frac{H_r}{H_0}\right) = -2 * \left(\frac{w_r}{w_0}\right)^2$$

Im nächsten Schritt werden  $w_r$  durch  $\frac{D}{2}$  und  $H_r$  durch  $H_{th}$  ersetzt. Daraus ergibt sich:

$$\ln\left(\frac{H_{th}}{H_0}\right) = -2 * \left(\frac{D}{2 * w_0}\right)^2$$

$$\ln\left(\frac{H_{th}}{H_0}\right) = \left(-\frac{D^2}{2 * w_0^2}\right)$$

Durch Logarithmen Gesetze ist dieser Ausdruck in Folgenden umformbar.

$$D^2 = (\ln(H_{th}) - \ln(H_0)) * (-2 * w_0^2)$$

$$D^2 = 2 * w_0^2 * \ln(H_0) - 2 * w_0^2 * \ln(H_{th})$$

In Anbetracht das eine logarithmische Funktion auf einer logarithmisch skalierten Achse den Verlauf einer Geraden mit der Formel  $y = mx + n$  aufweist und  $H_{th} = konst.$  folgt:

$$m = 2 * w_0^2$$

$$n = -2 * w_0^2 * \ln(H_{th})$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{m}{2}}$$

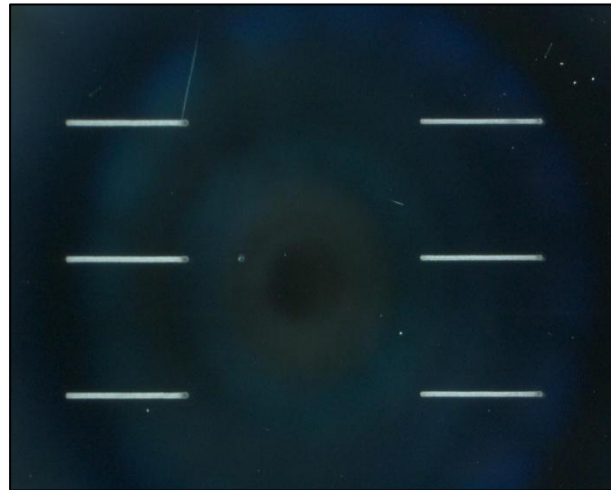
$$H_{th} = e^{\frac{-n}{m}}$$

### 7.3 Bestimmung des Fokusradius nach der Liu Methode

Hierzu wurde auf Stahl mithilfe eines dazu geschriebenen Programms, welches während des Verfahrens der X-Achse beziehungsweise Y-Achse, gleichzeitig die Z-Achse in einem bestimmten Verhältnis mit bewegt, die Strahlkaustik abgebildet. Danach wurde mit dem Mikroskop der Firma Keyence der schmalste Strahlquerschnitt ermittelt. Anschließend wurde auf die Position der Z-Achse zurückgerechnet und mit dieser auf Silizium, bei verschiedenen Fluenzen, Teststrecken erzeugt [16].

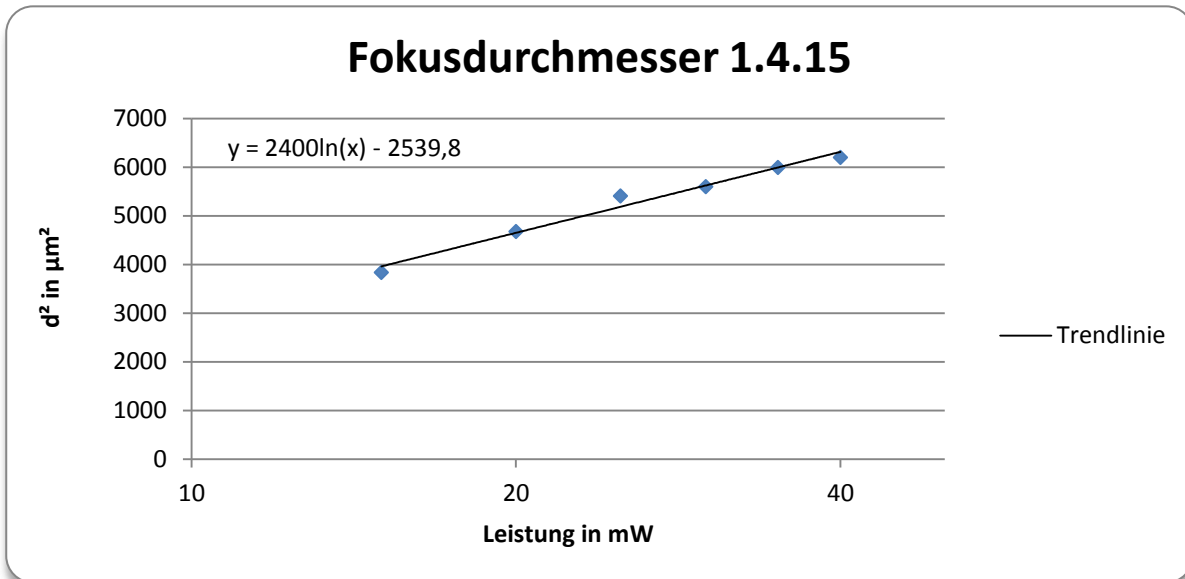


**Bild 4 : Fokustest mit Strahlkaustik.**



**Bild 5: Linien in Fokusslage bei unterschiedlichen Fluenzen.**

Im nächsten Schritt wurden die Durchmesser vermessen und unter Zuhilfenahme von Excel eine passende Funktion hineingelegt.

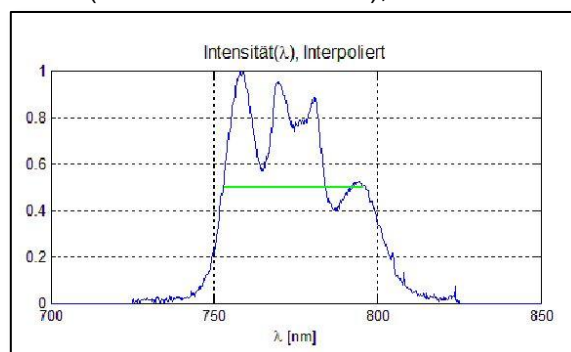


**Diagramm 2 : resultierende Strahldurchmesser bei steigender Leistung.**

Nun wurde mit der Liu Methode der Gaussche Fokusradius bestimmt [16].

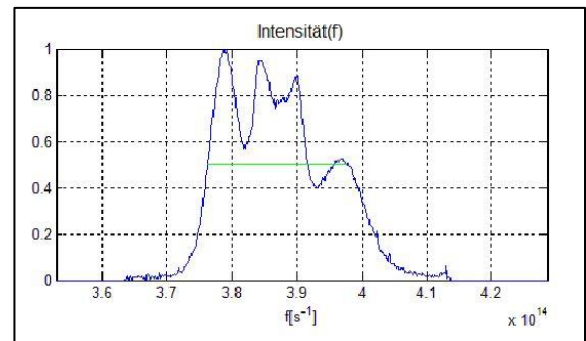
## 7.4 Bestimmung der Pulsdauer

Da eine Messung der Pulsdauer aufgrund der hohen Intensitäten, nicht möglich war wurde ein theoretischer Ansatz zur Bestimmung der Pulsdauer verwendet. Dieser beschreibt die Pulsdauer unter optimalen Umständen und wird mithilfe einer Fourier-Transformation berechnet. Um dies zu realisieren, wird bei jedem Versuch das verwendete Spektrum welches durch das Argongas generiert wird, benötigt. Zur Berechnung stand ein eigens dazu programmierte Software zur Verfügung. Da dieser Ansatz nur eine Aussage, über die Pulsdauer, bei optimalen Bedingungen zulässt (ebene Wellenfronten), muss ein Korrekturfaktor von ca. 1,5 mit beachtet werden. Im Folgenden soll Prinzip wie die Pulsdauer berechnet wird, kurz näher erläutert werden. Zunächst wird das, verbreiterte Wellenlängenspektrum nach der Faser, mittels eines Spektrometers aufgenommen (Abb.2).



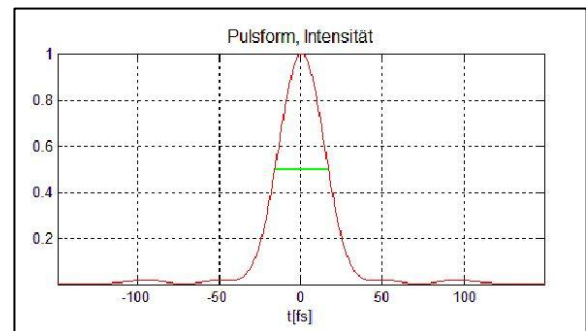
**Abbildung 2 : Spektrum nach der Faser**

Da dieses Spektrum, welches die Abhängigkeit zwischen Intensität und Wellenlänge zeigt, nicht direkt zur Berechnung der Pulsdauer verwendet werden kann, wird es nun in einen Frequenzraum überführt (Abb.3). Dieses nun in Abhängigkeit der Frequenz dargestellte Spektrum, kann nun mithilfe einer inversen Fourier-Transformation in einen Zeitraum transferiert werden.



**Abbildung 3 : Überführtes Spektrum in den Frequenzraum**

Das nun in einem Zeitraum verfügbare Spektrum lässt nun eine Aussage über die resultierende Pulsdauer unter optimalen Bedingungen zu (Abb. 4).



**Abbildung 4 : Transformiertes Spektrum in Abhängigkeit der Pulsdauer**

## 7.5 Versuchsablauf

Im Folgenden soll der Versuchsablauf dargelegt werden. Durch die Untersuchungen sollten grundlegende Abhängigkeiten dargestellt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Fokusradien bei den Pulsdauern von 35 und 150 fs, wird sich im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf den prozentualen Pulsüberlappungsgrad bezogen, damit die Ergebnisse der Experimente mit Pulsdauern von 35 fs und die mit 150 fs vergleichbar werden. Es wurden Testmatrizen erstellt, welche den Abtrag pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz zeigen. Ebenso wurde der Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Rauigkeit in separaten Experimenten untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss der Strukturtiefe auf die Rauigkeit untersucht. Dies wurde mithilfe der Erhöhung der Anzahl der Überfahrten und dementsprechende Fokuspriorisierung realisiert. Bei den Experimenten wurde sich auf zwei bzw. einen Pulsüberlappungsgrad beschränkt. Diese wurden so gewählt, dass Vergleiche mit Experimenten, welche mit 150 fs durchgeführt wurden, möglich sind. Das verwendete Spektrum zur Bearbeitung wird in jedem Versuchsteil im Vorfeld separat dargestellt. Ebenso die daraus resultierende Pulsdauer unter optimalen Voraussetzungen wird vor jedem Versuchsteil separat berechnet und angegeben.



## 8 Auftretende Probleme

In diesem Abschnitt der Bachelorarbeit sollen die Probleme, die bei den ersten Versuchen aufgetreten sind, beschrieben werden. Zur Fluenzeinstellung wird die  $\lambda/2$  Platte des zweiten Abschwächers verdreht, wodurch eine Regelung der Fluenz ermöglicht wird. Ein Problem hierbei ist die Messwertschwankung des Leistungsmesskopfes, mit dem die Leistung nach dem zweiten Abschwächer ermittelt wird. Diese ist zur Aufnahme der Abschwächerkurve notwendig. Durch die Schwankung entsteht ein gewisser Fehler bei der Fluenzeinstellung. Dies kann mit einem genaueren Messgerät kompensiert werden. Eine weitere Problematik stellt hierbei die schnelle Dejustage des Systems durch äußere Einflüsse, wie zum Beispiel Temperatur und Luftfeuchteveränderungen, dar. Dieser Sachverhalt gestaltet sich hinsichtlich einer Verbesserung ziemlich schwierig, da man äußere Einflüsse nicht vollständig ausblenden kann. Ebenso kritisch ist die Stabilität der spektralen Verbreiterung zu sehen, da wenn diese sich ändert, verändert sich ebenso die resultierende Pulsdauer. Des Weiteren ist die Pulsdauer mit der verfügbaren Technik nicht messbar, was einen theoretischen Ansatz zur Bestimmung erforderlich macht. Ebenso ist ein "Wandern" des Laserstrahls nicht ausgeschlossen, welches Defizite bei der Einkopplung in die Faser mit sich führt und ebenso das Bearbeitungsergebnis verschlechtert. Dies könnte mit einem Point to Point Controller verbessert werden. Auch das Strahlprofil nimmt einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Experimente. Es beschreibt ein Donutprofil, was daran liegt, dass sich vermutlich der Kern der Faser im Profil abbildet. Des Weiteren ist zeitweilige ein Schweif (siehe 12.2) beobachtbar, welcher bei ausreichend großer Fluenz ebenso Abträge erzielt und somit Konturen der Bearbeitungsstrukturen verfälscht. Das Ergebnis einer Bearbeitung mit einem Schweif im Strahlprofil wird im Bild 6 dargestellt. Die sich täglich ändernden Parameter bringen weitere Probleme. Dies betrifft unter anderem die hohen Leistungen nach dem zweiten Abschwächer. Dies wird erklärbar durch die spektrale Verbreiterung, welche eine gewisse Instabilität aufweist. Als Lösung dieses Problems wurde in den Strahlengang, nach der Faser ein natürlicher Filter eingebracht, der je nach Arbeitsaufgabe getauscht werden kann [16].

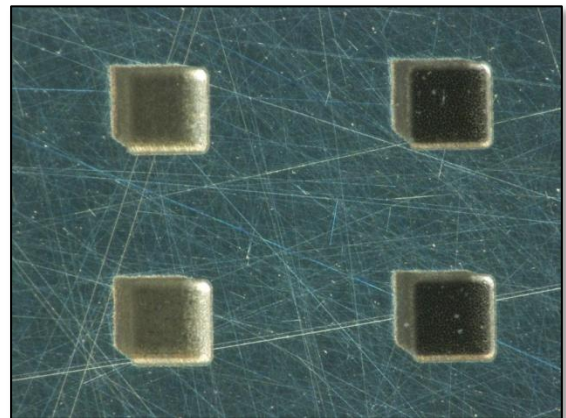


Bild 6 : abbildender Schweif des Strahlprofils.





## 9 Eigenschaften der untersuchten Materialien

### 9.1 Stahl (Thyrodur 2990)

Für die Bearbeitung wurden Scheiben mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Dicke von 5 mm verwendet. Ausgewählte Eigenschaften sind aus folgender Tabelle zu entnehmen.

Materialeigenschaften von Thyrodur 2990 :

**Tabelle 1 : Eigenschaften von dem verwendeten Thyrodur 2990 Substrat [18].**

Bezeichnung	-X100CrMoV8-1-1
chem. Zusammensetzung in %	Kohlenstoff 1 Silizium 0,9 Chrom 8 Molybdän 1,6 Vanadium 1,6
Wärmeausdehnungskoeffizient bei 20 – 100 °C in W/(m*K)	$11,4 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur in W / (m*K)	34,2

## 9.2 Wolframcarbid

Die Wolframcarbid-Proben lagen in Scheibenform mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Dicke von 0,5 mm, vor.

Materialeigenschaften Wolframcarbid :

**Tabelle 2 : Eigenschaften von dem verwendeten Wolframcarbid Substrat [19].**

Bezeichnung	AKS- F03
Co – Binder in %	3,0
Korngröße in $\mu\text{m}$	0,5 - 0,8
Dichte in $\text{g /cm}^3$	15,20
Härte in HV 10	2000
Biegebruchfestigkeit in $\text{N/mm}^2$	3000

### 9.3 Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade

Das verwendete Quarzglas Substrat beschreibt ebenso eine Scheibenform. Der Durchmesser der Quarzglasscheibe liegt bei 25 mm und die Dicke bei 1,5 mm.

Werkstoffeigenschaften von Quarzglas :

**Tabelle 3 : Eigenschaften von Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade [20].**

Beschreibung	Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	2,20
Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)	1,38
Wärmeausdehnungskoeffizient in ppm / C bei 0 – 200 °C	0,57 * 10 <sup>-6</sup>

### 9.4 PMMA Kunststoff

Der PMMA Quader wurde in 55 mm lange Stücke gesägt und besitzt eine Höhe von 12 mm.

**Tabelle 4 : Eigenschaften von dem verwendeten PMMA Substrat [21].**

Beschreibung	Polymethylmethacrylat
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	1,19 g / cm <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)	0,19
Wärmeausdehnung in 1/K	70*10 <sup>-6</sup>



## 10 Die Analysetechnik

Hier sollen die verwendeten Analysetechniken, die zur Auswertung der Experimente verwendet wurden, beschrieben werden.

Zum Ausmessen der Gräben zur Fokusradiusbestimmung nach Liu, sowie zur Aufnahme der Bilder mit geringer Vergrößerung, wurde das Lichtmikroskop der Firma Keyence verwendet.



Bild 7: Lichtmikroskop der Firma Keyence.

Zur Bestimmung der Tiefe und der Flächenrauheit der Strukturen wurde das Konfokalmikroskop der Firma Confovis genutzt. Die so ermittelte Messpunktwolke wurde anschließend mit einer Spezialsoftware ausgewertet.



Bild 8 : Konfokalmikroskop der Firma Confovis.

Eine Alternative zur Bestimmung der mittleren Rauheit und Strukturtiefe bietet das Profilometer Dektak 3030 der Firma Sloan, welches die Oberfläche mechanisch mithilfe einer „Messnadel“ erfasst. Da aufgrund der Transparenz des Quarzglassubstrates eine optische Analyse mittels Confovis nicht möglich war, wurde auf das mechanische System zurückgegriffen.



Bild 9 : Profilometer Dektak 3030 der Firma Sloan.

# 11 Auswertung der Versuche

Im Folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt werden. Die zur Berechnung verwendeten Formeln sollen im Vorfeld genannt werden.

Die Bearbeitungsfluenz wird mit Folgender Formel berechnet. Wobei  $A_F$  die Fokusfläche,  $f$  die Pulswiederholfrequenz und  $P_{av}$  die mittlere Leistung des Laserstrahls bezeichnet.

$$H = \frac{2P_{av}}{f * A_F}$$

Der mit der Bearbeitungsfluenz erzeugte Abtrag pro Schicht ergibt sich zu der Gesamttiefe der Struktur geteilt durch die Anzahl der Schichten.

$$Z_{Schicht} = \frac{Z_{gesamt}}{n_{Schichten}}$$

Die Anzahl der Pulse pro Schicht wird berechnet indem die Seitenlänge der Struktur quadriert und durch das Quadrat der Puls zu Puls Distanz geteilt wird.

$$N_P = \frac{a^2}{d^2}$$

Nun kann daraus das ablatierte Volumen pro Puls wie folgt berechnet werden.

$$V_P = \frac{a^2 * Z_{Schicht}}{N_P}$$

Unter der Annahme, dass das Abtragsvolumen die Form eines Zylinders beschreibt, kann die Abtragtiefe pro Puls wie folgt berechnet werden.

$$Z_p = \frac{V_p}{A_F}$$

## 11.1 Untersuchungen an Stahl Thyrodur 1.2990

### 11.1.1 Ablationsverhalten von Stahl Thyrodur 1.2990

In diesem Abschnitt sollen Abtragstiefe pro Puls und Flächenrauheit in Abhängigkeit der Fluenz dargestellt werden. Das verwendete Spektrum besitzt einen Wellenlängenbereich von ca. 51 nm. Daraus resultiert eine ideale Pulsdauer von 29 fs.

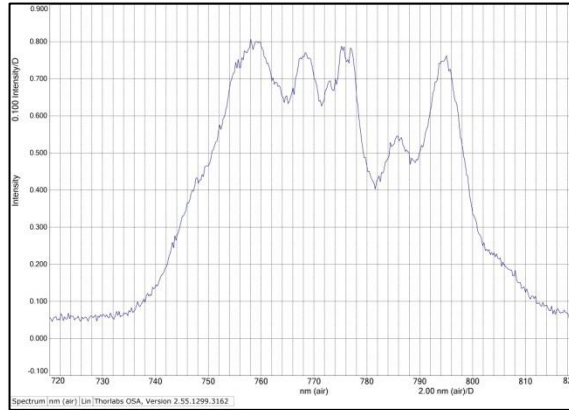


Abbildung 5 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.1.1.

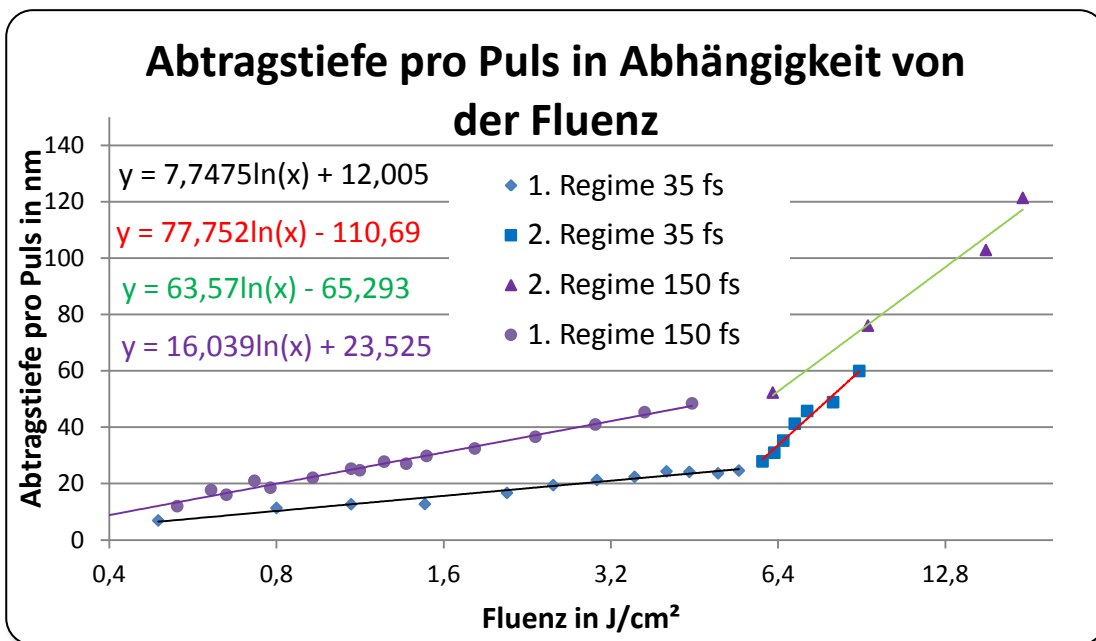


Diagramm 3 : Abtragstiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz.

In Diagramm 3 wird die Abhängigkeit der Abtragstiefe pro Puls zur Fluenz dargestellt. Der Pulsüberlappungsgrad betrug ca. 85 %. Die Ablationsschwellfluenz ergibt sich nach der im Abschnitt 7.4 abgeleiteten Formel zu 0,212  $J/cm^2$  für 29 fs und 0,230 für 150 fs. Der Übergang vom 1. ins 2. Ablationsregime (siehe 5.1) liegt bei beiden zu vergleichenden Pulsdauern zwischen 5 und 6  $J/cm^2$ . Demnach sind Ablationsschwellen, sowie der Übergang vom 1. ins 2. Ablationsregime in vergleichbarer Größenordnung. Desweiteren wird



erkennbar, dass die Effizienz bei 150 fs höher ist als bei 29 fs. Bei geringen Fluenzen entstehen auf der bearbeiteten Oberfläche Rippel (siehe Bild 15), welche durch weitere Untersuchungen näher charakterisiert werden müssen. Aus Diagramm 3 wird ersichtlich, dass entgegen der Erwartung bei Pulsdauern von 29 fs weniger Material pro Puls abgetragen wurde als bei 150 fs. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass der Anstieg der logarithmischen Funktion im 1. Ablationsregime bei geringer werdenden Pulsdauern zunimmt.

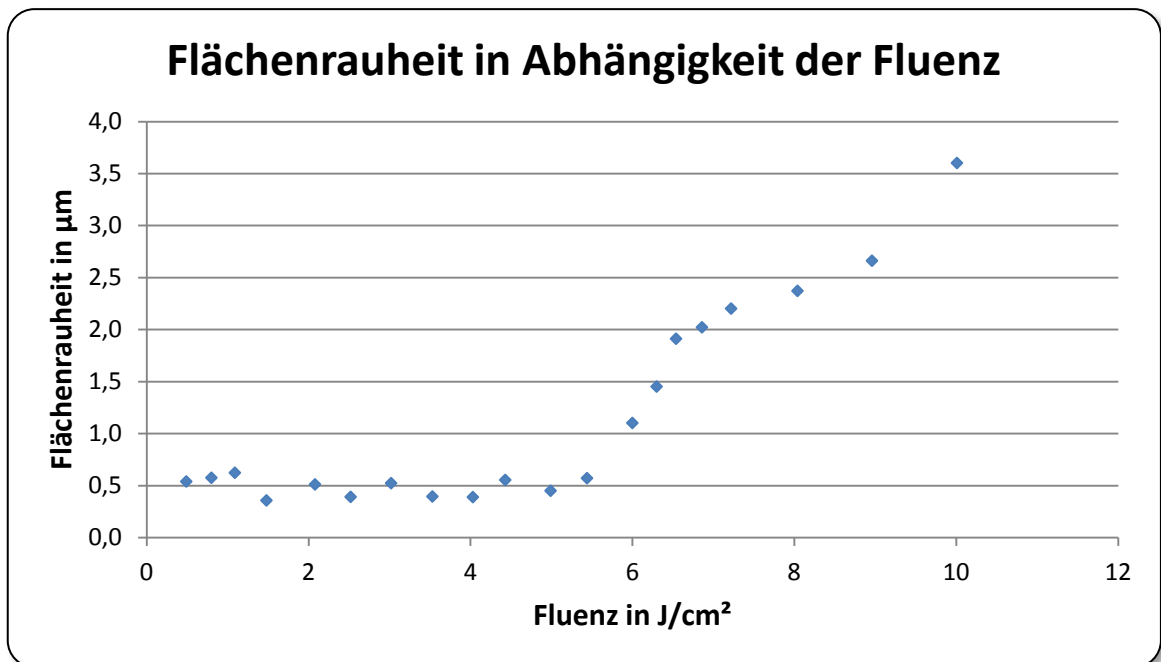
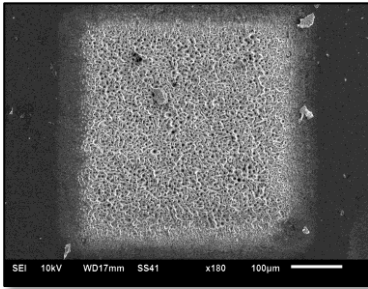
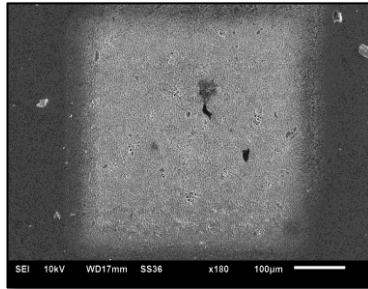
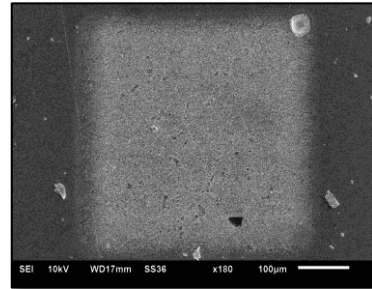
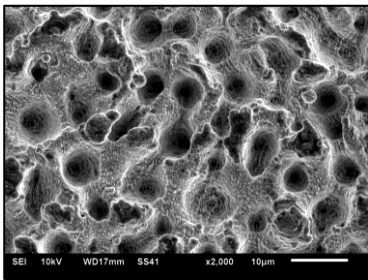
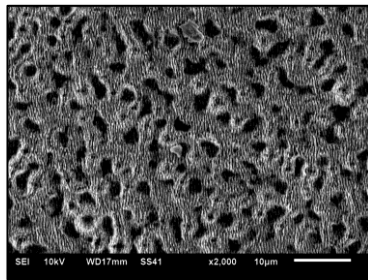
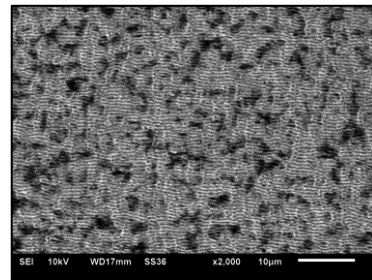


Diagramm 4 : Flächenrauheit in Abhängigkeit der Fluenz.

In Diagramm 4 wird die Flächenrauheit in Abhängigkeit der Fluenz dargestellt. Man sieht deutlich, dass die Flächenrauheit im unteren Fluenzbereich zunächst näherungsweise konstant bleibt und sich erst mit dem Eintreten in das 2. Ablationsregime drastisch erhöht. Die folgenden Bilder zeigen die Oberflächen bei verschiedenen Bearbeitungsfluenzen.

Bild 10 : H = 8 J/cm<sup>2</sup> 180 fachBild 11 : H = 4 J/cm<sup>2</sup> 180 fachBild 12 : H = 1 J/cm<sup>2</sup> 180 fachBild 13 : H = 8 J/cm<sup>2</sup> 2000 fachBild 14 : H = 4 J/cm<sup>2</sup> 2000 fachBild 15 : H = 1 J/cm<sup>2</sup> 2000 fach

### 11.1.2 Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit

Ziel dieser Versuche war es zu zeigen wie sich die Flächenrauheit bei sinkendem Pulsüberlappungsgrad verhält. Das Experiment wurde bei einer konstanten Fluenz von 4,5 J/cm<sup>2</sup> durchgeführt. Der Pulsüberlappungsgrad wurde in einem Bereich von ca. 50 bis 85 % variiert. Das verwendete Spektrum zeigt eine Verbreiterung von ca. 62 nm. Daraus konnte unter Annahme optimaler Voraussetzungen eine Pulsdauer von ca. 22 fs berechnet werden.

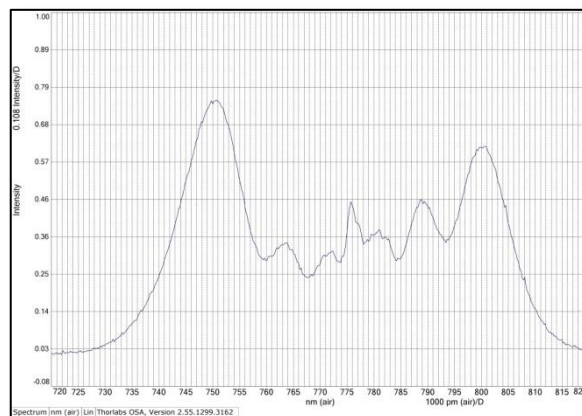


Abbildung 6 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.1.2.

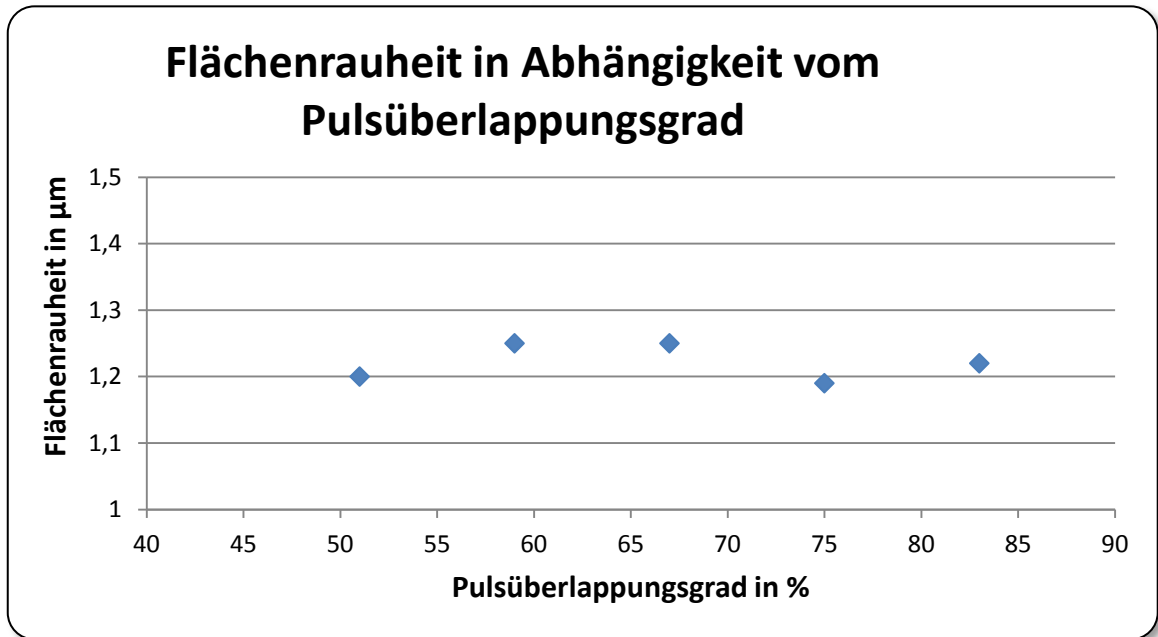


Diagramm 5 : Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit des Pulsüberlappungsgrades.

Wie man in Diagramm 5 sehen kann hat der Pulsüberlappungsgrad, im untersuchten Bereich, keinen größeren Einfluss auf die Flächenrauheit der Struktur. Folgende REM Aufnahmen zeigen den Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Oberflächenrauheit

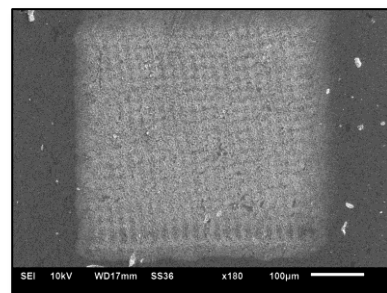
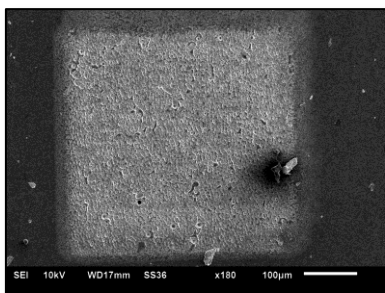


Bild 16 : Pulsüberlappungsgrad 83 % 180 fach.

Bild 17 : Pulsüberlappungsgrad 67 % 180 fach.

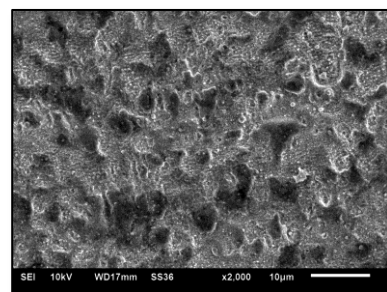
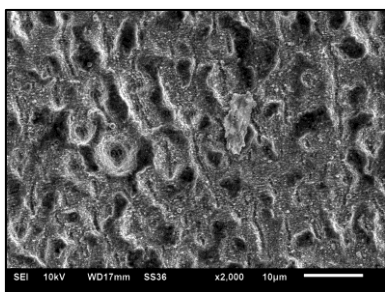


Bild 18 : Pulsüberlappungsgrad 83 % 2000 fach.

Bild 19 : Pulsüberlappungsgrad 67 % 2000 fach.

### 11.1.3 Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit

In diesem Versuchsteil wurden die Anzahl der Überfahrten variiert. Um eine Defokussierung, welche durch eine Erhöhung der Strukturtiefe begründet wird, zu vermeiden, wurde die Fokusslage unter Verstellung der Z-Achse adaptiv der steigenden Tiefe angepasst. Das in diesem Versuch verwendete Spektrum zeigt eine Verbreiterung von etwa 62 nm. Aus diesem Spektrum wird durch den oben beschriebenen Ansatz eine Pulsdauer von ca. 24 fs berechnet.

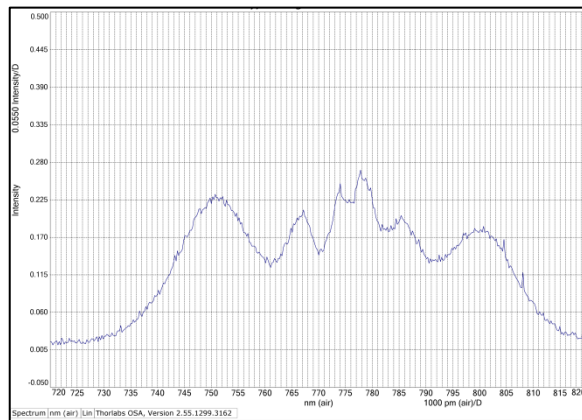


Abbildung 7 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.1.3.

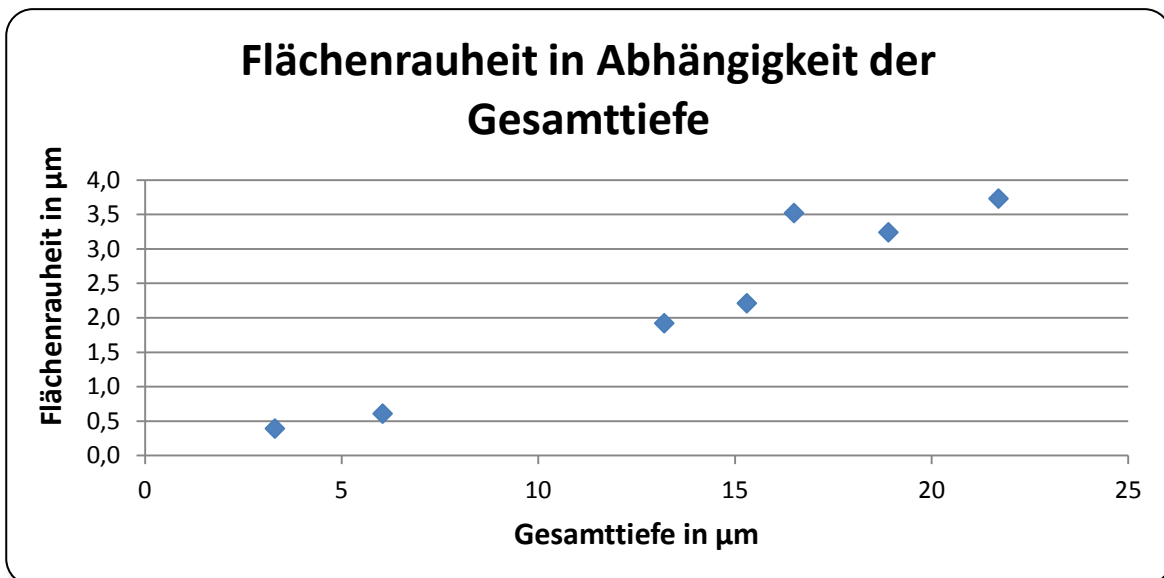


Diagramm 6 : Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Gesamttiefe der Struktur.

Diagramm 6 zeigt die Abhängigkeit der Flächenrauheit von der Anzahl der Überfahrten und somit der Gesamttiefe der Struktur. Es ist klar erkennbar, dass mit steigender Tiefe der Struktur die Flächenrauheit ansteigt. Der Grund dafür ist die Entstehung von „Löschern“, welche durch die bevorzugte Absorption, der im Substrat enthaltenen Partikulate zu begründen ist. In den so entstandenen „Löschern“ wird nun die Laserstrahlung erheblich besser absorbiert, welche deren Tiefe immer weiter erhöht und somit die Flächenrauheit anhebt. Folgende Bilder zeigen den Einfluss der Gesamttiefe der Struktur auf die Oberflächenrauheit.

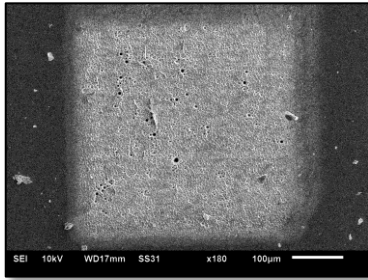


Bild 20 : 8 Überfahrten Gesamt-  
tiefe 6 µm 180 fach.

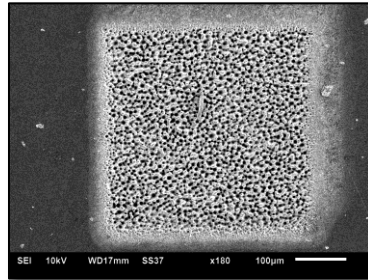


Bild 21 : 16 Überfahrten Ge-  
samttiefe 15,3 µm 180 fach.

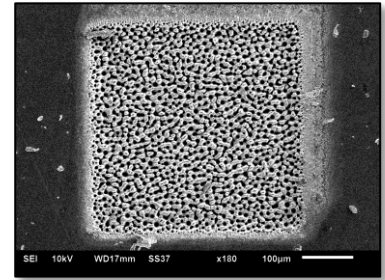


Bild 22 : 28 Überfahrten Ge-  
samttiefe 21,7 µm 180 fach.

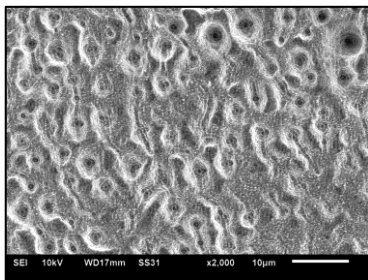


Bild 23 : 8 Überfahrten Ge-  
samttiefe 6 µm 2000 fach.

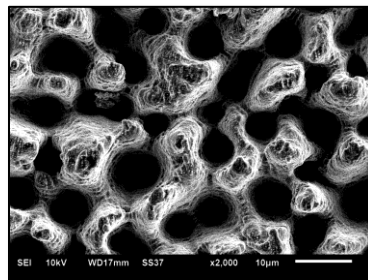


Bild 24 : 16 Überfahrten Ge-  
samttiefe 15,3 µm 180 fach.

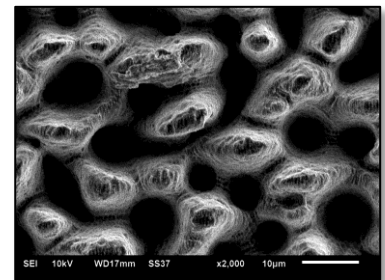


Bild 25 : 28 Überfahrten Ge-  
samttiefe 21,7 µm 180 fach.

### 11.1.4 Zusammenfassung für das Material Stahl

Zusammenfassend ist zu sagen, dass für Stahl die verwendete Fluenz und die Gesamttiefe der Struktur ausschlaggebend für die Flächenrauheit sind. Weniger großen Einfluss hat dagegen der Pulsüberlappingsgrad auf die Flächenrauheit. Desweiteren bleibt zu erwähnen, dass Schwellfluenzen, sowie der Übergang von 1. ins 2. Ablationsregime, bei 29 fs sowie 150 fs vergleichbar sind. Bei 29 fs sowie bei 150 fs entstehen bei geringen Fluenzen Rippel, welche durch weitere Versuche näher verglichen werden sollten. Im folgenden Diagramm werden die Ergebnisse zusammengeführt.

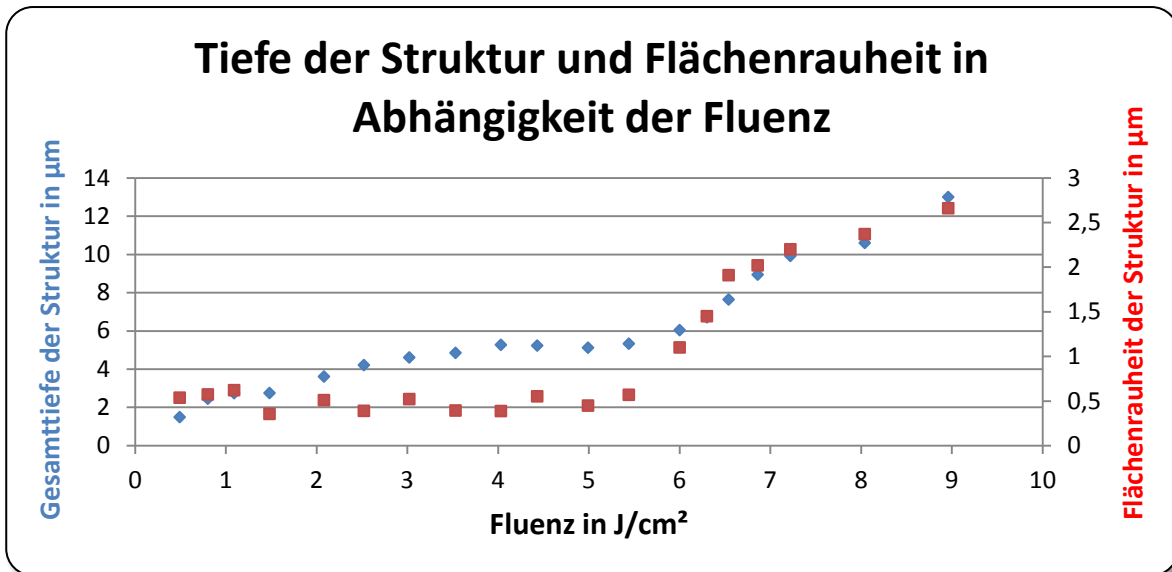


Diagramm 7 : Gesamttiefe und Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz.

Aus Diagramm 7 wird ein optimaler Bereich der Fluenz erkennbar, welcher sich zwischen 4 bis 5 J/cm<sup>2</sup> befindet. In diesem Fluenzband wäre ein effizienter Abtrag bei gleichbleibender Flächenrauheit möglich. Der Absorptionskoeffizient wurde gemäß dem Lambert-Beer'schen Gesetzes (für das 1. Ablationsregime) für die Pulsdauer von 29 fs auf  $12,3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  und für 150 fs auf  $6,25 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  berechnet.

## 11.2 Untersuchungen an Wolframcarbid

### 11.2.1 Ablationsverhalten von Wolframcarbid

Im Folgenden sollen die Abtragtiefe pro Puls und die Flächenrauheit in Abhängigkeit der Fluenz dargestellt werden. Das beim Versuch zum Einsatz gebrachte Spektrum zeigt einen Verbreiterungsbereich von ca. 62 nm. Daraus resultiert eine berechnete Pulsdauer von 22 fs.

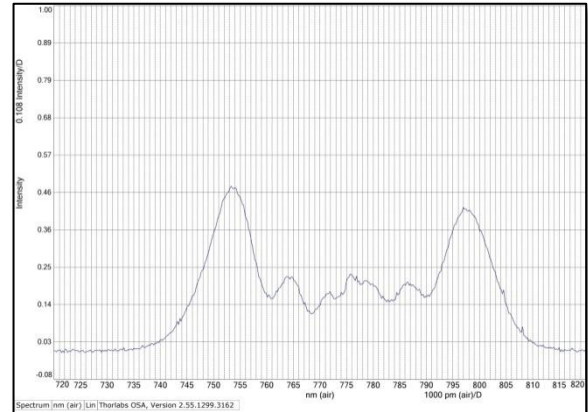


Abbildung 8 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.2.1.

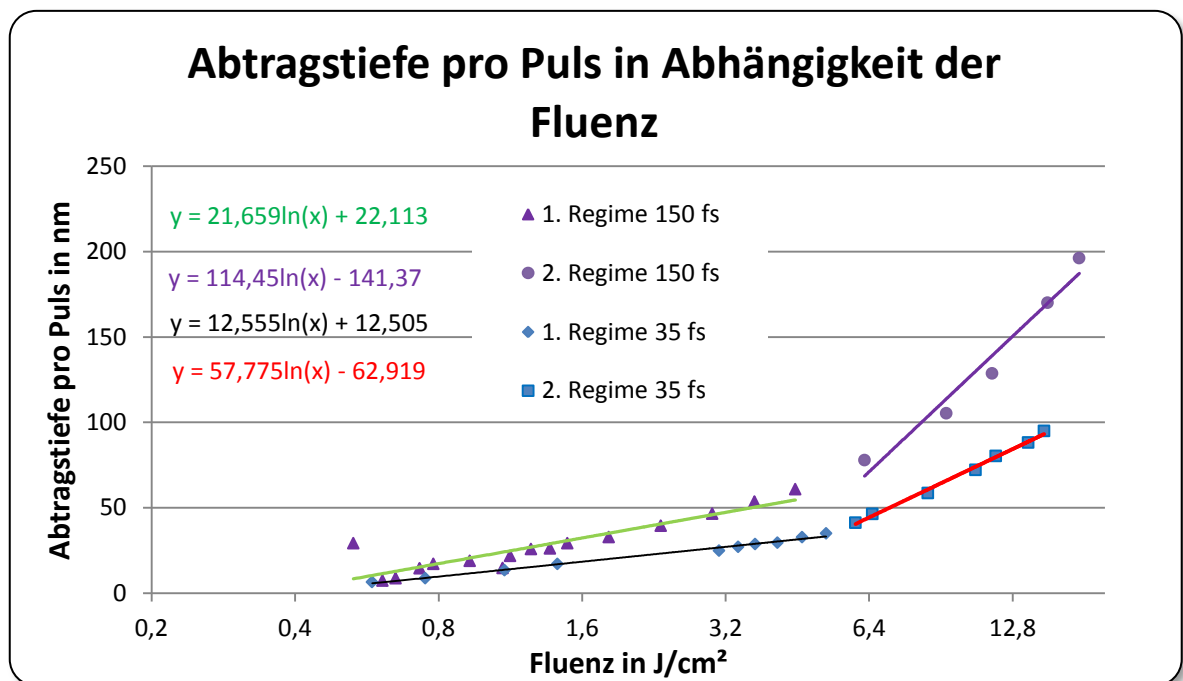


Diagramm 8 : Abtragtiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz.

Auch hier, bei Wolframcarbid, sind die 2 Ablationsregime klar erkennbar. Der Übergang zwischen diesen liegt bei beiden Pulsdauern im Bereich von ca. 5 bis 6 J/cm<sup>2</sup>. Der prozentuale Pulsüberlapp wurde zur Vergleichbarkeit der Versuche auf ca. 89 % gewählt. Die Schwellfluenz wurde für 22 fs auf 0,369 J/cm<sup>2</sup> berechnet. Bei 150 fs liegt sie bei 0,36 J/cm<sup>2</sup>. Auch die Schwellfluenzen bei Wolframcarbid sind bei beiden Pulsdauern miteinander vergleichbar.

Wie auch schon bei Stahl tritt die gleiche Erscheinung auf, dass der Anstieg der logarithmischen Funktion bei 22 fs im ersten Ablationsregime deutlich unter dem für 150 fs Bestimmten liegt.

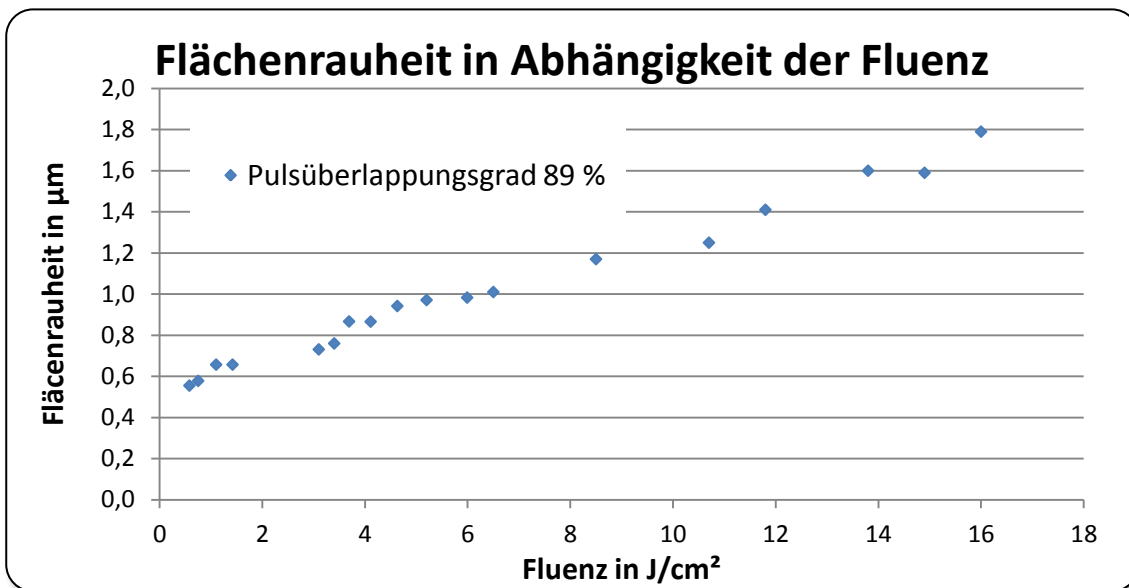


Diagramm 9 : Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz.

In Diagramm 9 ist die Abhängigkeit der Flächenrauheit von der Fluenz zu sehen. Es ist ein stetiger Anstieg der Flächenrauheit mit Zunahme der Fluenz beobachtbar. Wie auch die folgenden REM Aufnahmen, der Oberflächen, erkennen lassen. Diese zeigen ausgewählte Teststrukturen, welche bei unterschiedlichen Bearbeitungsfluenzen erzeugt wurden. Die in den Bildern dunkler erscheinenden Bereiche könnten auf Materialrückstände (Debris) zurückzuführen sein (Bild 31). Ebenso ist bei geringen Fluenzen die Entstehung von Rippel sichtbar, wie schon bei Stahl zu beobachten war (Bild 37). Durch weitere Untersuchungen wäre die Reproduzierbarkeit und Charakterisierung solcher Oberflächenercheinungen vorzunehmen.



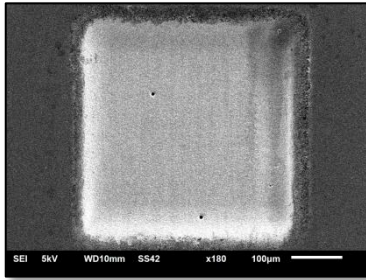


Bild 26 :  $H = 16 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

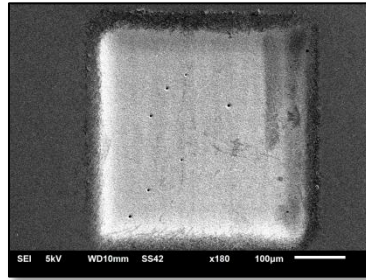


Bild 27 :  $H = 10,7 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

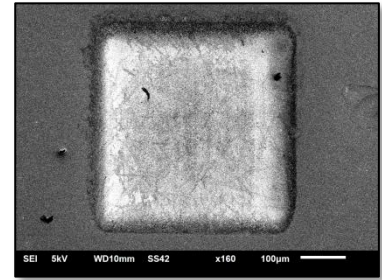


Bild 28 :  $H = 6 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

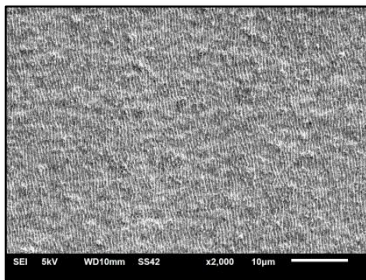


Bild 29 :  $H = 16 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

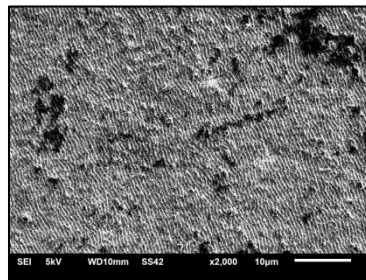


Bild 30 :  $H = 10,7 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

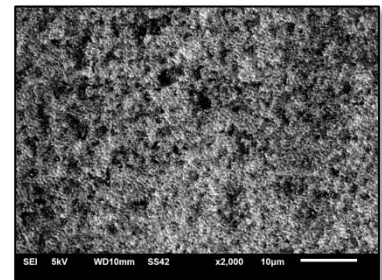


Bild 31 :  $H = 6 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

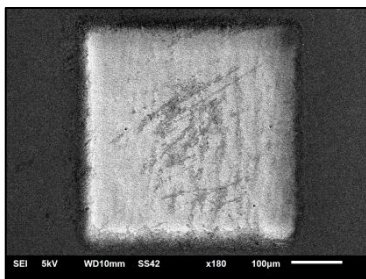


Bild 32 :  $H = 5,2 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

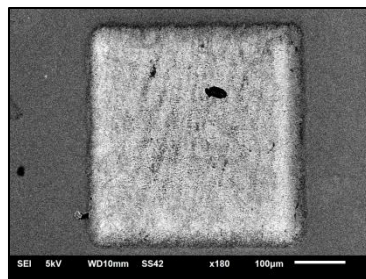


Bild 33 :  $H = 1,4 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

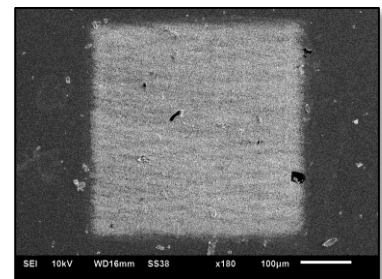


Bild 34 :  $H = 0,6 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

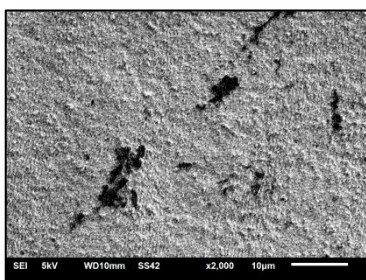


Bild 35 :  $H = 5,2 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

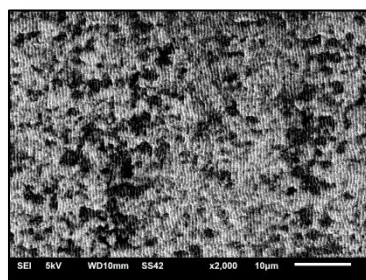


Bild 36 :  $H = 1,4 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

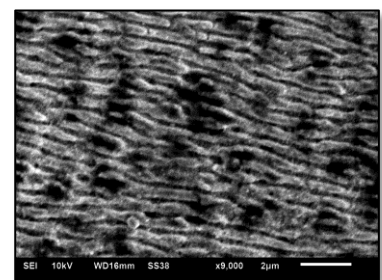


Bild 37 :  $H = 0,6 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

## 11.2.2 Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit

In diesem Versuchsteil wurde der Pulsüberlappungsgrad von ca. 45 bis 85 % variiert. Die Testfelder wurden mit einer konstanten Fluenz von  $5 \text{ J/cm}^2$  bearbeitet. Die zur Bearbeitung herangezogene spektrale Verbreiterung erstreckt sich über ca. 58 nm. Daraus wurde eine Pulsdauer von 23 fs berechnet.

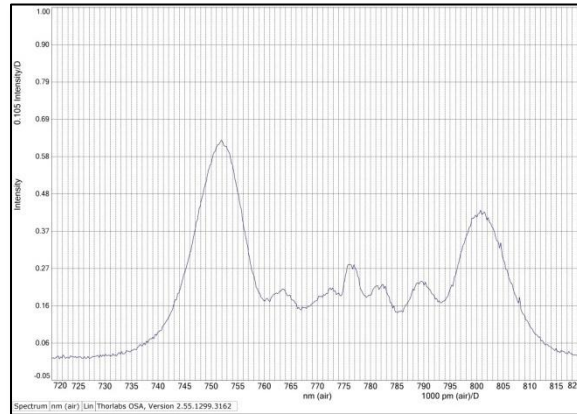


Abbildung 9 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.2.2.

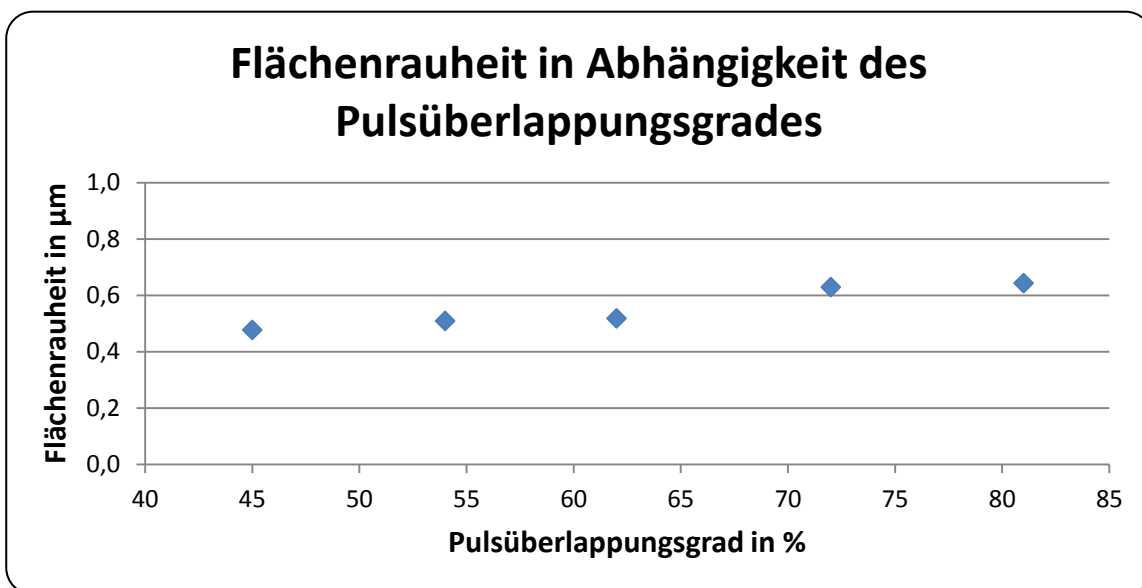


Diagramm 10 : Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit des Pulsüberlappungsgrades.

Im oben sichtbaren Diagramm wird der Einfluss des Pulsüberlappungsgrades, auf die Flächenrauheit der Struktur ersichtlich. Auch bei Wolframcarbid wird keine signifikante Abweichung der Flächenrauheit, mit sich änderndem Pulsüberlappungsgrad im untersuchten Bereich, erkennbar. In folgenden Bildern soll der Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit der Struktur, nochmals optisch mittels REM Aufnahmen verdeutlicht werden.

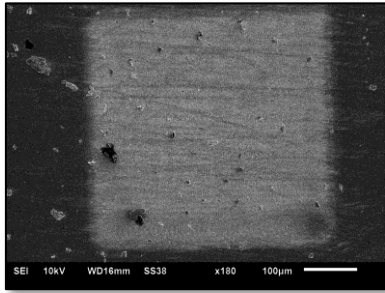


Bild 38 : Pulsüberlappungsgrad 81 % 180 fach.

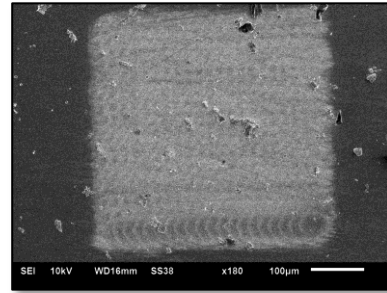
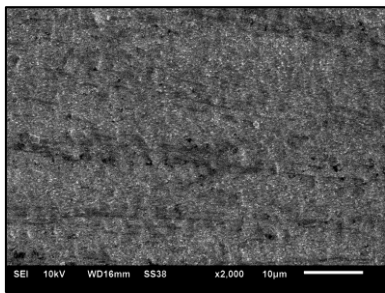
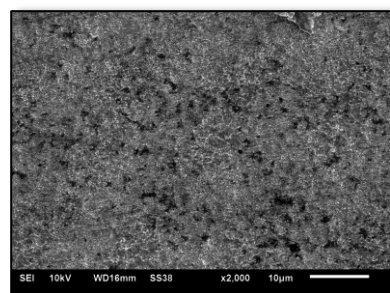


Bild 39 : Pulsüberlappungsgrad 62 % 180 fach.

Bild 40 : Pulsüberlappungsgrad 81 %  
2000 fach.Bild 41 : Pulsüberlappungsgrad 62 %  
2000 fach.

### 11.2.3 Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit

Um den Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit zu zeigen, wurde die Anzahl der Überfahrten erhöht, gekoppelt mit einer schichtweisen Fokussierung um eine Defokussierung zu vermeiden. Das zur Bearbeitung verwendete Spektrum weist eine Verbreiterung von ca. 59 nm auf. Aufgrund des verwendeten Spektrums ergibt sich eine Pulsdauer von ca. 24 fs.

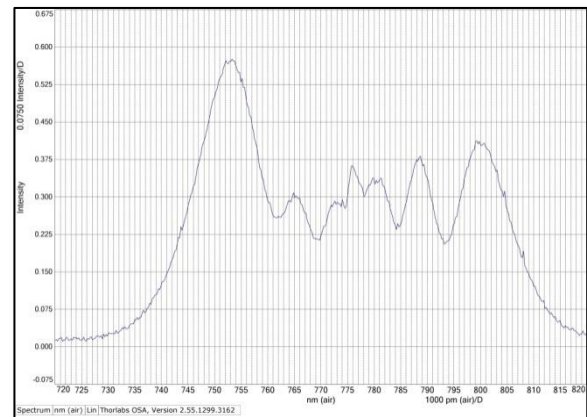


Abbildung 10 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.2.3.

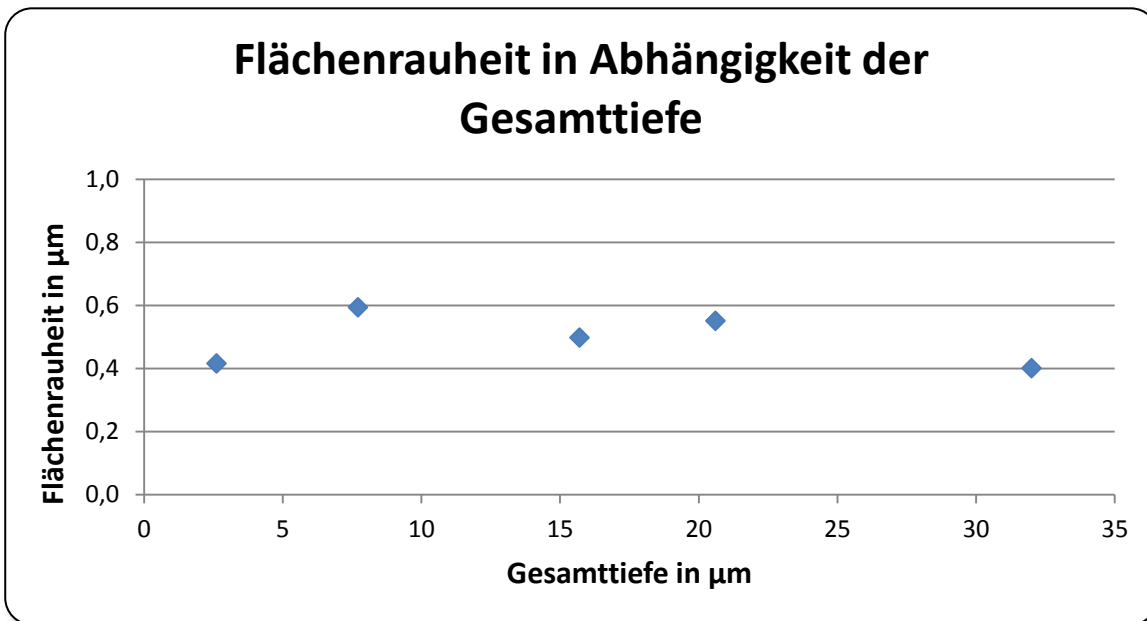


Diagramm 11 : Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Gesamttiefe der Struktur.

Wie man in Diagramm 11 sehen kann schwankt die Flächenrauheit um einen Wert von ca.  $0,5 \mu\text{m}$ . Man erkennt keinen direkten Zusammenhang zwischen der Anzahl der Überfahrten (Gesamttiefe der Struktur) und der Flächenrauheit.

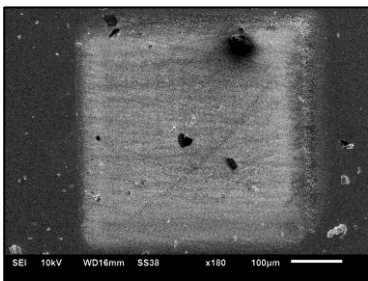


Bild 42 : 12 Überfahrten Gesamttiefe  $7,71 \mu\text{m}$  180 fach.

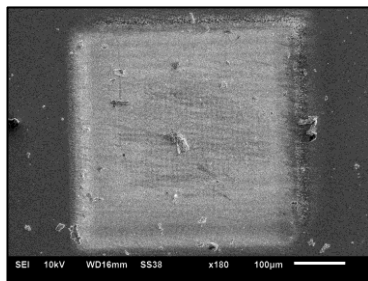


Bild 43 : 24 Überfahrten Gesamttiefe  $15,7 \mu\text{m}$  180 fach.

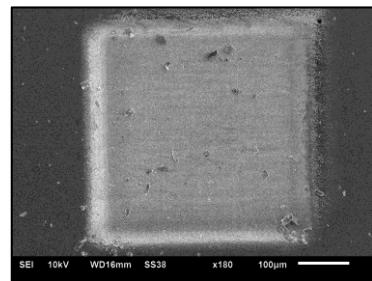


Bild 44 : 48 Überfahrten Gesamttiefe  $32 \mu\text{m}$  180 fach.

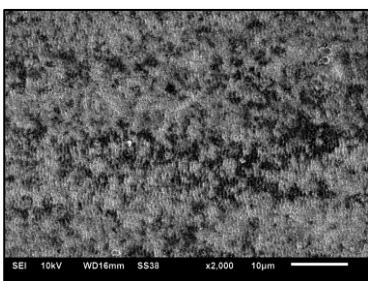


Bild 45 : 12 Überfahrten Gesamttiefe  $7,71 \mu\text{m}$  2000 fach.

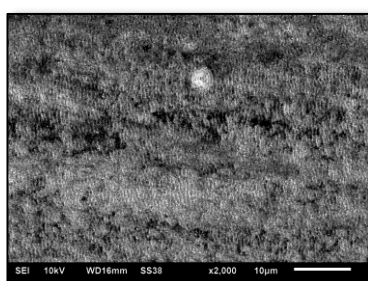


Bild 46 : 24 Überfahrten Gesamttiefe  $15,7 \mu\text{m}$  2000 fach.

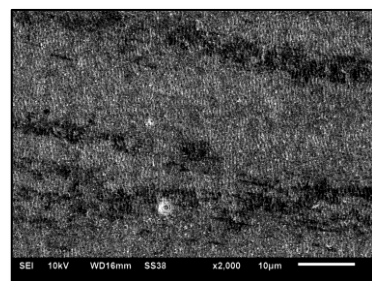


Bild 47 : 48 Überfahrten Gesamttiefe  $32 \mu\text{m}$  2000 fach.

### 11.2.4 Zusammenfassung für das Material Wolframcarbid

Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse für Wolframcarbid.

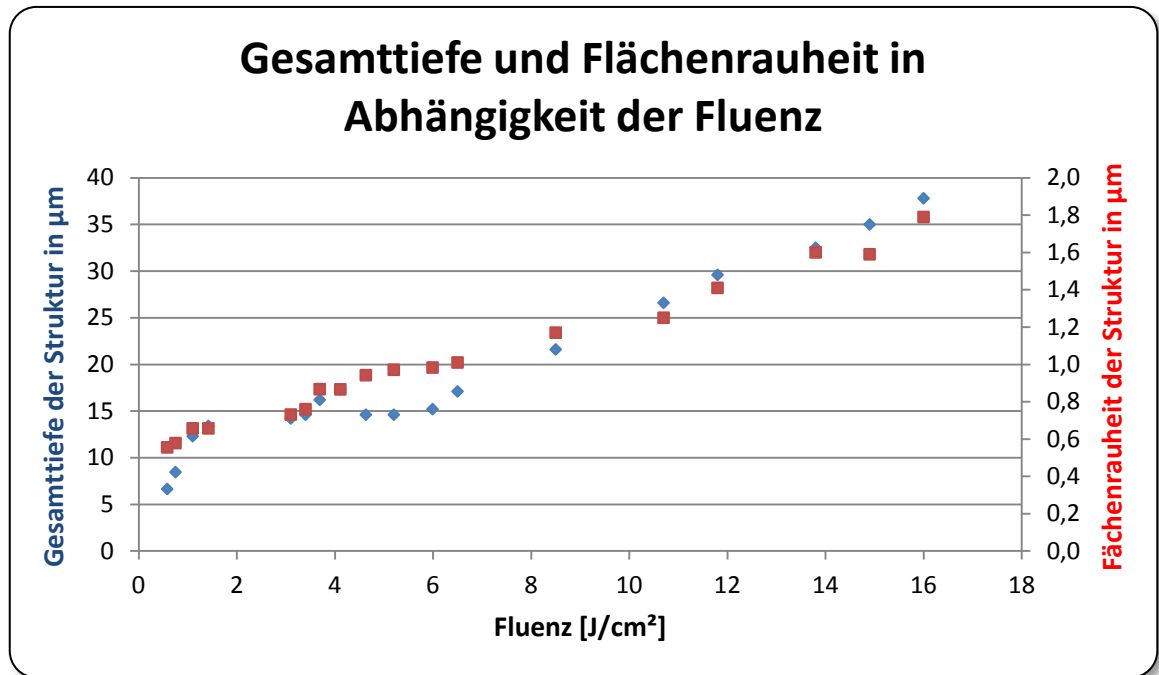


Diagramm 12 : Gesamtiefe und Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz.

Im obigen Diagramm sind Gesamtiefe und Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz abgetragen. Sichtbar wird der gleichmäßige Anstieg der Tiefe, sowie der Flächenrauheit bei steigender Fluenz. Demnach kann kein optimaler Bereich für die Bearbeitung abgesteckt werden. Durch die durchgeführten Versuche wurde gezeigt, dass sich die Schwellfluenz von 150 fs sowie 22 fs im selben Fluenzbereich befinden. Desweiteren ist der Übergang von 1. zu 2. Ablationsregime, bei beiden zu vergleichenden Pulsdauern, im gleichen Fluenzbereich. Ebenso bleibt zu erwähnen, dass die Anzahl der Überfahrten (Gesamtiefe der Struktur), sowie der Pulsüberlappungsgrad keinen Einfluss auf die Flächenrauheit aufweisen. Zudem wurde die Entstehung von Rippel, bei gering gewählten Bearbeitungsfluenzen, ähnlich wie bei Stahl, festgestellt. Gemäß dem Lambert-Beer'schen Gesetzes (für das 1. Ablationsregime) wurde ein Absorptionskoeffizient von  $7,9 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  für die Pulsdauer von 22 fs und  $4,75 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  für die Pulsdauer von 150 fs berechnet.

## 11.3 Untersuchungen an Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade

### 11.3.1 Ablationsverhalten von Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade

In diesem Abschnitt soll das Ablationsverhalten von Quarzglas näher beschrieben werden. Das Spektrum, welches zur Bearbeitung von Quarzglas verwendet wurde, erstreckt sich von ca. 742 bis ca. 806 nm. Daraus resultiert eine Pulsdauer, die sich unter optimalen Bedingungen, zu ca. 25 fs ergibt. Zunächst werden die Abtragtiefe pro Puls und die Flächenrauheit in Abhängigkeit zur Fluenz betrachtet.

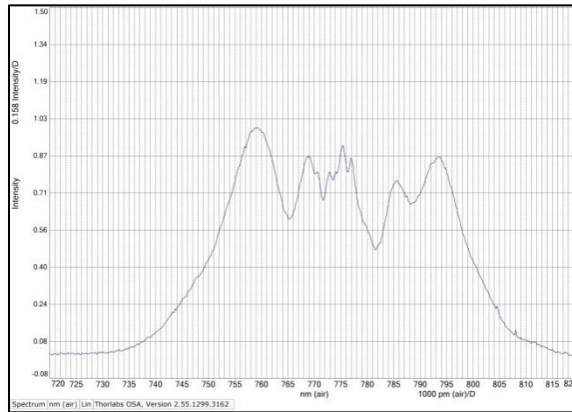


Abbildung 11 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.3.1.

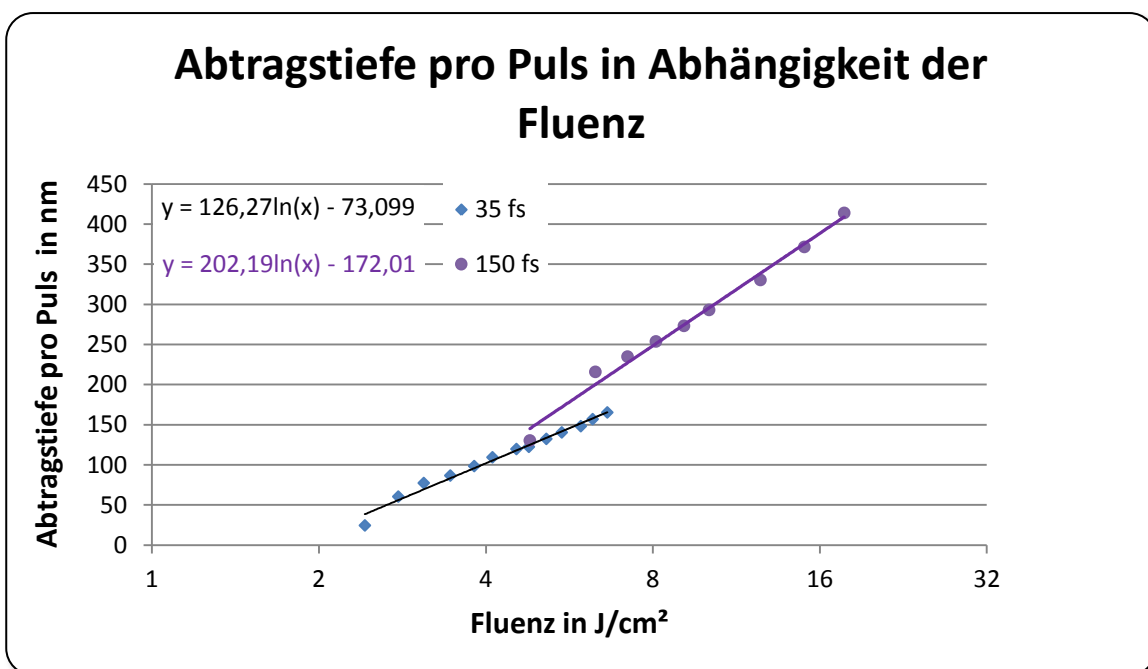


Diagramm 13 : Abtragtiefe Pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz.

Das Diagramm 13 zeigt die Abhängigkeit der Abtragtiefe pro Puls von der Fluenz bei ca. 25 fs und 150 fs. Der Pulsüberlappungsgrad wurde bei beiden Versuchen auf ca. 85 % gewählt. Man erkennt ein gleichmäßiges Ansteigen beider Verläufe mit steigender Fluenz. Ein bedeutender Unterschied wird bei den Schwellfluenzen deutlich. Mit ca. 25 fs sind bei ca. 3 J/cm<sup>2</sup> schon Abträge realisierbar, doch bei 150 fs werden erst bei ca. 6 J/cm<sup>2</sup>

Abträge möglich. Diese Erscheinung wird durch die hohen Intensitäten bei kürzeren Pulsen erklärbar. Die Ablationsschwellfluenzen wurden, mit den in Diagramm 13 angegebenen Anpassungsfunktionen, berechnet. Diese ergaben sich bei 25 fs zu ca. 1,78 J/cm<sup>2</sup> und bei 150 fs zu 2,34 J/cm<sup>2</sup>.

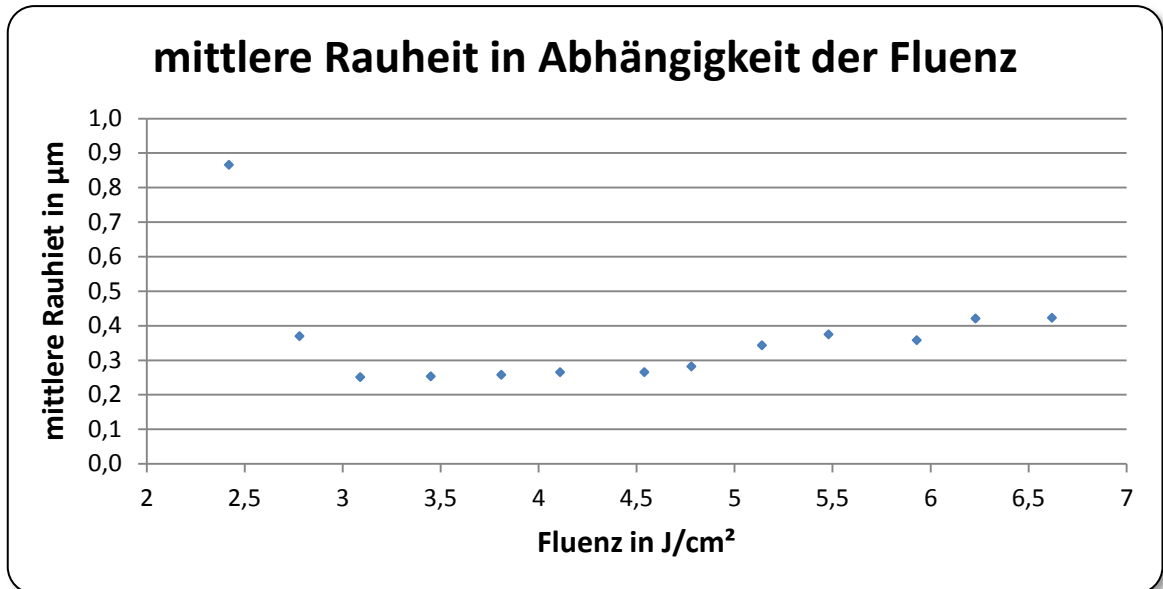


Diagramm 14 : mittlere Rauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz.

Desweiteren wurde die mittlere Rauheit der mit 25 fs bearbeiteten Strukturen näher analysiert. Es wird ein gleichmäßiges Ansteigen der Rauheit mit steigender Fluenz deutlich. Der erste Messpunkt in Diagramm 14 zeigt lediglich, dass bei geringen Fluenzen an manchen Stellen der Struktur etwas ablatiert wurde und an anderen nicht, was den hohen Rauheitswert dieser Struktur nach sich zieht. Diese unterschiedlichen Ablationserscheinungen werden durch Fehlstellen bzw. verschmutzte Oberflächen des Quarzglassubstrates erklärbar.

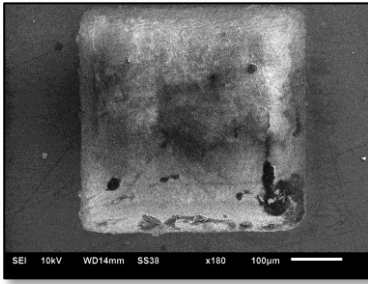


Bild 48 :  $H = 6 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

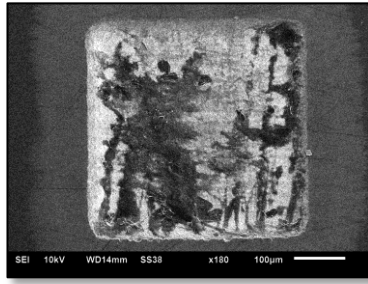


Bild 49 :  $H = 4 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

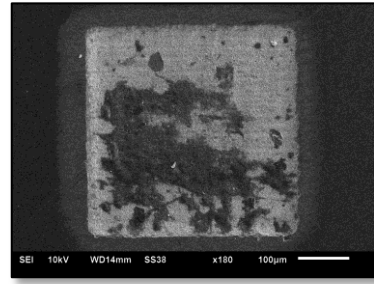


Bild 50 :  $H = 2,7 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

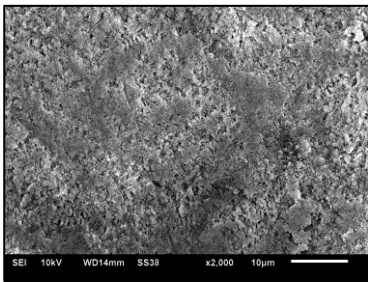


Bild 51 :  $H = 6 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

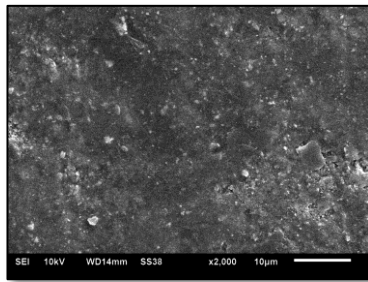


Bild 52 :  $H = 4 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

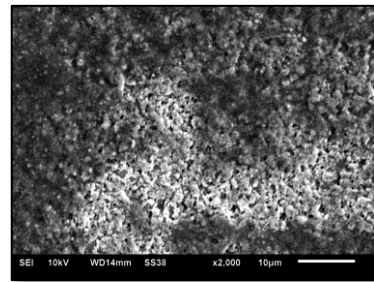


Bild 53 :  $H = 2,7 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

In den oben sichtbaren Bildern sind die Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Bearbeitungsfluenzen ersichtlich. Man erkennt sehr deutlich die Ausplatzungen in der Oberfläche des Quarzglassubstrates (Bild 51). Die dunkleren Stellen wie sie in Bild 49 zusehen sind, könnten Materialablagerungen von der Bearbeitung (Debris) sein.



### 11.3.2 Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit

In Abschnitt 11.3.2 soll der Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die mittlere Rauheit aufgezeigt werden. Das verwendete Spektrum für diesen Versuch zeichnet sich durch einen Wellenlängenbereich von ca. 59 nm aus. Aus in Abbildung 12 gezeigtem Spektrum ergibt sich eine Pulsdauer von ca. 23 fs. Dieser Versuch erfolgte unter einer konstanten Fluenz von 5 J/cm<sup>2</sup> und der Pulsüberlappungsgrad wurde von ca. 50 bis 85 % variiert.

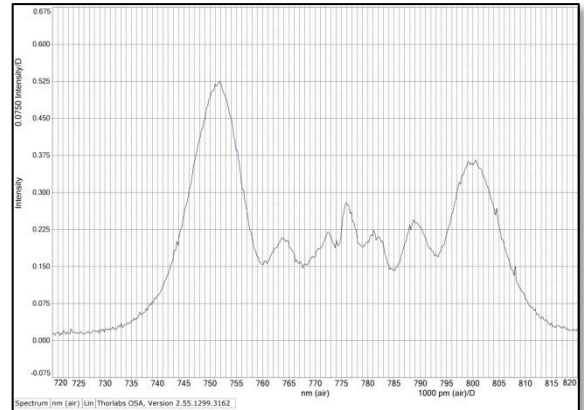


Abbildung 12 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.3.2.

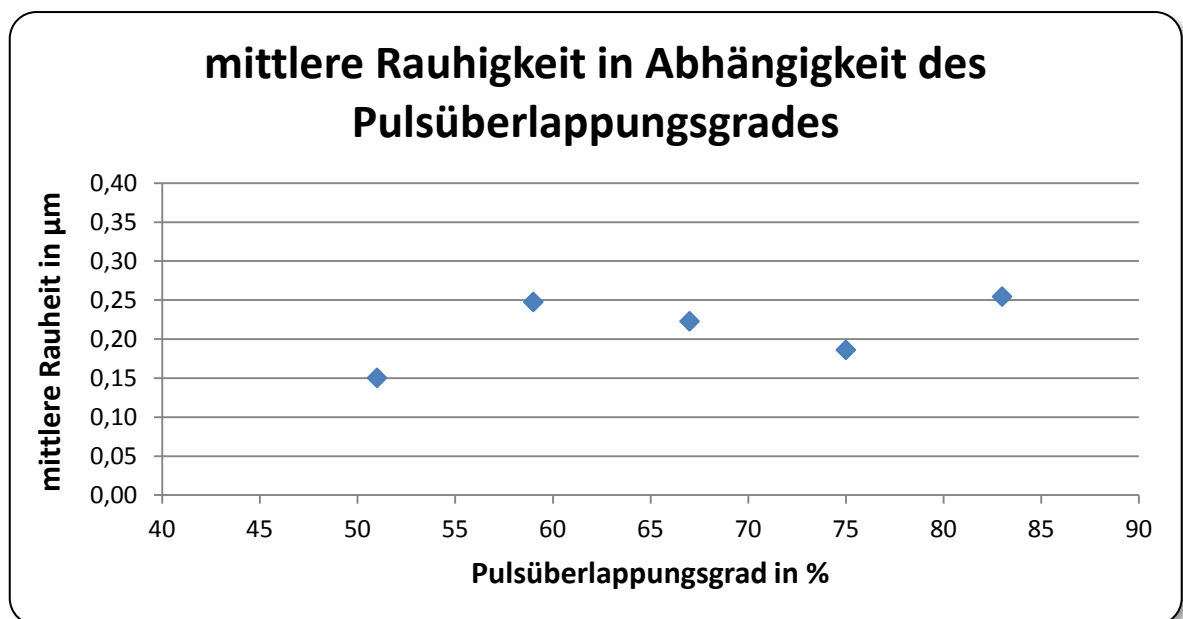


Diagramm 15 : mittlere Rauigkeit der Struktur in Abhängigkeit des Pulsüberlappungsgrades.

Es ist eine moderate Schwankung des Messwertes um ca. 100 nm festzustellen, welche vernachlässigt werden kann. Demnach ist auch bei Quarzglas keine direkte Abhängigkeit zwischen mittlerer Rauigkeit und des Pulsüberlappungsgrades, im untersuchten Bereich, ersichtlich.

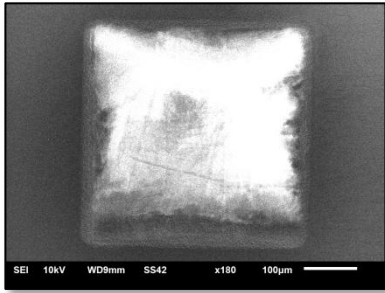


Bild 54 : Pulsüberlappungsgrad 83 % 180 fach.

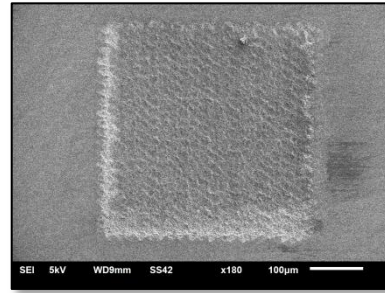
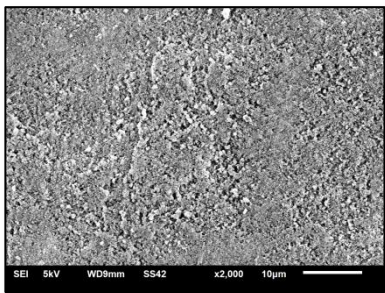
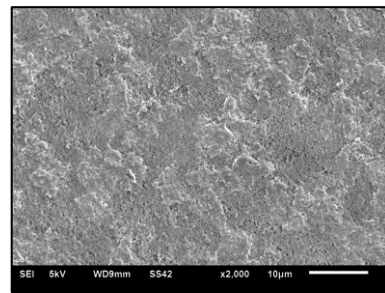


Bild 55 : Pulsüberlappungsgrad 67 % 180 fach.

Bild 56 : Pulsüberlappungsgrad 83 %  
2000 fach.Bild 57 : Pulsüberlappungsgrad 67 %  
2000 fach.

### 11.3.3 Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit

In diesem Versuchsteil wird die Abhängigkeit der mittleren Rauheit von der Gesamttiefe der Struktur aufgezeigt. Zu diesem Zweck wurde ein Spektrum, welches in Abbildung 13 dargestellt ist, genutzt. Dieses zeichnet sich durch eine spektrale Breite von ca. 66 nm aus. Die daraus resultierende Pulsdauer ergibt sich zu ca. 21 fs.

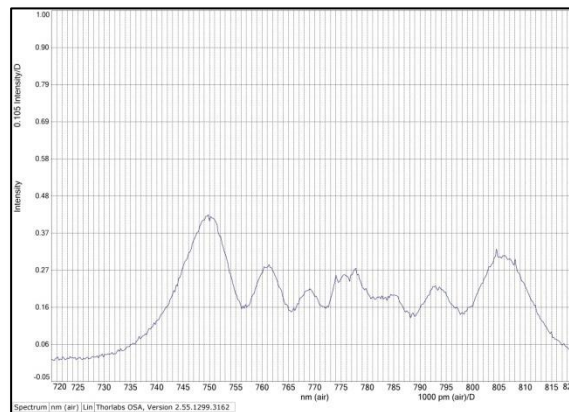


Abbildung 13 : verwendetes Spektrum in Versuch 11.3.3.

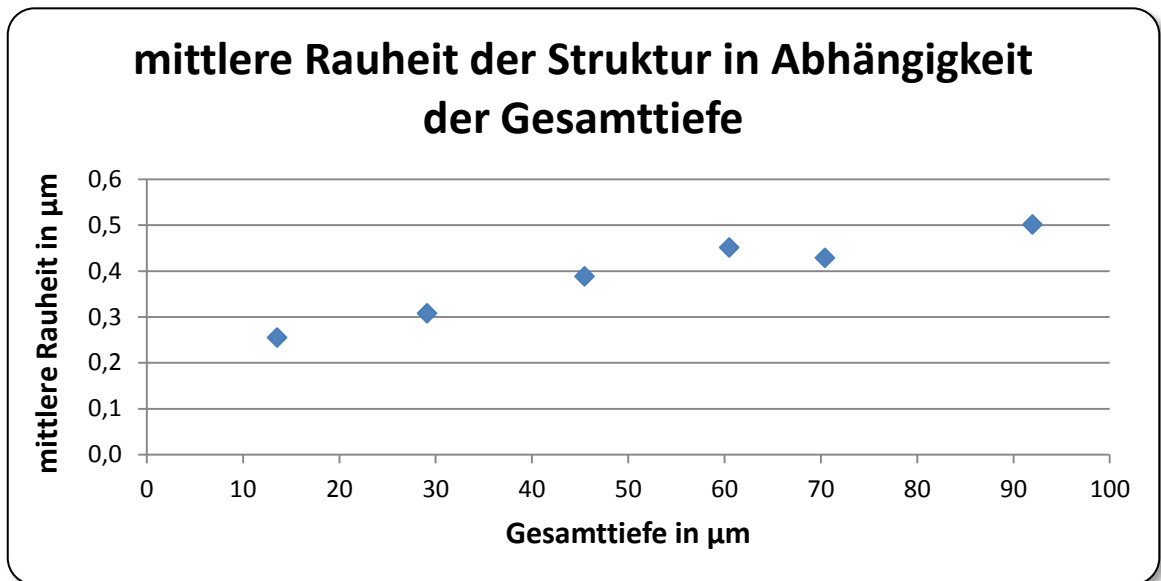


Diagramm 16 : mittlere Rauheit der Struktur in Abhängigkeit der Gesamttiefe der Struktur.

Die Ergebnisse des Experimentes sind in Diagramm 16 dargestellt. Der Versuch wurde bei einer Fluenz von ca.  $3 \text{ J/cm}^2$  und einem Pulsüberlappungsgrad von 83 % durchgeführt. Man erkennt ein gleichmäßiges Ansteigen der mittleren Rauigkeit mit zunehmender Gesamttiefe der Struktur. Die Ursache dieser Erscheinung könnten Ausplatzungen im Material sein, welche mit steigender Strukturtiefe zunehmen und somit ein Ansteigen der mittleren Rauheit nach sich zieht oder die Materialablagerungen die bei der Bearbeitung zurückbleiben und somit die mittlere Rauheit beeinflussen. Um diesen Einfluss näher zu charakterisieren könnten die Proben in folgenden Versuchen nachträglich behandelt werden um die Bearbeitungsrückstände effektiv zu entfernen (z.B. nachträgliches KOH ätzen). In den im nachfolgenden angeführten Bildern, ist der Einfluss der Gesamttiefe der Struktur auf die Flächenrauheit ebenso deutlich ersichtlich.

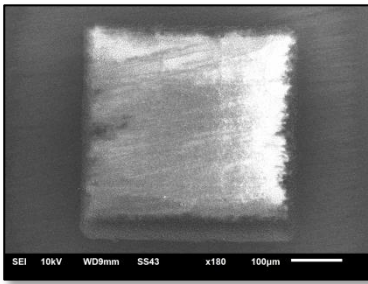


Bild 58 : 4 Überfahrten Gesamtiefe 13,5 µm 180 fach.

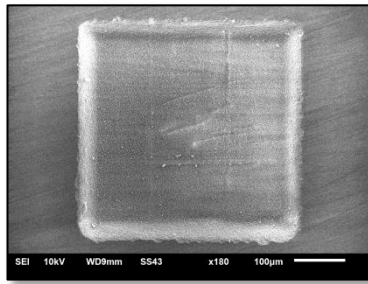


Bild 59 : 12 Überfahrten Gesamtiefe 45,5 µm 180 fach.

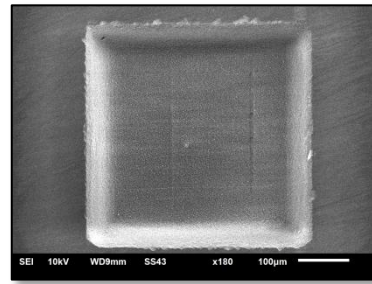


Bild 60 : 28 Überfahrten Gesamtiefe 108 µm 180 fach.

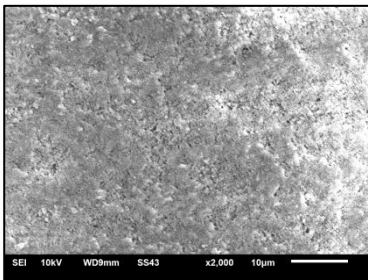


Bild 61 : 4 Überfahrten Gesamtiefe 13,5 µm 2000 fach.

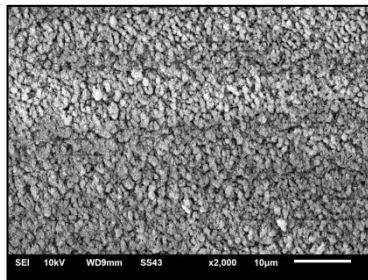


Bild 62 : 12 Überfahrten Gesamtiefe 45,5 µm 2000 fach.

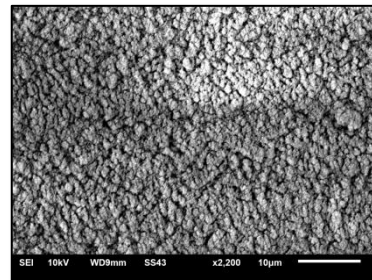


Bild 63 : 28 Überfahrten Gesamtiefe 108 µm 2000 fach.

### 11.3.4 Zusammenfassung für das Material Quarzglas

Abschließend für Quarzglas eine kurze Zusammenfassung der gewonnenen Daten.

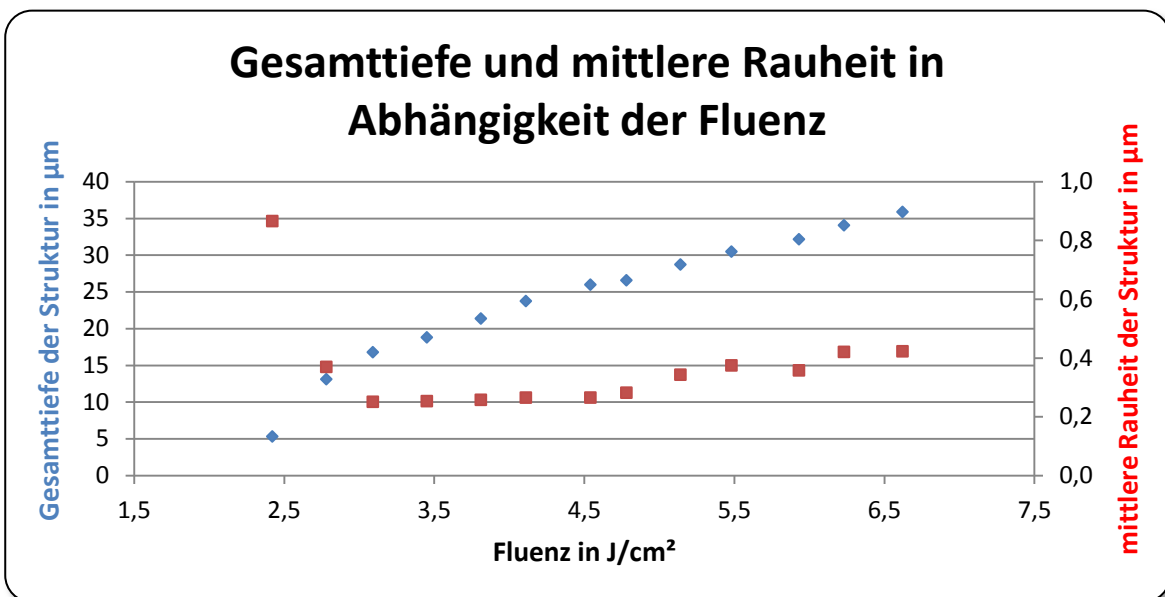


Diagramm 17 : Gesamtiefe und mittlere Rauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz.

Das Diagramm 17 zeigt die Gesamttiefe und mittlere Rauheit in Abhängigkeit zur Fluenz. Erkennbar aus diesem wird, dass der optimale Fluenzbereich sich für einen effektiven Abtrag von ca. 3,5 bis 5 J/cm<sup>2</sup> erstreckt. In diesem Fluenzband bleibt die mittlere Rauheit der Struktur annähernd gleich. Desweiteren bleibt zu erwähnen, dass die Schwellfluenzen signifikante Unterschiede aufweisen, welche sich mit den Beobachtungen, bei den Versuchen, in Einklang bringen lassen. Bei ca. 25 fs lassen sich, aufgrund der resultierenden hohen Intensitäten bei solch kurzen Pulsdauern, bereits bei sehr geringen Fluenzen Abträge erzielen. Anders bei 150 fs wo höhere Fluenzen erforderlich werden. Desweiteren wurde durch weitere Untersuchungen deutlich, dass der Pulsüberlappungsgrad, im untersuchten Bereich, in keinem direkten Verhältnis zur mittleren Rauheit der Struktur steht. Im Gegensatz dazu zeichnet sich eine Abhängigkeit der mittleren Rauheit zur Strukturtiefe ab. Es wurde eine Erhöhung der Rauigkeit bei steigender Gesamttiefe eindeutig nachgewiesen. Der Absorptionskoeffizient wurde mithilfe des Lambert Beer'schen Gesetzes bestimmt. Da aber im Falle des Quarzglasess vordergründig nichtlineare Ionisationseffekte eine Rolle spielen, besitzt der Absorptionskoeffizient nur bedingt Aussagekraft. Der berechnete Wert für die Pulsdauer von 25 fs ergibt sich zu  $0,78 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  und für 150 fs zu  $0,49 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

## 11.4 Untersuchungen an PMMA (Polymethylmethacrylat) Kunststoff

### 11.4.1 Ablationsverhalten von PMMA Kunststoff

In diesem Abschnitt sollen die Abhängigkeiten der Strukturtiefe und der Flächenrauheit von der Fluenz näher erläutert werden. Ebenso wird ein Vergleich von den Pulsdauern ca. 35 fs und 150 fs durchgeführt. Die Abbildung zeigt das verwendete Spektrum, dieses erstreckt sich über einen Bereich von ca. 54 nm. Der Pulsüberlappungsgrad wurde hier auf ca. 80 % festgelegt und die errechnete Pulsdauer ergibt sich zu 26 fs.

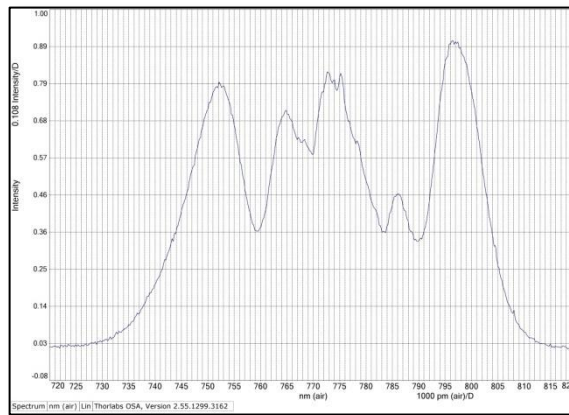


Abbildung 14 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.4.1.

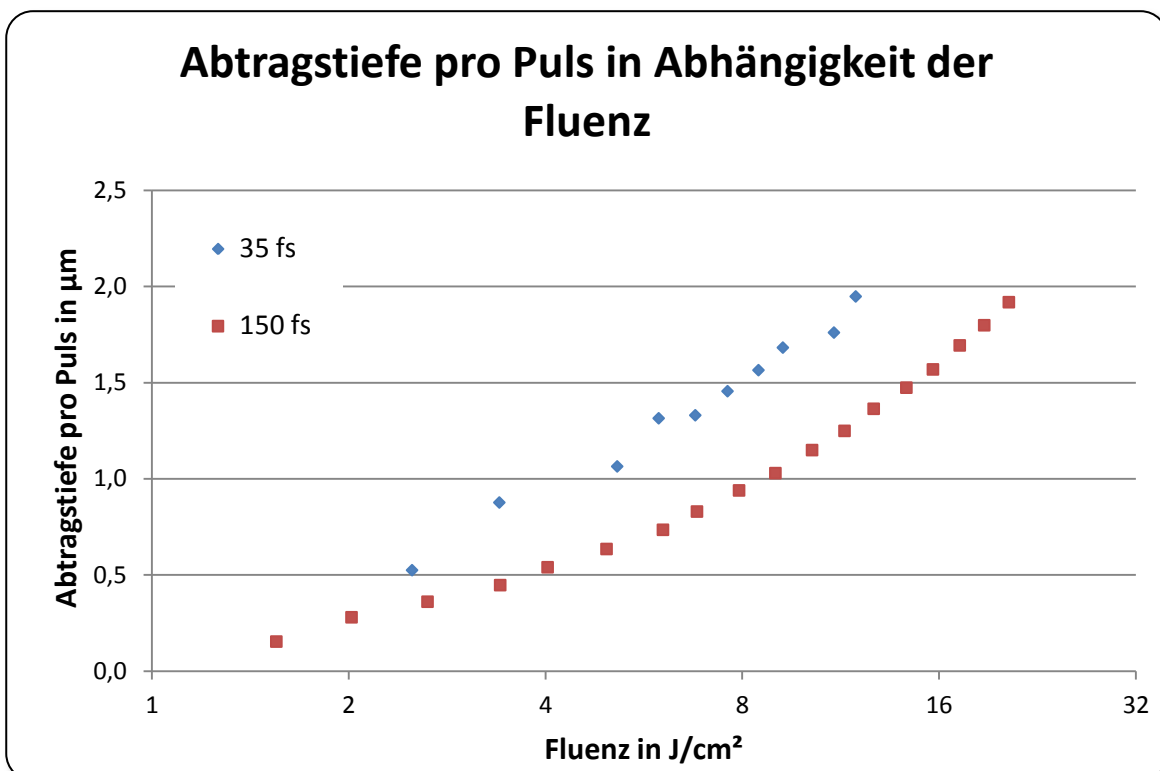


Diagramm 18 : Abtragstiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz.

In Diagramm 18 wird der drastische Einfluss der Pulsdauer deutlich erkennbar. Hier wird die Abtragstiefe pro Puls in Abhängigkeit zur Fluenz für 26 fs sowie 150 fs dargestellt. Der

Fluenzbereich bei 26 fs konnte nur bedingt, durch die zur Verfügung stehenden Filter, abgeschwächt werden. Bei 150 fs wurde absichtlich ein größerer Bereich genutzt um den Einfluss der kürzeren Pulsdauer besser zu zeigen. Es wird ersichtlich, dass bei einer Pulsdauer von 26 fs erheblich mehr Material pro Puls abgetragen wird als mit 150 fs. Demzufolge sind die Gesamtstrukturtiefen bei kurzen Pulsen auch erheblich größer als bei längeren Pulsen. Dies bringt einige Probleme mit sich und macht zusätzliche Untersuchungen notwendig, wie zum Beispiel die größer werdende Defokussierung bei steigender Strukturtiefe (in Diagramm 19 zu sehen).

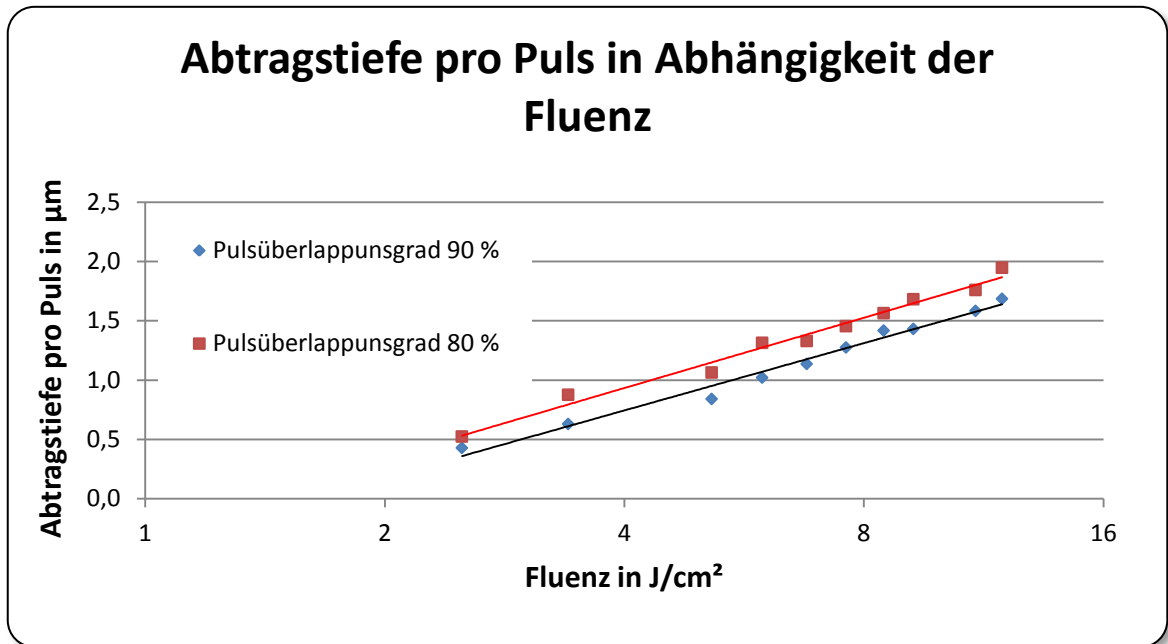


Diagramm 19 : Abtragtiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz  
(Einfluss der Defokussierung).

Hier wird der Einfluss der Defokussierung deutlich gezeigt. Bei höherem Pulsüberlappungsgrad wird weniger Material pro Puls ablatiert, da umso größer die Tiefe der Struktur umso stärker der Effekt der Defokussierung und somit sinkt die resultierende Fluenz. Infolge dessen resultiert ein geringerer Abtrag als bei einem Pulsüberlappungsgrad von 80 %, da sich dort der Einfluss der Defokussierung nicht so stark bemerkbar macht. Um diese Aussage zu stützen wurde der Versuch bei einem geringeren Pulsüberlappungsgrad wiederholt.

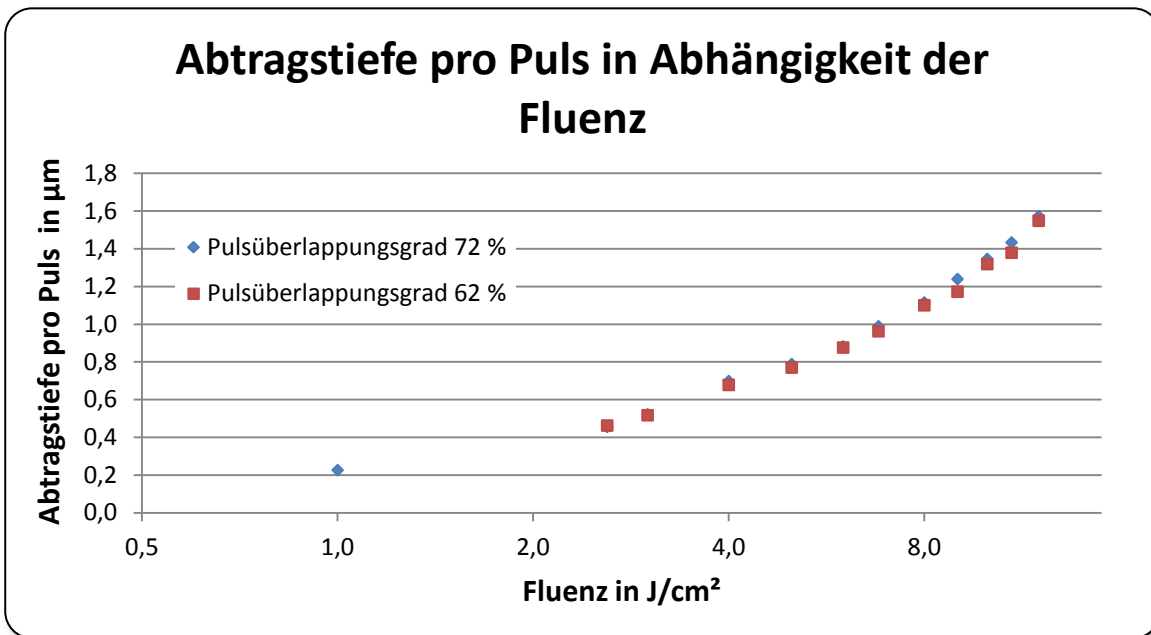


Diagramm 20 : Abtragtiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz  
(Überprüfung des Einflusses der Defokussierung).

Da mit sinkendem Pulsüberlappungsgrad auch die Gesamttiefe der Struktur abnimmt, kann so der Einfluss der Defokussierung ausgeblendet werden (Diagramm 20). Da aufgrund der geschilderten Problematik, die Bestimmung der Ablationsschwellfluenz verfälscht werden kann, wurde diese für 26 fs bei einem Pulsüberlappungsgrad von 72 % errechnet.

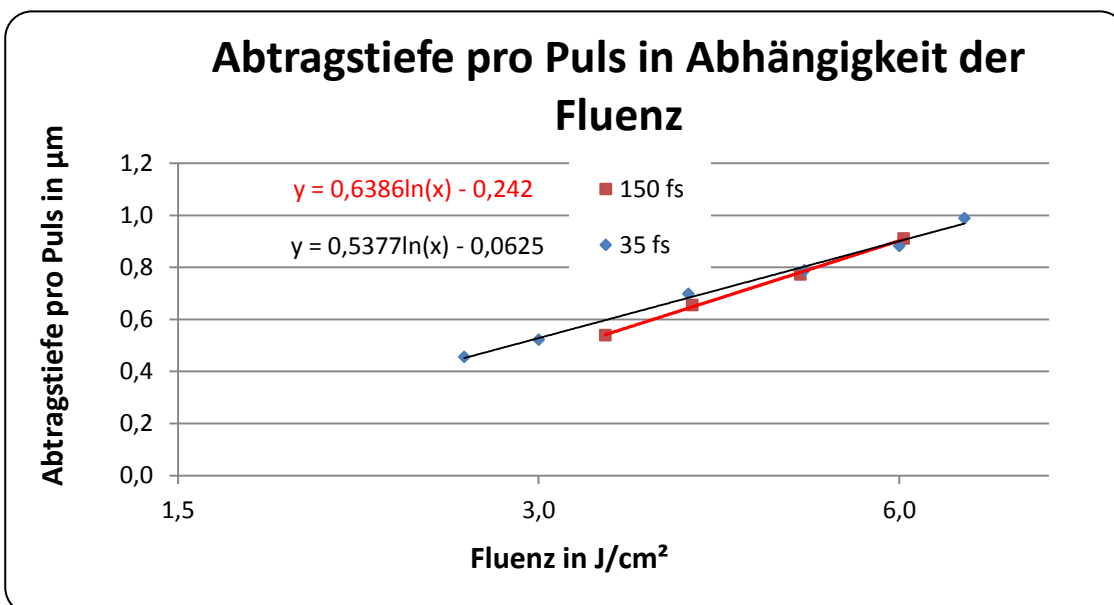


Diagramm 21 : Abtragtiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz  
(Bestimmung der Schwellfluenzen bei einem Pulsüberlappungsgrad von ca. 70 %).



Mit der in Diagramm 21 angegebenen Anpassungsfunktion wurde für die Pulsdauer von 26 fs eine Ablationsschwelldosis von  $1,12 \text{ J/cm}^2$  und für 150 fs eine Schwelldosis von  $1,46 \text{ J/cm}^2$  berechnet. Erwartungsgemäß liegt die Ablationsschwelldosis für die Pulsdauer von 26 fs unter der für 150 fs.

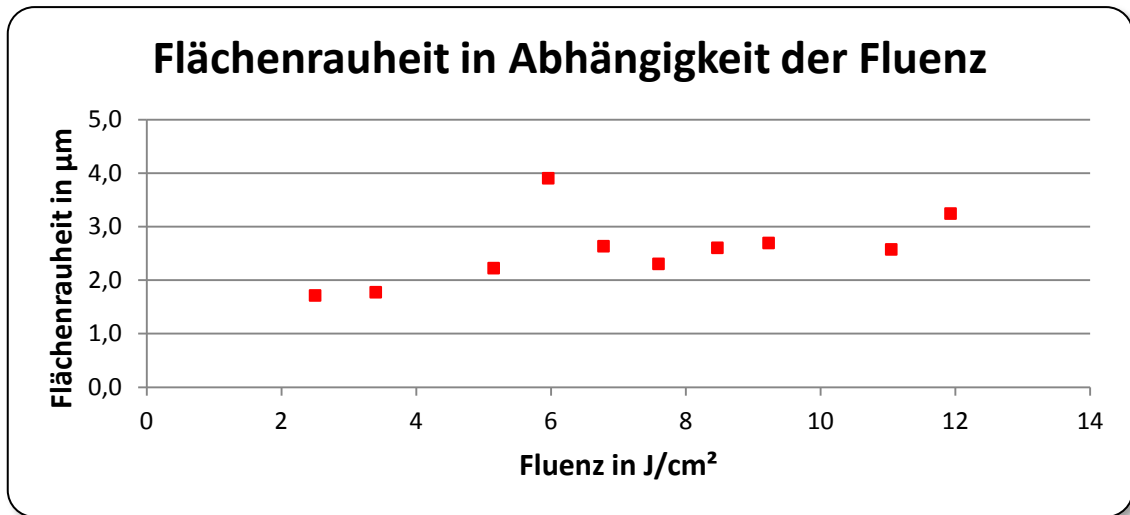


Diagramm 22 : Flächenrauheit in Abhängigkeit der Fluenz.

Die Flächenrauheit steigt mit zunehmender Fluenz leicht an, wie aus Diagramm 21 und in den folgenden REM Aufnahmen ersichtlich wird.

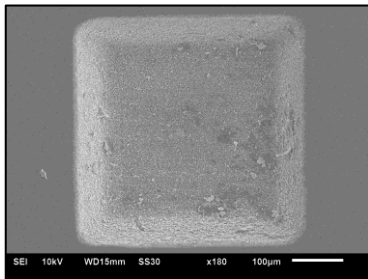


Bild 64 :  $H = 3,4 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

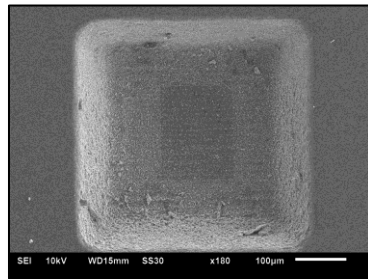


Bild 65 :  $H = 7,6 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

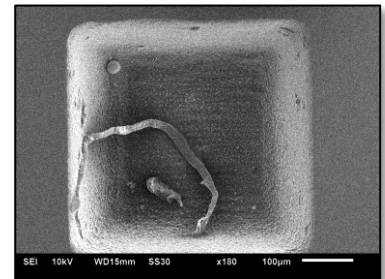


Bild 66 :  $H = 12 \text{ J/cm}^2$   
180 fach.

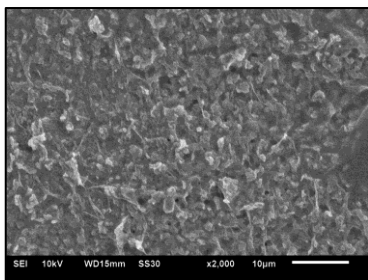


Bild 67 :  $H = 3,4 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

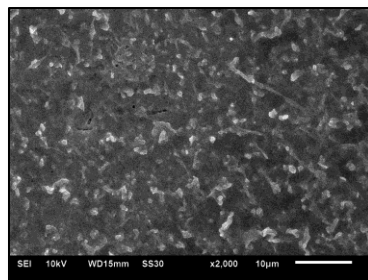


Bild 68 :  $H = 7,6 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

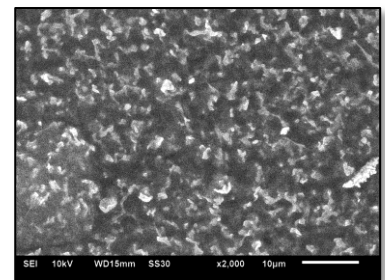


Bild 69 :  $H = 12 \text{ J/cm}^2$   
2000 fach.

## 11.4.2 Einfluss des Pulsüberlappungsgrades auf die Flächenrauheit

Im Versuch 11.4.2 soll der Einfluss der Gesamttiefe der Struktur auf die Flächenrauheit gezeigt werden. Das verwendete Spektrum (in Abbildung 15 zu sehen) wurde zur Bearbeitung der Strukturen benutzt. Es erstreckt sich über ca. 58 nm. Die ideale Pulsdauer wurde auf 23 fs berechnet.

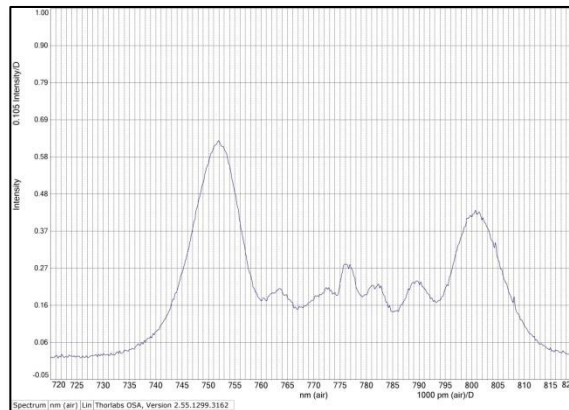


Abbildung 15 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.4.2.

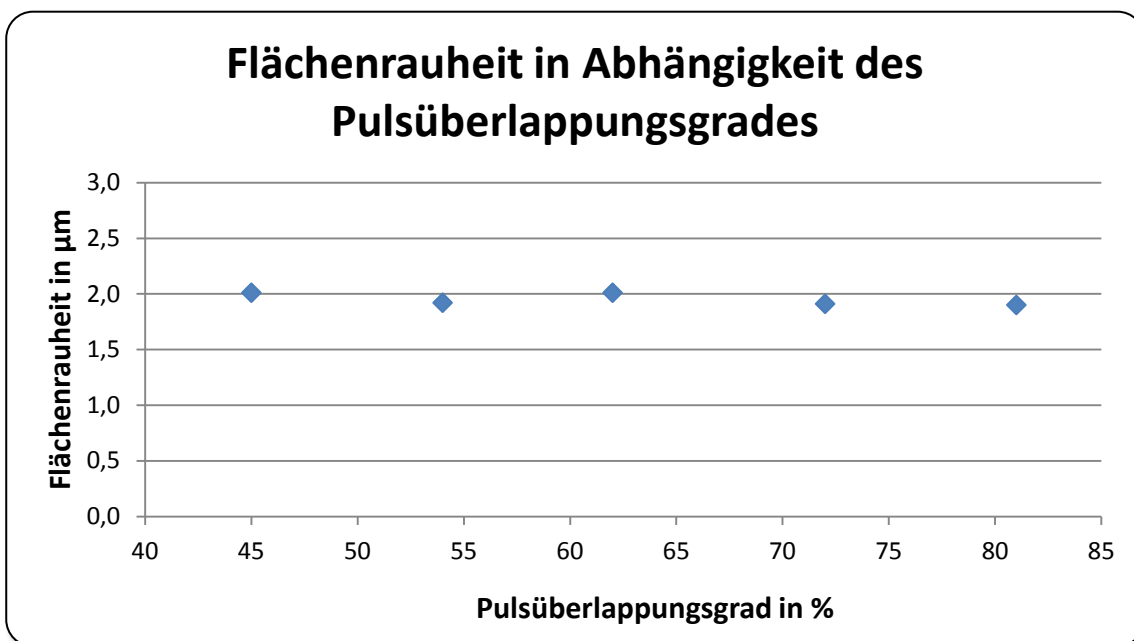


Diagramm 23 : Flächenrauheit in Abhängigkeit des Pulsüberlappungsgrades.

Im Versuch 11.4.2 wurde der Pulsüberlappungsgrad von ca. 45 bis zu 80 % variiert. Es wurden mehrere Teststrukturen, mit einer Fluenz von 5 J/cm<sup>2</sup>, erzeugt. Auch bei PMMA wirkt sich der Pulsüberlappungsgrad, im untersuchten Bereich, nicht auf die Flächenrauheit aus.

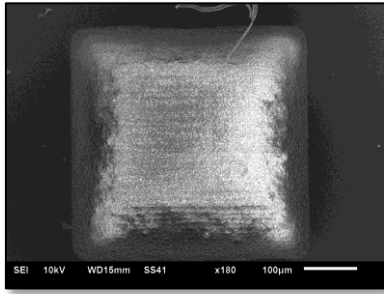


Bild 70 : Pulsüberlappungsgrad 81 % 180 fach.

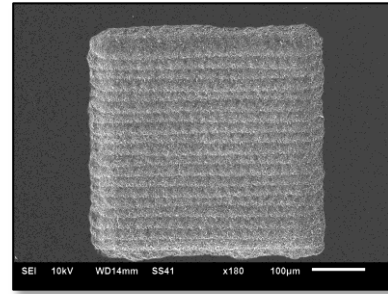
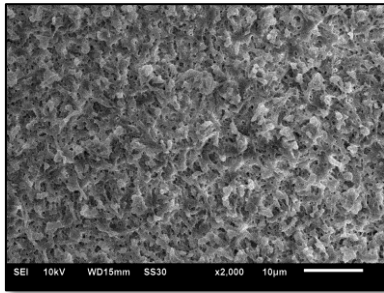
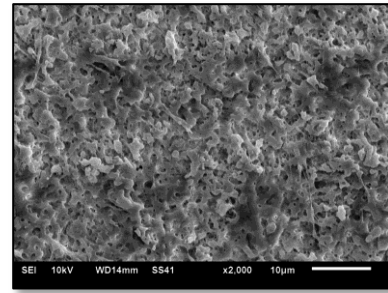


Bild 71 : Pulsüberlappungsgrad 62 % 180 fach.

Bild 72 : Pulsüberlappungsgrad 81 %  
2000 fach.Bild 73 : Pulsüberlappungsgrad 62 %  
2000 fach.

### 11.4.3 Einfluss der Gesamttiefe auf die Flächenrauheit

Auch bei PMMA soll der Einfluss der Gesamttiefe der Struktur auf die Flächenrauheit gezeigt werden. Das in diesem Versuch verwendete Spektrum erstreckt sich über ca. 67 nm. Daraus resultiert eine theoretisch bestimmte Pulsdauer, unter idealen Bedingungen, von ca. 20 fs. Dieser Versuch wurde bei einer Fluenz von ca. 3,4 J/cm<sup>2</sup> und einem Pulsüberlappungsgrad von 83 % durchgeführt.

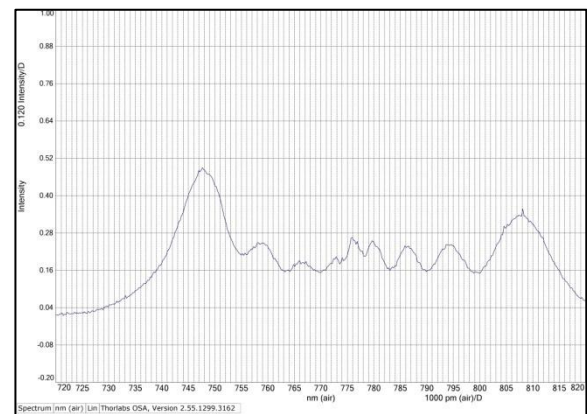


Abbildung 16 : verwendetes Spektrum im Versuch 11.4.3.

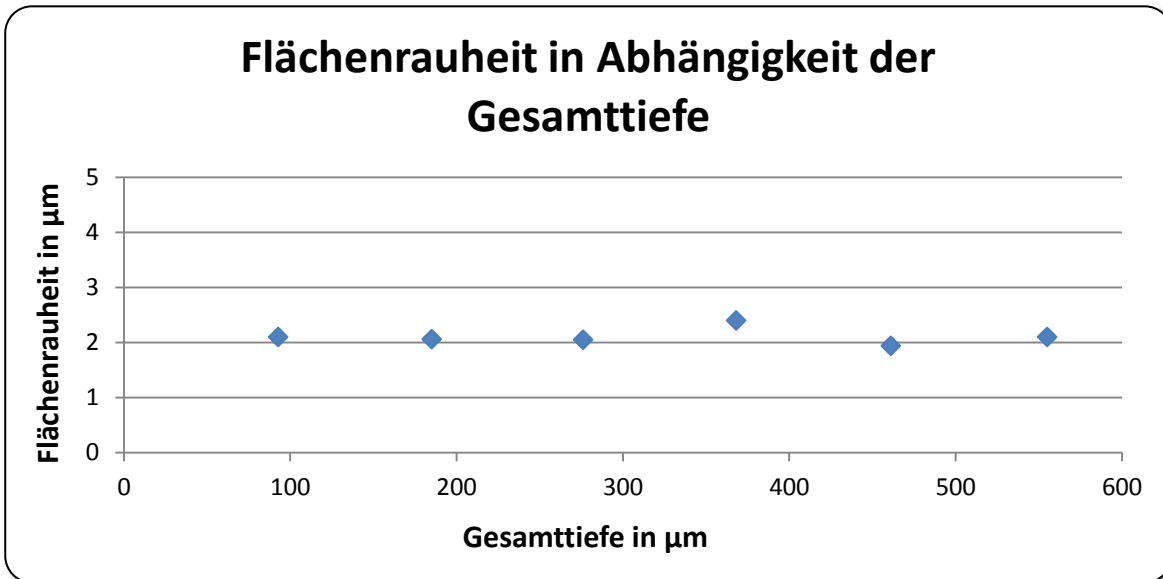


Diagramm 24 : Flächenrauheit in Abhängigkeit der Anzahl der Gesamttiefe der Struktur.

Aus Diagramm 24 geht hervor, dass auch bei steigender Strukturtiefe die Flächenrauheit annähernd konstant bleibt. Die folgenden Bilder zeigen Strukturen, welche sich in ihrer Gesamttiefe erheblich unterscheiden, doch in ihrer Oberflächenrauheit keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

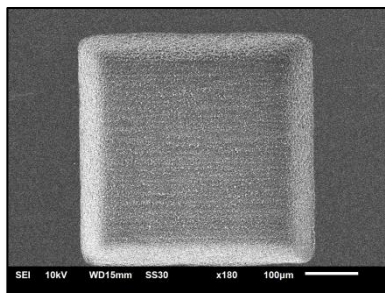


Bild 74 : 4 Überfahrten Gesamttiefe 92,7  $\mu\text{m}$   
180 fach.

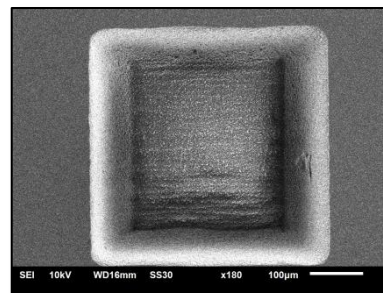


Bild 75 : 12 Überfahrten Gesamttiefe 276  $\mu\text{m}$   
180 fach.

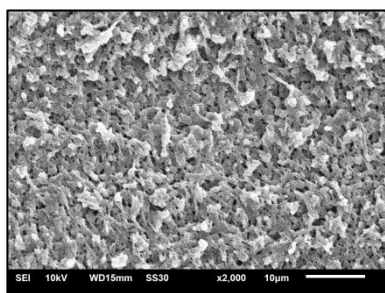


Bild 76 : 4 Überfahrten Gesamttiefe 92,7  $\mu\text{m}$   
2000 fach.

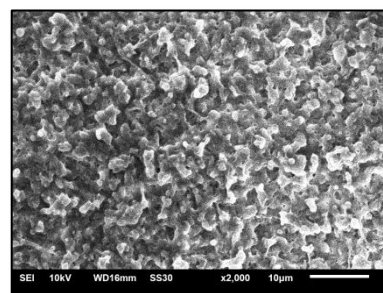


Bild 77 : 12 Überfahrten Gesamttiefe 276  $\mu\text{m}$   
2000 fach.

### 11.4.4 Zusammenfassung für das Material PMMA

Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung für das Material PMMA.

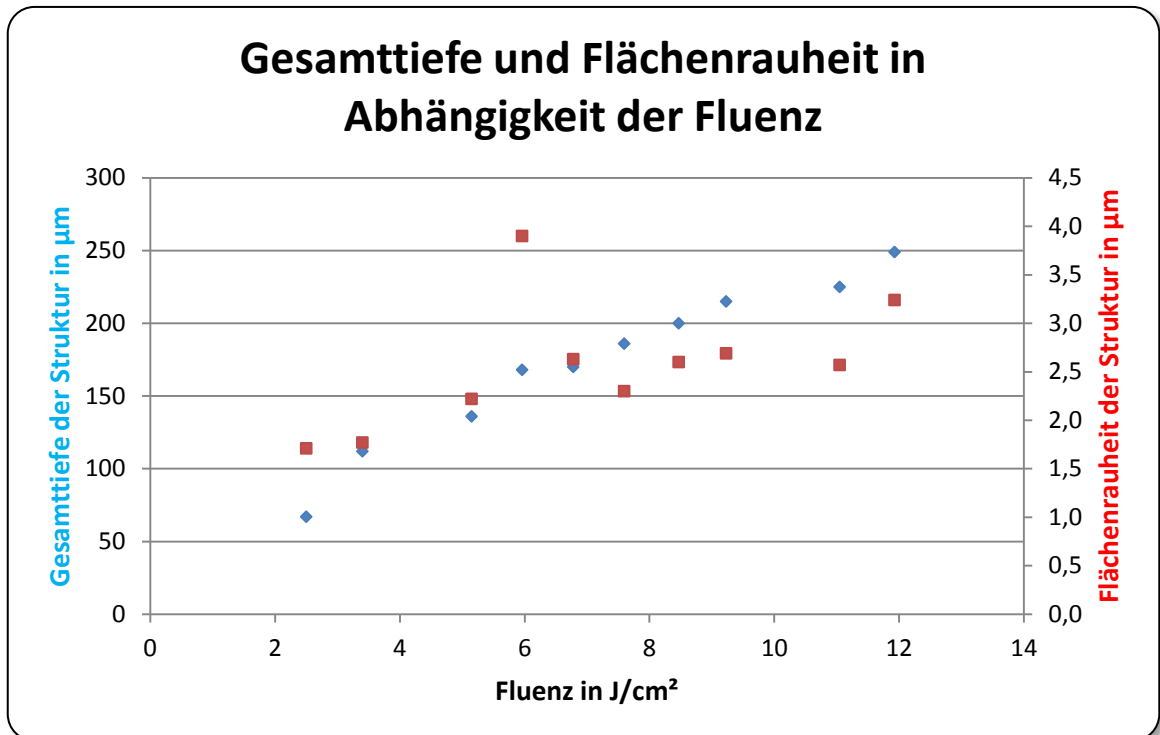


Diagramm 25 : Gesamtiefe und Flächenrauheit der Struktur in Abhängigkeit der Fluenz.

Bei PMMA steigt die Flächenrauheit gleichmäßig mit zunehmender Fluenz an. Daher kann hier kein optimaler Bereich für eine Strukturierung festgelegt werden. Desweiteren wurde ersichtlich das bei 26 fs eine geringere Ablationsschwelle festgestellt wurde als bei 150 fs. Zudem konnte ein erheblicher Unterschied in den Abtragsraten festgestellt werden. Eine mögliche Erklärung für diese Erscheinung könnte die Energiebandlücke, welche bei PMMA geringer ist als bei Quarzglas, liefern. Da bei PMMA nicht so viel Energie zur Generierung freier Ladungsträger (als bei Quarzglas) benötigt wird, kann hier ein größerer Teil der Energie, des Laserpulses, zum Abtrag verwendet werden. Ebenso muss erwähnt werden, dass die Tiefe der Struktur sowie der Pulsüberlappungsgrad keinen direkten Einfluss auf die Oberflächenqualität der Bodenstruktur aufweist. Die Berechnung des Absorptionskoeffizienten erfolgte analog zu Abschnitt 11.3.4 und liefert für die Pulsdauer von 26 fs einen Wert von  $0,13 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  und für 150 fs ergibt sich der Absorptionskoeffizient zu ca.  $0,18 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ . Auch bei PMMA ist die Aussagekraft des Absorptionskoeffizienten, aufgrund der nichtlinearen Ionisationsprozesse, eher kritisch zu betrachten.



## 12 Fehlerbetrachtung

In diesem Kapitel sollen ausgewählte Fehlerquellen, die einen großen Einfluss auf das Strukturierungsergebnis haben, näher beschrieben werden.

### 12.1 Schwankung der spektralen Verbreiterung

Die täglich anders verteilten spektralen Verbreiterungen können andere nicht vergleichbare Ergebnisse liefern. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde ein Experiment mit absichtlich verstimmtem Spektrum durchgeführt. Als Substrat wurde Wolframcarbid verwendet. Der Pulsüberlappungsgrad wurde bei beiden Versuchen auf 89 % festgelegt. Die berechnete Pulsdauer ergibt sich bei dem „normalbreiten Spektrum“ zu ca. 22 fs und bei dem absichtlich dejustierten zu 34 fs. Da es sich hierbei um eine Änderung der Pulsdauer von 12 fs handelt, können nach Auswertung des Experimentes Rückschlüsse auf den Einfluss schwankender spektraler Verbreiterungen und daraus resultierenden schwankenden Pulsdauern (7 fs), gezogen werden.

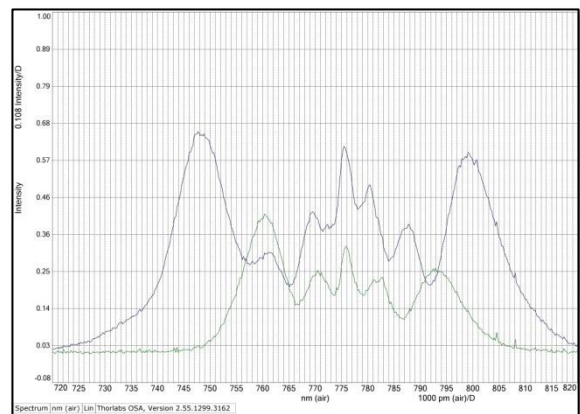


Abbildung 17 : verwendete Spektren im Versuch 12.2.

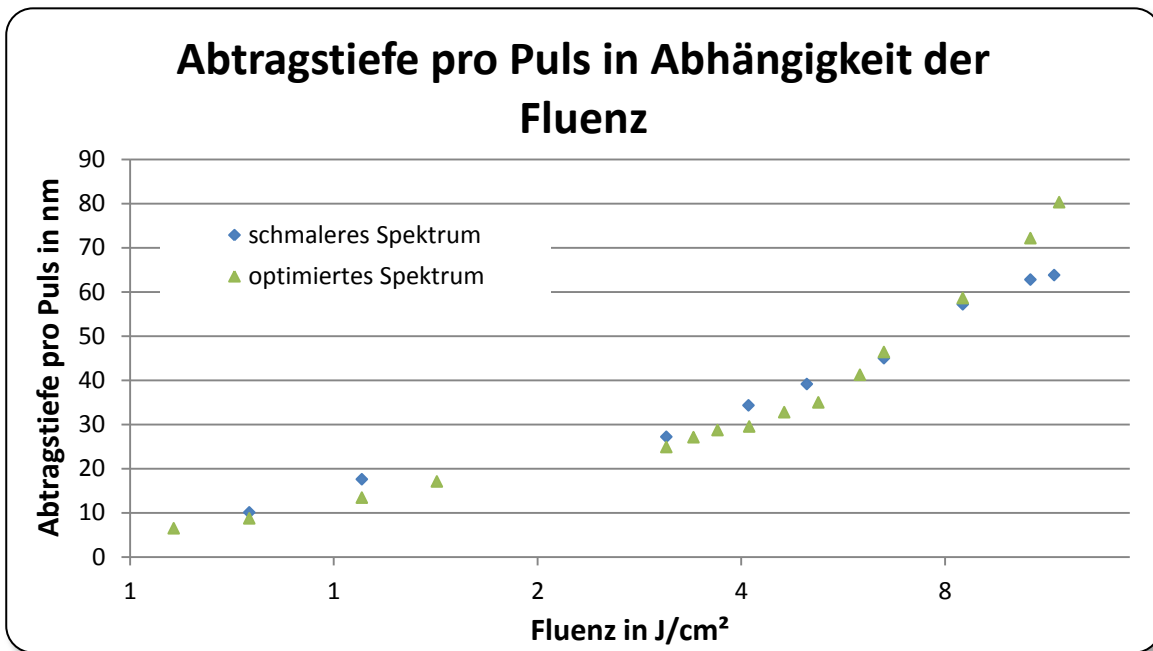


Diagramm 26 : Abtragstiefe pro Puls in Abhängigkeit der Fluenz (Vergleich der Spektren).

Diagramm 26 zeigt den Einfluss einer stark verstellten spektralen Verbreiterung. Es wird erkennbar, dass sich die Abweichungen der Messwerte lediglich im nm Bereich bewegen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass moderate Schwankungen der spektralen Verbreiterung und daraus resultierende geringe Schwankungen der Pulsdauer, keinen signifikanten Einfluss auf die Strukturtiefe aufweisen.

## 12.2 Der Schweif im Strahlprofil

Wie schon erwähnt beschreibt das Strahlprofil eher ein Donut als ein Gaußprofil. Desweiteren wird bei manchen Stellungen der  $\lambda/2$  Platte ein Schweif (Abschnitt 8) erkennbar. Dieser führt ebenso zu Abträgen die sich negativ auf die Strukturen auswirken. Durch die Bearbeitungskamera ist dieser Schweif klar erkennbar. Wenn die  $\lambda/2$  Platte um  $360^\circ$  verdreht wird, kann man das Erscheinen des Schweifs im Strahlprofil viermal in gleichen Abständen beobachten. Dies zeigt, dass der Schweif polarisationsabhängig ist und je nach Stellung der  $\lambda/2$  Platte ein- und auch ausgeblendet werden kann. Dies eröffnet Möglichkeiten zur Unterdrückung dieser Erscheinung, zum Beispiel durch Einsetzen einer weiteren  $\lambda/2$  Platte oder eines Polarisators. Dies muss in weiteren Versuchen untersucht werden. Die Folgenden Bilder, welche den Schweif bei verschiedenen Stellungen der  $\lambda/2$  Platte des zweiten Abschwächers, zeigen, sollen die Aussage der Polarisationsabhängigkeit des Schweifs untermauern.





Bild 78 : Schweiß bei 0°  
Verdrehwinkel.



Bild 79 : Schweiß bei 10°  
Verdrehwinkel.



Bild 80 : Schweiß bei 40°  
Verdrehwinkel.



Bild 81 : Schweiß bei 80°  
Verdrehwinkel.



Bild 82 : Schweiß bei 90°  
Verdrehwinkel.



Bild 83 : Schweiß bei 140°  
Verdrehwinkel.



Bild 84 : Schweiß bei 180°  
Verdrehwinkel.



Bild 85 : Schweiß bei 240°  
Verdrehwinkel.



Bild 86 : Schweiß bei 270°  
Verdrehwinkel.



Bild 87 : Schweiß bei 310°  
Verdrehwinkel.



Bild 88 : Schweiß bei 360°  
Verdrehwinkel.

## 12.3 Instabilität der spektralen Verbreiterung

Ein weiteres Problem zeigt sich in der Instabilität der spektralen Verbreiterung. Vermutet wird, dass es sich hierbei um eine thermische Erscheinung handelt. Zunächst zeigt sich ein Spektrum welches eine gute spektrale Breite aufweist. Nach einiger Zeit fällt das Bearbeitungsspektrums (Abb. 18) auf eine charakteristische Verteilung zusammen (Abb.19) und kann durch nachjustieren nicht kompensiert werden.

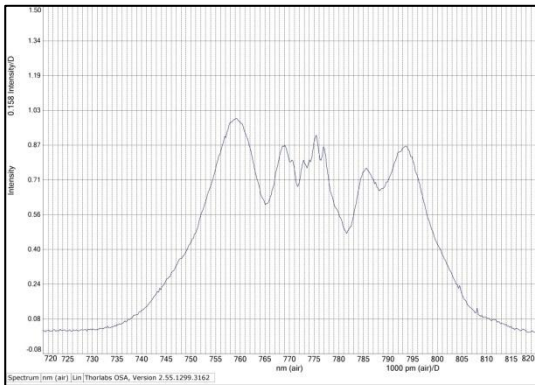


Abbildung 18 : Bearbeitungsspektrum.

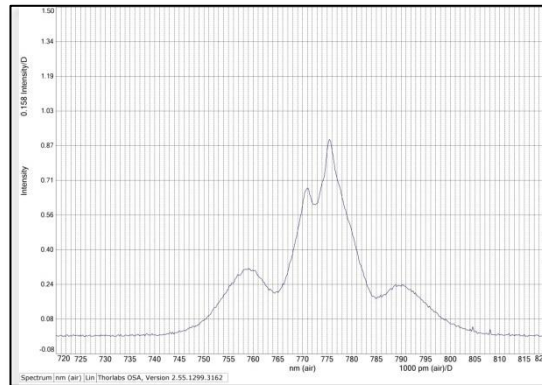


Abbildung 19 : Spektrum nach Zusammenbruch.

In Abbildung 18 und 19 wird die Veränderung des Spektrums deutlich. Man erkennt das sich die Intensitätsverteilung und auch die spektrale Breite drastisch ändert. Zudem ist die Ausgangsbreite des Spektrums, sowie dessen Intensitätsverteilung für das nach Zusammenbruch resultierende Spektrum nur bedingt von Bedeutung. Das in Abbildung 19 dargestellte Spektrum zeigt das charakteristische Erscheinungsbild nach „zusammenbrechen“ eines Bearbeitungsspektrums.

## 13 Ausblick

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die Pulsdauer einen direkten Einfluss auf das Strukturergebnis aufweist. Diese Erscheinungen können positive wie auch negative Auswirkungen auf die Arbeitsaufgabe nach sich ziehen. Demzufolge werden weitere Untersuchungen notwendig um diese Erscheinungen näher zu charakterisieren. Desweiteren muss die Erscheinung, welche bei den Metallen zu beobachten war, dass der Anstieg im 1. Ablationsregime bei 35 fs geringer ist als bei 150 fs, näher untersucht werden. Aber im Vordergrund steht zunächst, die entstandenen Fehlerquellen und deren Einfluss zu minimieren. Unter Zuhilfenahme eines Point to Point Controllers könnte sich die Einkopplung in die Faser und das resultierende Spektrum verbessern. Desweiteren könnte der Schweif im Strahlprofil mit einem Polarisator, welcher in den Strahlengang nach der Faser eingesetzt wird, reduziert bzw. ausgeblendet werden. Zudem könnte man mit einem Autokorrelator mit FROG (Frequency - resolved optical gating) den Puls vermessen, welches Erkenntnisse über zeitliche Pulsform liefert. Diese gemessenen Werte können zum Vergleich mit dem theoretischen Ansatz zur Pulsdauerbestimmung genutzt werden. Da bei Stahl und Wolframcarbid, entgegen der Erwartung, der Anstieg im ersten Ablationsregime geringer war als bei längeren Pulsdauern, werden hier weitere Untersuchungen notwendig. Sobald die Stabilität des Systems verbessert und der im Strahlprofil enthaltene Schweif ausgeblendet wurde, könnte man Einzelpulse nutzen, um diese Grundlagenuntersuchung voranzutreiben. Um einen größeren Fluenzbereich abzudecken könnten Versuche mit einem Objektiv, welches eine geringere Brennweite aufweist, z.B. mithilfe des 32 mm Objektivs, durchgeführt werden. Um im Fluenzbereich eine feinere Abstufung zu realisieren sollten mehrere natürliche Filter zum Einsatz kommen.



## Literaturverzeichnis

- [1] **Thomas Metzger, Karl Schmid, Jens Rauschenberger, Andrius Baltuska, Alexander Apolonski, Ferenc Krausz.** Ultrakurze Laserpulse. *Laser Journal*. Nr. 4, S. 1–7 (2005).
- [2] **Sauer, Franziska Nele Barbara.** *Wellenpaketdynamik in Alkali-Dimeren*. Berlin : Freie Universität Berlin. S. 17 (2007), Dissertation.
- [3] **Nolte, Stefan, et al.** Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen. *Physik Journal*. Bd. 55, 6, S. 41–44 (1999).
- [4] Dispersionskompensation. [Online]  
<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Dispersionskompensation-dispersion-compensation.html>.  
  
verfügbar am 20.3.15
- [5] **Grüttner, Hagen.** persönliche Erläuterungen
- [6] **Grüttner, Hagen.** *Femtosekundenlasergestützte Erzeugung von selbstorganisierenden Oberflächenstrukturen*. Mittweida : Hochschule Mittweida. S. 111 (2008).
- [7] **Jung, Gerald.** persönliche Erläuterungen
- [8] **Rudolph, Pascale.** *Physikalische Chemie der Laser-Material-Wechselwirkung mit Ba-Al-Borosilikatglas, AlN, SiC, SiC-TiC-TiB<sub>2</sub>*. Berlin : Freie Universität Berlin. S. 12 (2002), Dissertation.
- [9] **Rebollar, Esther, et al.** Microstructuring of soft organic matter by temporally shaped femtosecond laser pulses. *Applied Surface Science*. Bd. 302, S. 231–235 (2014).
- [10] **Liao, Yang, et al.** Alignment of liquid crystal molecules in a micro-cell fabricated by femtosecond laser. *Chemical Physics Letters*. 2010, Bd. 498, 1-3, S. 188–191 (2010).
- [11] **Qiao, Lingling, et al.** Fabrication of a micro-optical lens using femtosecond laser 3D micromachining for two-photon imaging of bio-tissues. *Optics Communications*. Bd. 284, 12, S. 2988–2991 (2011).

[12] **Grüttner, Hagen.** *Femtosekundenlaser Mikrostrukturierung von Metallen.* Mittweida : Hochschule Mittweida, S. 125 (2009).

[13] **Moos, Gunnar.** *Zur Dynamik niederenergetischer Elektronen in metallischen Festkörpern.* Berlin : Freie Universität Berlin. S. 14 (2003), Dissertation.

[14] *Modell und theoretische Grundlagen.* S. 16.

[http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS\\_derivate\\_000000000528/02\\_kap2.pdf;jsessionid=3FFBD10932CA507BF8A71C2505AB9DEA?hosts=](http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000000528/02_kap2.pdf;jsessionid=3FFBD10932CA507BF8A71C2505AB9DEA?hosts=)

verfügbar am 20.3.15

[15] **Markus Olbrich.** Simulation von Abtragsprozessen.

[16] **Wolf, Marcel.** *Femtosekundenlaser - Mikrobearbeitung von Metallen.* Mittweida : Hochschule Mittweida (2015).

[17] **Jürgen Eichler, Hans Joachim Eichler.** *Eichler, Eichler - Laser.* 7. Auflage. s.l. : Springer, S. 487 (2010).

[18] *Eigenschaften von dem verwendeten Thyrodur 2990 Substrat,*

Datenblatt Stahl Thyrodur 2990 der Firma Schmolz und Birkenbach

[http://www.schmolz-bickenbach.co.za/fileadmin/user\\_upload/\\_SCHULUNG\\_/Sudafrika/Data\\_Sheets/Coldwork\\_Steel/thyrodur\\_2990.pdf](http://www.schmolz-bickenbach.co.za/fileadmin/user_upload/_SCHULUNG_/Sudafrika/Data_Sheets/Coldwork_Steel/thyrodur_2990.pdf)

verfügbar am 17.9.2015

[19] *Eigenschaften von dem verwendeten Wolframcarbid Substrat*

Datenblatt Wolframcarbid der Firma AKS-Hartmetalle

[20] *Eigenschaften von Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade*

Datenblatt Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard Grade der Firma Corning

[21] *Eigenschaften von dem verwendeten PMMA Substrat*

[http://www.acrylglastechnik.at/Datenblatt/Db\\_PMMA.pdf](http://www.acrylglastechnik.at/Datenblatt/Db_PMMA.pdf)

verfügbar am 17.9.15





## Anlagen

Messwerte für Stahl .....	A-III
Messwerte für Wolframcarbid .....	A-V
Messwerte für Quarzglas.....	A-IX
Messwerte für PMMA.....	A-XIII



# Anlagen, Messwerte für Stahl

Messwerte für Stahl bei 35 fs

**Tabelle 5 : Tiefenmesswerte Stahl im Versuch 11.1.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	10	5
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
10,01	13	33,1
8,96	13	26,3
8,04	10,6	26
7,22	9,92	24,5
6,86	8,94	23
6,54	7,64	22,8
6,30	6,71	17,8
6,00	6,04	16,8
5,44	5,33	16,3
4,99	5,12	16,6
4,43	5,23	15,5
4,03	5,27	19,7
3,53	4,85	19
3,02	4,61	16,5
2,52	4,21	14,8
2,08	3,61	14,1
1,48	2,75	11,7
1,09	2,74	11,5
0,80	2,45	9,71
0,49	1,49	5,57

**Tabelle 6 : Rauheitsmesswerte Stahl im Versuch 11.1.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	10	5
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
10,01	3,60	3,55
8,96	2,66	2,30
8,04	2,37	2,73
7,22	2,20	2,40
6,86	2,02	2,48
6,54	1,91	2,63
6,30	1,45	1,79
6,00	1,10	1,45
5,44	0,57	1,73
4,99	0,45	1,96
4,43	0,55	2,21
4,03	0,39	3,64
3,53	0,39	3,45
3,02	0,52	2,62
2,52	0,39	2,14
2,08	0,51	0,98
1,48	0,36	0,68
1,09	0,62	0,66
0,80	0,57	0,67
0,49	0,54	0,61

	große Messwertschwankung	Messwert entfällt
--	--------------------------	-------------------

	Spektrum zusammengebrochen	Messwert entfällt
--	----------------------------	-------------------

**Tabelle 7 : Rauheitsmesswerte Stahl im Versuch 11.1.2.**

Puls zu Puls Distanz [ $\mu\text{m}$ ]	Pulsüberlappungsgrad [%]	Tiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]
5	92	-	-
10	83	4,15	1,22
15	75	2,00	1,19
20	67	1,54	1,25
25	59	1,79	1,25
30	51	2,27	1,20

**Tabelle 8 : Rauheitsmesswerte Stahl im Versuch 11.1.3.**

Anzahl der Überfahrten	Tiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]
4	3,30	0,39
8	6,04	0,61
12	13,20	1,92
16	15,30	2,21
20	16,50	3,52
24	16,50	2,63
24	18,90	3,24
28	21,70	3,73
32	21,90	3,39

## Anlagen, Messwerte für Wolframcarbid

Messwerte für Wolframcarbid bei 35 fs

**Tabelle 9 : Tiefenmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	5	10
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
16,00	37,80	9,82
14,90	35,00	8,99
13,80	32,50	7,49
12,80	22,30	5,91
11,80	29,60	7,54
10,70	26,60	6,61
9,60	13,30	3,32
8,50	21,60	5,42
7,10	14,60	2,79
6,50	17,10	4,28
5,99	15,20	3,77
5,20	17,30	4,57
4,63	16,20	4,21
4,11	14,60	3,79
3,69	14,20	3,63
3,40	13,40	3,36
3,10	12,30	3,15
1,42	8,45	2,42
1,10	6,64	2,00
0,75	4,32	1,96
0,58	3,21	1,10

**Tabelle 10 : Rauheitsmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	5	10
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
16,00	1,79	1,00
14,90	1,59	0,91
13,80	1,60	0,89
12,80	1,32	0,78
11,80	1,41	0,87
10,70	1,25	0,81
9,60	1,46	0,62
8,50	1,17	0,77
7,10	1,11	0,48
6,50	1,01	0,69
5,99	0,98	0,64
5,20	0,97	0,72
4,63	0,94	0,61
4,11	0,87	0,53
3,69	0,87	0,52
3,40	0,76	0,44
3,10	0,73	0,40
1,42	0,66	0,63
1,10	0,66	0,52
0,75	0,58	0,51
0,58	0,56	0,40



**Tabelle 11 : Tiefenmesswerte Wolframcarbid verstimmtes Spektrum im Versuch 12.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	5	10
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
11,60	25,10	6,58
10,70	24,70	6,36
8,50	22,50	5,69
6,50	17,70	4,61
5,00	15,40	3,98
4,10	13,50	3,49
3,10	10,70	2,82
1,10	6,92	2,08
0,75	3,97	1,16

**Tabelle 12 : Rauheitsmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.2.**

Puls zu Puls Distanz [ $\mu\text{m}$ ]	Pulsüberlappungsgrad [%]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]
10	81	0,64
15	72	0,63
20	62	0,52
25	54	0,51
30	45	0,48

**Tabelle 13 : Rauheitsmesswerte Wolframcarbid im Versuch 11.2.3.**

Anzahl der Überfahrten	Tiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]
4	2,61	0,416
12	7,71	0,594
24	15,7	0,498
32	20,6	0,551
48	32	0,401





## Anlagen, Messwerte Quarzglas

Messwerte für Quarzglas bei 35 fs

**Tabelle 14 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.**

Puls zu Puls Abstand 5 µm						
Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Gesamttiefe der Struktur [A]				Mittelwert [A]	Mittelwert [µm]
6,62	-	-	-	-	-	-
6,23	-	-	-	-	-	-
5,93	-	-	-	-	-	-
5,48	-	-	-	-	-	-
5,14	1171127	1162368	1177905	1148941	1165085,25	116,51
4,78	1087055	1086751	1094946	1070068	1084705,00	108,47
4,54	1051902	1053599	1060698	1053182	1054845,25	105,48
4,11	969518	979209	990008	969494	977057,25	97,71
3,81	901355	892808	902421	885041	895406,25	89,54
3,45	802629	798265	800091	803439	801106,00	80,11
3,09	703881	702980	713669	709154	707421,00	70,74
2,78	595264	587660	590018	592294	591309,00	59,13
2,42	511003	489442	491413	509538	500349,00	50,03
2,15	313797	321118	324750	322093	320439,50	32,04

**Tabelle 15 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.**

Puls zu Puls Abstand 10 µm						
Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Gesamttiefe der Struktur [A]				Mittelwert [A]	Mittelwert [µm]
6,62	360764	364559	349818	359459	358650,00	35,87
6,23	331420	352091	339251	339205	340491,75	34,05
5,93	317621	328330	323289	316630	321467,50	32,15
5,48	301195	312873	299748	304720	304634,00	30,46
5,14	283410	290528	287134	287196	287067,00	28,71
4,78	266707	263606	267336	264725	265593,50	26,56
4,54	260718	258351	263182	256425	259669,00	25,97
4,11	238291	235054	241525	234414	237321,00	23,73
3,81	218398	213172	211362	211268	213550,00	21,36
3,45	187440	187038	189818	187387	187920,75	18,79
3,09	168976	166980	166444	168455	167713,75	16,77
2,78	132813	131460	131173	128436	130970,50	13,10
2,42	56661	48111	54820	52446	53009,50	5,30
2,15	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 16 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.**

Puls zu Plus Abstand 5 µm						
Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Ra [A]				Mittelwert [A]	Mittelwert [µm]
6,62	-	-	-	-	-	-
6,23	-	-	-	-	-	-
5,93	-	-	-	-	-	-
5,48	-	-	-	-	-	-
5,14	3589	6363	3679	5746	4844,25	0,48
4,78	5337	8627	5267	6079	6327,50	0,63
4,54	3605	7887	3945	5003	5110,00	0,51
4,11	4931	9747	5894	7652	7056,00	0,71
3,81	4295	4527	6026	5512	5090,00	0,51
3,45	4589	5915	4362	7202	5517,00	0,55
3,09	6207	6773	6309	5310	6149,75	0,61
2,78	4119	6254	2566	4611	4387,50	0,44
2,42	2849	5369	6975	6865	5514,50	0,55
2,15	3532	7338	4798	5115	5195,75	0,52

**Tabelle 17 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.**

Puls zu Puls Abstand 10 µm						
Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Ra [A]				Mittelwert [A]	Mittelwert [µm]
6,62	4433	2954	4869	4640	4224,00	0,42
6,23	3086	4189	5106	4432	4203,25	0,42
5,93	4413	2345	4147	3395	3575,00	0,36
5,48	5477	1942	4738	2818	3743,75	0,37
5,14	3319	3794	3704	2894	3427,75	0,34
4,78	3348	2872	2572	2468	2815,00	0,28
4,54	2141	2557	2867	3031	2649,00	0,26
4,11	3254	2568	2349	2420	2647,75	0,26
3,81	3168	2732	1820	2572	2573,00	0,26
3,45	2750	2187	2747	2427	2527,75	0,25
3,09	2595	2606	2788	2032	2505,25	0,25
2,78	4030	2415	4801	3525	3692,75	0,37
2,42	10165	9940	8204	6309	8654,50	0,87

Messwerte für Quarzglas bei 150 fs

**Tabelle 18 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.**

Puls zu Puls Abstand 5 $\mu\text{m}$						
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [A]				Mittelwert	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]
20,50	-	-	-	-	-	-
17,70	1073241	1080319	1080201	1077673	1077858,50	107,79
15,00	957149	964798	982136	965636	967429,75	96,74
12,50	849039	859040	874696	858107	860220,50	86,02
10,10	761133	765652	767863	757456	763026,00	76,30
9,10	705237	710224	726148	703612	711305,25	71,13
8,10	655139	665105	661293	661225	660690,50	66,07
7,20	607238	609889	618664	609992	611445,75	61,14
6,30	560110	566170	566881	554708	561967,25	56,20
4,80	346532	337983	332457	339867	339209,75	33,92
4,00	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 19 : Tiefenmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.1.**

Puls zu Puls Abstand 10 $\mu\text{m}$						
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [A]				Mittelwert	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]
20,50	295903	296613	298588	294131	296308,75	29,63
17,70	269281	269089	273897	270318	270646,25	27,06
15,00	240365	235083	245425	237356	239557,25	23,96
12,50	216677	214767	217540	219888	217218,00	21,72
10,10	190673	194471	192403	194872	193104,75	19,31
9,10	177350	182958	181456	180851	180653,75	18,07
8,10	166102	167525	167894	170785	168076,50	16,81
7,20	134871	131655	139159	136614	135574,75	13,56
6,30	101286	100771	103924	103358	102334,75	10,23
4,80	-	-	-	-	-	-
4,00	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 20 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.2.**

Puls zu Puls Distanz [ $\mu\text{m}$ ]	Pulsüberlappungsgrad [%]	mittlere Rauheit der Struktur [A]				Mittelwert [A]	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]
10	83	2956	3093	1686	2436	2542,8	0,25
15	75	1681	1968	1751	2037	1859,3	0,19
20	67	1898	2294	2858	1853	2225,8	0,22
25	59	2571	1942	3031	2351	2473,8	0,25
30	51	1153	1586	1782	1482	1500,8	0,15

**Tabelle 21 : Rauheitsmesswerte Quarzglas im Versuch 11.3.3.**

Anzahl der Überfahrten	mittlere Rauheit der Struktur [A]				Mittelwert [A]	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]
4	3240	2641	5014	4704	3899,75	0,39
4	2580	2433	2947	2247	2551,75	0,26
8	2499	2459	4217	3143	3079,50	0,31
12	5185	4579	3172	2600	3884,00	0,39
16	3563	4268	5391	4832	4513,50	0,45
20	4843	3540	4146	4622	4287,75	0,43
24	7392	5707	2956	4004	5014,75	0,50
28	2732	4954	4421	4560	4166,75	0,42
28	4028	4045	2897	3896	3716,50	0,37

## Anlage, Messwerte PMMA

Messwerte für PMMA bei 35 fs

**Tabelle 22 : Tiefenmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	5	10
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
12,43	1140	249
11,93	862	249
11,05	810	225
10,04	794	211
9,23	732	215
8,47	725	200
7,60	652	186
6,78	581	170
5,96	522	168
5,15	430	136
4,30	416	172
3,40	322	112
2,50	219	67

**Tabelle 23 : Rauheitsmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	5	10
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Flächenrauheit [ $\mu\text{m}$ ]	
12,43	44,40	2,87
11,93	25,90	3,24
11,05	24,90	2,57
10,04	17,10	2,44
9,23	14,20	2,69
8,47	11,70	2,60
7,60	10,90	2,30
6,78	8,22	2,63
5,96	9,45	3,90
5,15	5,82	2,22
4,30	7,80	2,40
3,40	4,42	1,77
2,50	2,57	1,71

**Tabelle 24 : Tiefenmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	15	20
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamttiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
12,0	97,3	53,9
10,9	88,7	48,0
10,0	83,3	45,9
9,0	76,7	40,8
8,0	69,0	38,3
6,8	61,2	33,5
6,0	54,6	30,5
5,0	48,8	26,8
4,0	40,8	22,9
3,0	32,5	14,1
2,6	31,6	21,7
4,0	43,2	23,6
3,0	32,3	18,0
2,6	28,2	16,1
1,0	14,0	-
0,5	-	-

Messwerte für PMMA bei 150 fs

**Tabelle 25 : Tiefenmesswerte PMMA im Versuch 11.4.1.**

Puls zu Puls Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	5	10
Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Gesamtiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	
20,46	384,0	116,0
18,76	360,0	109,0
17,21	339,0	102,0
15,66	314,0	97,4
14,26	295,0	92,0
12,71	273,0	85,0
11,47	250,0	78,6
10,23	230,0	72,4
8,99	206,0	65,3
7,91	188,0	58,8
6,82	166,0	52,0
6,05	147,0	45,6
4,96	127,0	38,7
4,03	108,0	32,8
3,41	89,4	27,0
2,64	72,1	-
2,02	55,9	-
1,55	30,6	-
1,09	-	-

**Tabelle 26 : Rauheitsmesswerte PMMA im Versuch 11.4.2.**

Puls zu Puls Distanz [ $\mu\text{m}$ ]	Pulsüberlappungsgrad [%]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]
10	81	1,90
15	72	1,91
20	62	2,01
25	54	1,92
30	45	2,01

**Tabelle 27 : Rauheitsmesswerte PMMA im Versuch 11.4.3.**

Anzahl der Schichten	Tiefe der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]	Flächenrauheit der Struktur [ $\mu\text{m}$ ]
4	92,70	2,10
8	185,00	2,06
12	276,00	2,05
16	368,00	2,40
20	461,00	1,94
24	555,00	2,10







## **Selbstständigkeitserklärung**

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

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

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

Mittweida, den 14.10.2015

Marcel Wolf