



---

# Bachelorarbeit

---

Herr  
Eric Syrbe

**Herstellung von ebenen,  
definiert geneigten  
Spiegelflächen für  
mikrooptische Anwendung in  
Borosilikatglas mittels  
Fluorlasermikrostrukturierung**

Mittweida, 2019

Fakultät Ingenieurwissenschaften

---

## **Bachelorarbeit**

---

# **Herstellung von ebenen, definiert geneigten Spiegelflächen für mikrooptische Anwendung in Borosilikatglas mittels Fluorlasermikrostrukturierung**

Autor:  
**Herr**

**Eric Syrbe**

Studiengang:  
**Lasertechnik**

Seminargruppe:  
**LT16w1-B**

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

Zweitprüfer:  
**Michael Pfeifer, M.Sc.**

Einreichung:  
**Mittweida, 30.09.2019**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2019**

# **Bachelorthesis**

---

## **Fabrication of Plane Mirror Surfaces with a Defined Inclination for Micro-Optical Applications in Borosilicate Glass by means of Fluorine Laser Microstructuring**

author:

**Mr.**

**Eric Syrbe**

course of studies:

**Laser Technology**

seminar group:

**LT16w1-B**

first examiner:

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

second examiner:

**Michael Pfeifer, M.Sc.**

submission:

**Mittweida, 30.09.2019**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2019**

## **Bibliografische Beschreibung**

Syrbe, Eric:

Herstellung von ebenen, definiert geneigten Spiegelflächen für mikrooptische Anwendung in Borosilikatglas mittels Fluorlasermikrostrukturierung - 2019. - XIV, 49, xvi S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2019

## **Referat**

In dieser Arbeit wird die Herstellung definiert geneigter Spiegelflächen für mikrooptische Anwendungen mittels Fluorlasermikrostrukturierung im Maskenprojektionsverfahren vorgestellt. Im Rahmen dessen wurde die zuvor entwickelte Bewegungseinrichtung, die eine Verschiebung der Masken in Nanometerbereich ermöglicht, optimiert. Durch Variation dieser Maskenverschiebung zwischen zwei Abträgen sowie der Laserpulsfluenz kann der Neigungswinkel der Spiegelfläche frei eingestellt werden. Bedingt durch die Intensitätsverteilung im Laserstrahl ergibt sich eine Ebenheitsabweichung der Struktur, für die ein Korrekturalgorithmus vorgestellt wird. Abhängig vom Soll-Neigungswinkel weisen die Spiegelflächen eine Winkelabweichung von  $\pm 0,5^\circ$  und eine Oberflächenrauheit im Bereich weniger Nanometer auf.

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei allen denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt Prof. Dr. Steffen Weißmantel und meinem Betreuer Herrn Michael Pfeifer, die mir die Mittel für die Anfertigung dieser Arbeit bereitstellten und mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Weiterhin bedanke ich mich bei Sebastian Büttner für die vielen hilfreichen Anregungen und Ratschläge sowie bei den Mitarbeitern des Laserinstituts für ihre Unterstützung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>Größen und Formelzeichen .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik .....	2
1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise .....	5
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>6</b>
2.1 Laseranlage .....	6
2.1.1 Fluorlaser .....	6
2.1.2 Strahlführung und -formung.....	7
2.1.3 Anlagentechnik.....	10
2.2 Lasermikrostrukturierung.....	11
2.2.1 Maskenprojektionsverfahren .....	11
2.2.2 Herstellung von Spiegelflächen .....	12
<b>3. Material und Methoden .....</b>	<b>13</b>
3.1 Borosilikatglas D263T .....	13
3.2 Strukturierungsmethode .....	14
3.3 Maskenbewegungseinrichtung .....	15
3.4 Projektionsmasken.....	19
<b>4. Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>20</b>
4.1 Charakterisierung der Bewegungseinrichtung .....	20
4.1.1 Vermessung des Abtrags .....	20
4.1.2 Prozessparameter .....	21
4.1.3 Abhängigkeit der Abtragsbreite von der Verfahrrichtung der B-Achse .....	22
4.1.4 Laserpulsfluenzabhängigkeit der Abtragsbreite .....	23
4.1.5 Positioniergenauigkeit der dynamischen Maske .....	24
4.1.6 Erhöhung der Genauigkeit .....	25
4.2 Optimierung der Bewegungseinrichtung.....	27
4.3 Optimierung des Strukturierungsprozesses.....	31
4.4 Auswertung der Flächen mittels MATLAB-Programm.....	32
4.5 Parameterstudie.....	35
4.6 Untersuchung einer als Umlenkspiegel geeigneten Fläche .....	41
4.7 Ebenheitskorrektur der strukturierten Fläche .....	42

Inhaltsverzeichnis	VII
4.8 Herstellung von Flächen mit definierter Neigung .....	46
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>49</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>iii</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>xvi</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Fluorlaser .....	6
Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Strahlformung und -führung [Ber09].....	7
Abb. 2.3 Schematischer Aufbau des Abschwächers [Ber09].....	8
Abb. 2.4 Transmissionsgrad des Abschwächers [Häh06] .....	8
Abb. 2.5 Funktionsweise des Beamcombiners (links) und Laserstrahlprofil vor und nach dem Beamcombiner (rechts) [Mic05].....	8
Abb. 2.6 Objektiv mit Schutzgasdüse, Triangulationssensor, Leistungsmesskopf und Bearbeitungstisch.....	9
Abb. 2.7 Abtrag mittels Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück (links) oder Maskenprojektion mit homogener Bestrahlung (rechts) [Hüg09] .....	11
Abb. 2.8 Schematische Darstellung des „mask dragging“-Verfahrens mit Dreiecksmasken [Pfe11].....	12
Abb. 2.9 Schematische Darstellung der Spiegelfläche, strukturiert mit der vorgestellten Bewegungseinrichtung .....	12
Abb. 3.1 Spektraler Transmissionsgrad von D263T [Sch05] .....	13
Abb. 3.2 Abtragsrate pro Puls bei $f_p = 200$ Hz in D263T [Ber09].....	13
Abb. 3.3 Schematische Darstellung der Maskenanordnung.....	14
Abb. 3.4 Bewegungseinrichtung .....	16
Abb. 3.5 Schnitt durch die Bewegungseinrichtung im Konstruktionsprogramm .....	17
Abb. 3.6 Dreipunktgelagerte statische Maske in Haltevorrichtung (transparent).....	17
Abb. 3.7 Projektionsmasken in den jeweiligen Haltevorrichtungen und eingebrachte Positionierstifte im Halter der dynamischen Maske.....	18
Abb. 3.8 Statische Maske; horizontal 2,665 mm, vertikal 2,661 mm.....	19
Abb. 3.9 Dynamische Maske; horizontal 2,665 mm, vertikal 3,004 mm.....	19
Abb. 4.1 Laserscanning-Aufnahme eines Abtrags mit den Positionen der Profilschnitte (links), Profilschnitt zur Messung der Abtragsbreite entlang der Linie 7 (rechts) und die Längen der jeweiligen Profilschnitte im Datenblatt ( $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ , $b_{\text{theo}} = 70 \text{ }\mu\text{m}$ ) .....	20
Abb. 4.2 Parameterfeld der Einzelabträge .....	21
Abb. 4.3 Abhängigkeit der gemessenen Abtragsbreite von der Verfahrrichtung der B-Achse bei $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ .....	22
Abb. 4.4 Abhängigkeit der gemessenen Abtragsbreite in Abhängigkeit von der theoretischen Abtragsbreite und der Laserpulsfluenz .....	23
Abb. 4.5 Abweichung der gemessenen Abtragsbreiten vom theoretischen Wert bei unterschiedlichen Laserpulsfluenzen .....	24
Abb. 4.6 Positioniergenauigkeit von Einzelpulsabtrag und Abtrag mit 10 Pulsen .....	25
Abb. 4.7 Änderung der Abtragsbreiten von Einzelpulsabtrag und Abtrag mit 10 Pulsen.....	25
Abb. 4.8 Vergleich der Abweichungen mit Pausenzeiten .....	26
Abb. 4.9 Vergleich der Abweichungen bei unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten der y-Achse .....	26



Abb. 4.10 Abtrag mit eingezeichneten Profilschnitten ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ , $b_{\text{theo}} = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ).....	27
Abb. 4.11 Statische Maske; horizontal 1,331 mm, vertikal 1,331 mm.....	29
Abb. 4.12 Dynamische Maske; horizontal 3,509 mm, vertikal 3,505 mm.....	29
Abb. 4.13 Justageeinheit am Träger der dynamischen Maske und geänderte dynamische Maske.....	30
Abb. 4.14 Abtrag mit eingezeichneten Profilschnitten nach Einbau der Justageeinheit .....	30
Abb. 4.15 Falschfarbendarstellung eines Abtrags ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 300 \text{ nm}$ ); 0,5 s Pause nach Verfahren der z-Achse; .....	31
Abb. 4.16 Falschfarbendarstellung eines Abtrags ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 300 \text{ nm}$ ); ohne Pause nach Verfahren der z-Achse; .....	31
Abb. 4.17 Abtrag mit selektiertem Messbereich und Abb. 4.18 Seitliche Ansicht des Abtrags, Flächenneigungswinkel $\gamma = 6,7^\circ$ .....	33
Abb. 4.19 Rotierte Fläche .....	33
Abb. 4.20 Rauheitsprofile; $S_q = 2,1 \text{ nm}$ bei $\lambda_c = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ ; $S_q = 12,9 \text{ nm}$ bei $\lambda_c = 8 \text{ }\mu\text{m}$ ; $S_q = 22 \text{ nm}$ bei $\lambda_c = 25 \text{ }\mu\text{m}$ .....	35
Abb. 4.21 Abtrag pro Puls in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz und der Repetitionsrate .....	35
Abb. 4.22 Repetitionsrate in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung.....	36
Abb. 4.23 Falschfarbendarstellung (links) und REM-Aufnahme (rechts) eines Abtrags mit $h = 36 \text{ }\mu\text{m}$ ( $H = 2,25 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta x = 50 \text{ nm}$ ).....	37
Abb. 4.24 Falschfarbendarstellung (links) und REM-Aufnahme (rechts) eines Abtrags mit $h = 36 \text{ }\mu\text{m}$ ( $H = 2,25 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta x = 100 \text{ nm}$ ).....	37
Abb. 4.25 Flächenneigungswinkel $\gamma$ in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung und der Laserpulsfluenz .....	38
Abb. 4.26 Vergleich der theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel bei $H = 2 \text{ J/cm}^2$ .....	39
Abb. 4.27 Vergleich der theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel bei $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ .....	39
Abb. 4.28 Oberflächenrauheit $S_q$ in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung, der Laserpulsfluenz und der Grenzwellenlänge .....	40
Abb. 4.29 REM-Aufnahmen eines Abtrags mit $h = 30 \text{ }\mu\text{m}$ und $\gamma = 38^\circ$ ( $H = 2,75 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 200 \text{ nm}$ ), $S_q = 18 \text{ nm}$ bei $\lambda_c = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ .....	41
Abb. 4.30 Falschfarbendarstellung eines Abtrags ( $h = 10 \text{ }\mu\text{m}$ , $\Delta b = 0$ ) mit eingezeichnetem Profilschnitt.....	42
Abb. 4.31 Profilschnitt durch Struktur mit $\Delta b = 0$ .....	42
Abb. 4.32 Bestimmung der Korrekturfunktion aus den b-Werten des realen Profils ( $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 800 \text{ nm}$ ) und des Soll-Profiles .....	43
Abb. 4.33 Rotierte Fläche ohne Korrektur ( $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 800 \text{ nm}$ ), $S_q = 2 \text{ nm}$ bei $\lambda_c = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ .....	44
Abb. 4.34 Rotierte Fläche mit Korrektur ( $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 800 \text{ nm}$ ), $S_q = 0,5 \text{ nm}$ bei $\lambda_c = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ .....	44
Abb. 4.35 In l-Richtung gemitteltes b-Profil ohne (links) und mit Korrekturfunktion (rechts)..	45
Abb. 4.36 In b-Richtung gemitteltes l-Profil ohne (links) und mit Korrekturfunktion (rechts)..	45

Abb. 4.37 In I-Richtung gemittelttes b-Profil von Fläche Nr. 5 bei Soll-Neigungswinkel $\gamma = 34,7^\circ$ .....	47
Abb. 4.38 In I-Richtung gemittelttes b-Profil von Fläche Nr. 2 bei Soll-Neigungswinkel $\gamma = 45^\circ$ .....	48

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Parameter der Achspositioniersystems [Mic05].....	10
Tab. 4.1 Ergebnisse der Herstellung von Flächen mit definierter Neigung .....	46

## Abkürzungsverzeichnis

Außer den hier aufgeführten Abkürzungen, werden nur gängige Abkürzungen des deutschen Sprachgebrauchs, wie sie im Duden zu finden sind, verwendet.

CaF <sub>2</sub>	Chemisches Symbol für Kalziumfluorid
EGY-NGR-Mode	Energiestabilerter Modus ohne Gasaustausch (eng. Energy-constant no-gas-replacement mode)
EGY-PGR-Mode	Energiestabilerter Modus mit partiellem Gasaustausch (eng. Energy-constant partial-gas-replacement mode)
F <sub>2</sub>	Chemisches Symbol für das Fluormolekül
HV	Hochspannung (engl. high voltage)
HV-Mode	Hochspannungsmodus (engl. high voltage mode)
REM	Rasterelektronenmikroskop

## Größen und Formelzeichen

A	Fläche
b	Breite
$b_{\text{Abst}}$	Abstand von der Mitte (Maximum) der Gewichtsfunktion in b-Richtung
$b_{\text{max}}$	Größter b-Wert des selektierten Messbereichs
$b_{\text{mess}}$	Gemessene Breite
$b_{\text{min}}$	Kleinster b-Wert des selektierten Messbereichs
$b_{\text{theo}}$	Theoretische Abtragsbreite
$\Delta B$	Maskenverschiebung
$\Delta b$	Abtragsverschiebung
$\Delta b_{\text{korr}}$	Mittels Korrekturfunktion berechnete Abtragsverschiebung
$E_{\text{Phot}}$	Photonenenergie
$E_{\text{Puls}}$	Maximale Pulsenergie
$f_P$	Repetitionsrate
H	Laserpulsfluenz
$H_S$	Schwellfluenz
h	Strukturtiefe
$h_P$	Abtragstiefe pro Laserpuls
K	Korrekturwert
$K_{\text{alt}}$	Zuletzt verwendeter Korrekturwert
$K_{\text{neu}}$	Korrekturwert für die nächste Abtragsposition
$L_c$	Abschneideindex der Gewichtsfunktion
l	Länge
$l_{\text{Abst}}$	Abstand von der Mitte (Maximum) der Gewichtsfunktion in l-Richtung
$l_{\text{max}}$	Größter l-Wert des selektierten Messbereichs
$l_{\text{min}}$	Kleinster l-Wert des selektierten Messbereichs
$R^2$	Bestimmtheitsmaß

---

$R_z$	Gemittelte Rautiefe
$S_q$	Quadratisch gemittelte Oberflächenrauheit
$s(x,y)$	Gauß-Gewichtsfunktion
$v_B$	Verfahrgeschwindigkeit der B-Achse
$v_y$	Verfahrgeschwindigkeit der y-Achse
$z$	Höhenmesspunkt der realen Oberfläche (Primärprofil)
$z_{\max}$	Abstand zwischen dem größten und kleinsten z-Wert
$z_{\text{Rau}}$	Höhenmesspunkt des Rauheitsprofils
$z_{\text{Well}}$	Höhenmesspunkt des Welligkeitsprofils
$\alpha$	Absorptionskoeffizient
$\beta$	Abbildungsmaßstab
$\varepsilon$	Konstante, um die 50 % Übertragungseigenschaft bei der Grenzwellenlänge $\lambda_c$ zur Verfügung zu stellen
$\gamma$	Flächenneigungswinkel
$\gamma_{\text{Soll}}$	Soll-Flächenneigungswinkel
$\gamma_M$	Maskenverdrehwinkel
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_c$	Grenzwellenlänge, cut-off-Wellenlänge
$\tau$	Pulsdauer

## 1. Einleitung

Der Fortschritt der Technik stellt die konventionellen Fertigungsverfahren vor immer neue Herausforderungen. Dabei bezieht sich die damit einhergehende Bauteilminiaturisierung nicht nur auf das Gebiet der Elektronik, sondern zunehmend auch auf optische Systeme. Antrieb hierfür ist unter anderem die Rechen- und Kommunikationstechnik, denn die Datenübertragung via klassischem Kupferkabel ist hinsichtlich ihrer Menge begrenzt und wird umso stör anfälliger, je größer die übertragene Datenmenge pro Sekunde wird. Einen Ausweg bieten die Lichtwellenleiter, die unempfindlich gegen die Beeinflussung durch elektromagnetische Störfelder sind und nur eine geringe Signaldämpfung aufweisen, sodass Signale auch über große Strecken fast ohne Verluste und fehlerfrei übertragen werden können. Die Datenübertragung basiert hierbei auf einem Sender, der ein elektrisches Signal in ein optisches umwandelt, und einem Empfänger, der das Signal rücktransformiert. Für die Nutzung dieser Technik im Bereich der hochintegrierten Schaltkreise kann die Verkabelung zwischen Sender und Empfänger aufgrund von Platzmangel ein Problem darstellen. Wenn allerdings statt der herkömmlichen Leiterplatte ein Glaswafer als Trägermaterial genutzt wird, entfällt die Notwendigkeit der äußeren Verkabelung und die Signale können direkt in dotierten Bahnen innerhalb des Glaswafers geleitet werden. Da Sender und Empfänger senkrecht zu den dotierten Wellenleiterbahnen ausgerichtet sind, muss eine Umlenkung der Signale im Wafer erfolgen. Dazu können rückseitig in den Wafer strukturierte, mikrooptische Spiegelflächen mit einer Neigung von  $45^\circ$  genutzt werden. Ein Ansatz für die Herstellung dieser Flächen bietet die Fluorlasermikrostrukturierung. Dieses Verfahren basiert auf der Maskenprojektion. Büttner [Büt15] zeigte bereits, dass damit die Strukturierung von optischen Elementen im Mikrometerbereich in Glaswafern möglich ist. Die notwendige Maskenanordnung wird durch die im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit konzeptionierte und gebaute Bewegungseinrichtung [Syr19] ermöglicht. Somit können die optischen Signale vom Sender durch einen Spiegel in die wellenleitenden Strukturen des Wafers umgelenkt werden. Ein weiterer Spiegel lenkt dann das Signal zum Empfänger um. Weiterhin können an Stelle von Sender oder Empfänger auch Lichtleitkabel am Wafer befestigt werden, um bspw. zwei Schaltkreise miteinander zu verbinden. In dieser Arbeit wird auf die konstruktiven Anforderungen an die Bewegungseinrichtung sowie deren Umsetzung eingegangen und der Einfluss verschiedener Verfahrensparameter auf den Neigungswinkel der Spiegelflächen und deren Oberflächenrauheit untersucht.

## 1.1 *Stand der Technik*

Für die Herstellung mikrooptischer Bauelemente eignet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, deren Anwendbarkeit vom verwendeten Material und der geforderten Präzision abhängt. Unter Mikrostrukturen werden in der vorliegenden Arbeit Oberflächen- und Volumen-geometrien verstanden, die eine Auflösung im Mikrometerbereich und Ausdehnungen im Bereich weniger 100  $\mu\text{m}$  aufweisen. Nachfolgend wird eine Übersicht über die aktuellen Verfahrensmöglichkeiten gegeben und deren Vor- und Nachteile diskutiert.

### **Lithografische Verfahren**

Die klassische Photolithografie stellt ein etabliertes Verfahren dar. Die damit herstellbaren Strukturen werden durch die Entwicklungen und Anforderungen der Halbleitertechnik kontinuierlich kleiner. Der technologische Ablauf beruht dabei stets auf drei Schritten, wie von Brokmann [Bro05] erläutert:

1. Aufbringen eines photosensitiven Lacks (Resist) auf das Substrat
2. Strukturierung des Lacks durch strahlungsinduzierte Prozesse
3. Übertragung der Maskengeometrie durch einen Ätzprozess

Der Ätzprozess kann dabei rein physikalisch (z.B. Ionenstrahlätzen), rein chemisch (nasschemisch) oder als Kombination beider Varianten ausgeführt werden. Da der Abtrag jeweils von der benutzten Resistmaske und eventueller Unterätzung abhängt, können komplexe dreidimensionale Strukturen nur durch eine Vielzahl an Wiederholungen der oben beschriebenen Schritte hergestellt werden. Die Strukturauflösung ist abhängig von der verwendeten Anzahl Masken pro Strukturelement. Weiterhin kann mit diesem Verfahren nur ein stufenförmiger Oberflächenverlauf und kein kontinuierlicher erzeugt werden.

Bei dem von Hwu [Hwu09] vorgestellten lithografischen Verfahren wird die Problematik des gestuften Abtrags durch Resistinselarrays umgangen. Diese werden nach dem Aufbringen aufgeschmolzen und formen sich durch die wirkende Oberflächenspannung zu hemisphärischen Strukturen um. Danach folgt ein gleichmäßiges physikalisches Ätzen. Eine detaillierte Prozessbeschreibung ist in Hwu et al. [Hwu09] zu finden. Nach Hwu können so hemisphärische Mikrooptiken mit einem Durchmesser bis minimal 50  $\mu\text{m}$  hergestellt werden. Die Herstellung geneigter Flächen im Substrat ist über diesen Prozess nicht möglich. Dafür müsste der Resist vor dem Ätzen entsprechend strukturiert werden.



Eine weitere Prozessvariante stellt die von Hermatschweiler [Her13] verwendete maskenlose Photolithografie dar, bei der die Strahlungsquelle schreibend geführt wird. Hierfür wird ein Laser genutzt, dessen Fokus im gesamten Probenraum eines photosensitiven Materials geführt werden kann. Der Laser als Werkzeug eignet sich, da eine Fokussierung der ultrakurzen Laserpulse nur ein geringes Volumen des photosensitiven Materials aushärten lässt, was in Strukturgrößen im Submikrometerbereich resultiert. Eine Prozessbeschreibung befindet sich in [Her13]. Diesem Verfahren sind nur durch den Einsatz des Lasers Limitationen auferlegt, wie z.B. durch Positioniergenauigkeiten der Achssysteme und Größe des Laserfokus. Somit können auch mikrooptische Bauelemente mit Strukturgrößen im Submikrometerbereich generiert werden, wie in [Nan18] gezeigt wird. Spiegelflächen können mit diesem Verfahren zwar generiert werden, aber nur, wenn auch das umgebende Material im Zuge dessen mit hergestellt wird oder es sich um einen Transferprozess handelt. Die Bearbeitung beschränkt sich weiterhin auf Polymerwerkstoffe.

### **Prägeverfahren**

Heißprägen wurde lange Zeit nur auf Kunststoffe angewandt, da deren Viskositätsänderung schon bei unter 300°C für eine Umformung ausreicht. Die Bearbeitung von Glaswerkstoffen bedingt weitaus höhere Prozesstemperaturen. Worsch et al. [Wor09] zeigt auf, dass der Prozess im Vakuum unter isothermen Bedingungen (z.B. 820°C für Borosilikatglas) durchführbar ist. Erreichbar sind laterale Strukturabmessungen bis minimal 10 µm bei einer Strukturtiefe von 2 mm [Wor09]. Die Formgenauigkeit wird durch das Abformwerkzeug und dessen eventuelle Beschichtung vorgegeben. Das Abformwerkzeug stellt auch gleichzeitig die Problematik bei diesem Verfahren dar. Es muss auch bei der Umformung hochreiner Gläser stabil bleiben, um die Formgenauigkeit zu gewährleisten. Weiterhin wird das Substrat stark thermisch belastet.

### **Mechanische Verfahren**

Um Strukturgrößen im unteren Mikrometerbereich zu erzeugen, bedarf es ultrapräziser Werkzeuge. Ein in Frage kommendes Verfahren ist das Ultraschallschwingläppen, eine Prozessbeschreibung ist in [Klo17] zu finden. Nachteilig hierbei ist besonders der Verschleiß des Formzeugs. Die kleinste erzeugbare Geometrie wird von Klocke [Klo17] mit einem Durchmesser von unter 1 mm angegeben, es ist daher anzunehmen, dass Strukturen im Bereich von 100 µm nicht mit Ultraschallschwingläppen herstellbar sind.

Die Ultrapräzisionszerspanung hingegen arbeitet mit Dreh- und Fräswerkzeugen aus monokristallinem Diamant. Somit können Freiformflächen erzeugt werden [Nau14]. Für die erforderliche Präzision werden erhöhte Anforderungen an die Maschinen gestellt, da diese

besonders sensibel auf äußere Einflüsse wie Vibrationen oder Temperaturschwankungen reagieren. Naumann [Nau14] gibt die gemittelte Rautiefe mit  $R_z = 4$  nm an. Es sind also optische Funktionsflächen herstellbar. In [Nau14] ist bezüglich der Herstellung von Gitterstrukturen eine Auflösung von maximal 100 Linien pro Millimeter gegeben. Bedingt durch den Prozess können entweder rotationssymmetrische (Ultrapräzisionsdrehen) oder verrundete Geometrien (Ultrapräzisionsfräsen) hergestellt werden. Eine drehende Bearbeitung ist aufgrund der Wafergeometrie allerdings nicht möglich. Bei einem fräsenden Verfahren ist zusätzlich die Nutzfläche stets kleiner als die gefertigte Fläche, da das Werkzeug eine gewisse Ausdehnung besitzt und die Randbereiche der Bearbeitung nicht den optischen Ansprüchen genügen. Das Verfahren eignet sich demnach bedingt für Spiegelflächen, insofern diese nicht im Randbereich genutzt werden.

### **Laserverfahren**

Ein derzeit optimales Verfahren zur direkten Strukturierung von technischen Gläsern bieten die Excimerlaser, speziell der Fluorlaser. Dessen hohe Photonenenergie von  $E_{\text{Phot}} = 7,9$  eV ermöglicht die Bearbeitung von Dielektrika. Hierbei wird das Maskenprojektionsverfahren genutzt, da Excimerlaser generell eine sehr schlechte Strahlqualität im Rohstrahl besitzen [Eic15]. Die dabei minimal erzeugbaren Strukturen werden durch das Auflösungsvermögen des abbildenden optischen Systems limitiert. Mit dem Einsatz geeigneter Masken können so Strukturen im einstelligen Mikrometerbereich erstellt werden. In Dahotre [Dah08] werden folgende unterschiedliche Prozessvarianten erläutert:

1. Substrat und Maske sind stationär. Damit kann zum Beispiel eine Bohrung generiert werden.
2. Maske ist stationär und das Substrat wird zwischen den Laserpulsen bewegt, um periodische Strukturen (Arrays) zu generieren.
3. Relativbewegung zwischen Maske und Substrat, um Mikrokanäle etc. zu generieren. Dieser Prozess wird auch als „mask dragging“ oder „workpiece dragging“ bezeichnet.

Diese Verfahren eignen sich besonders für die Prototypenfertigung, da die Prozesse schnell und einfach sind. Es wird nur jeweils eine neue Maske benötigt, die zum Beispiel mit einem Femtosekundenlaser geschnitten werden kann. Mit einer geeigneten Maske lassen sich so auch komplexe dreidimensionale Strukturen herstellen, was den Prozess im Vergleich zu fotolithografischen Verfahren deutlich vereinfacht. Weiterhin können Mikrooptiken auch mit einem Femtosekundenlaser und dem Maskenprojektionsverfahren strukturiert werden, jedoch wird derzeit eine Nachbearbeitung der Optiken nötig, um die geforderte Qualität zu erreichen.

## **1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise**

In dieser Arbeit sollen definiert geneigte Spiegelflächen für mikrooptische Anwendungen hergestellt werden. Weiterhin soll die in einer vorangegangenen Arbeit [Syr19] entwickelte Bewegungseinrichtung hinsichtlich ihrer Positioniergenauigkeit und geeigneter Betriebsparameter charakterisiert und nochmals für die Strukturierung von Spiegelflächen definierter Geometrie optimiert werden. In einer Parameterstudie soll die Abhängigkeit des Neigungswinkels und der Oberflächenrauheit der erzeugten Flächen von der Maskenbewegung und der Laserpulsfluenz untersucht werden. Die Untersuchung der Strukturen erfolgt quantitativ mittels Laserscanningmikroskopie und qualitativ mittels Rasterelektronenmikroskopie. Abschließend sollen anhand der ermittelten Abhängigkeiten Spiegelflächen mit definiertem Neigungswinkel hergestellt und auf eventuelle Abweichungen analysiert werden.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Laseranlage

Die verwendete Laseranlage ist aus einem Fluorlaser, einem Strahlengang mit Gas- und Vakuumsystem, einer Bearbeitungskammer mit Achspositioniersystem und diverser Peripheriegeräte wie Schalt- und Steuereinheit aufgebaut. Die Daten der folgenden Beschreibung sind dem Technikhandbuch der Fluorlaseranlage [Mic05] entnommen, sofern nicht anders vermerkt.

#### 2.1.1 Fluorlaser

In die Anlage ist der Fluorlaser LPF 220i der Firma Coherent (Deutschland) GmbH integriert. Das aktive Medium dieses Lasers ist das Fluormolekül ( $F_2$ ), ein Excimer („excited dimer“, engl. für angeregtes Dimer), das durch eine Gasentladung angeregt wird. Der Laser emittiert elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge  $\lambda = 157$  nm. Dies entspricht einer Photonenenergie von  $E_{\text{Phot}} = 7,9$  eV. Die Repetitionsrate kann zwischen  $f_P = 1$  Hz und  $f_P = 200$  Hz variiert werden. Die maximale Pulsenergie beträgt  $E_{\text{Puls}} = 30$  mJ bei einer Pulsdauer von  $\tau = 25$  ns. Der Laser kann in drei unterschiedliche Betriebsmodi versetzt werden. Der High Voltage Constant Mode (HV-Mode) sorgt dafür, dass das Lasergas konstant mit einer einstellbaren Spannung angeregt wird. Jedoch „altert“ das Lasergas, weswegen die Pulsenergie geringer wird. Dies kann mittels des EGY NGR - Modus kompensiert werden, indem die Hochspannung nachgeregelt wird. Weiterhin ist der EGY PGR - Modus wählbar. Hierbei wird die Pulsenergie über ein Nachregeln der Entladungsspannung mit partiellem Gasaustausch im Resonator auf einem einstellbaren Wert konstant gehalten.



Abb. 2.1 Fluorlaser

### 2.1.2 Strahlführung und -formung

Wie bereits erwähnt, weisen Excimerlaser eine schlechten Strahlqualität im Rohstrahl auf [Eic15], was eine Strahlformung für die Verwendung des Maskenprojektionsverfahrens unabdingbar macht. Auf deren relevante Komponenten der verwendeten Anlage wird nachfolgend eingegangen.

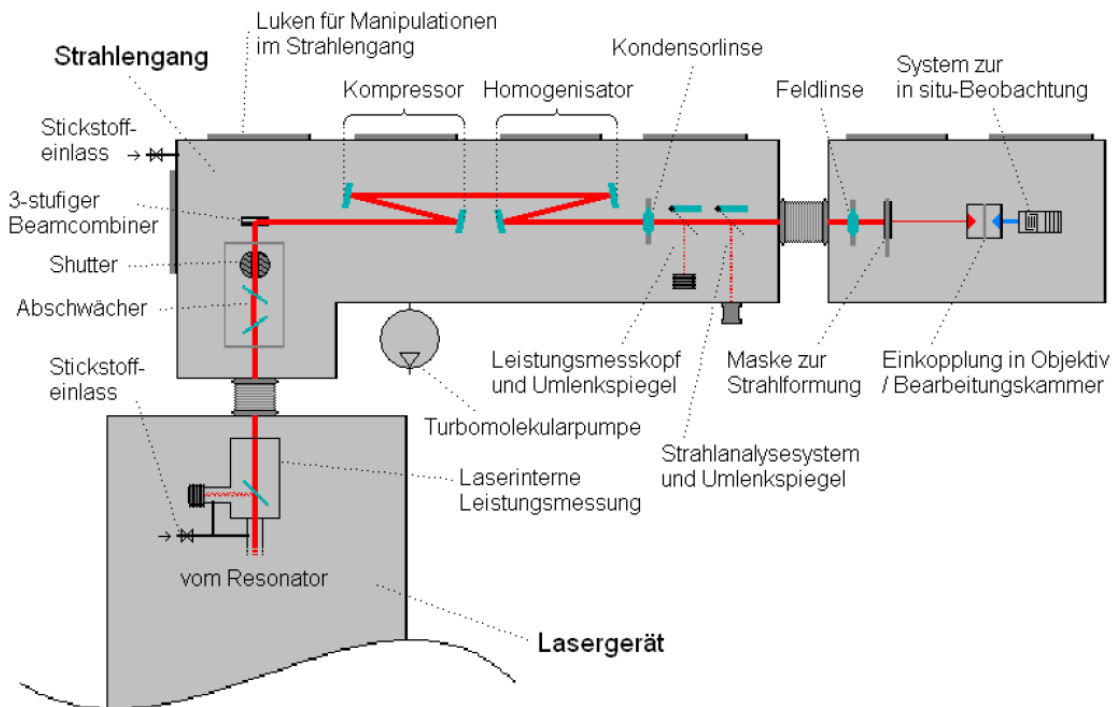
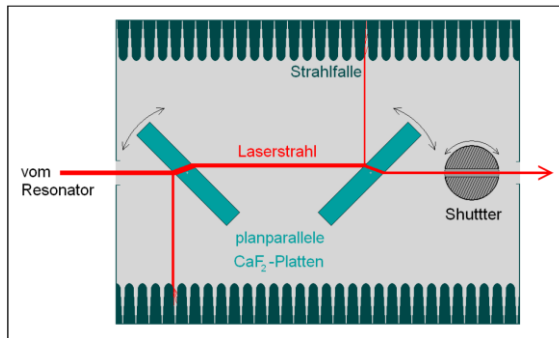
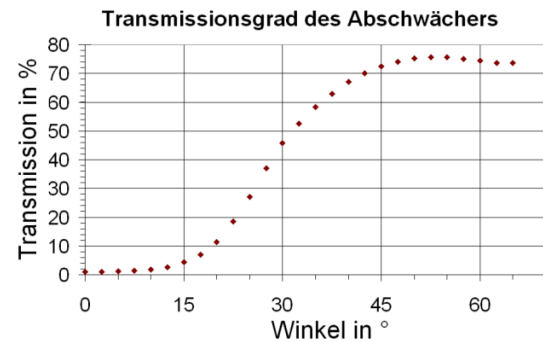


Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Strahlformung und -führung [Ber09]

Der Fluorlaserstrahl tritt mit einem rechteckigen Querschnitt von 23 mm x 7 mm und einer Divergenz von 3 mrad x 1 mrad aus dem Resonator aus. Da über die Einstellung der Entladungsspannung nur eine grobe Regelung der Laserleistung erfolgen kann, befindet sich im Strahlengang ein Abschwächer, der eine Feinanpassung der nutzbaren Laserleistung ermöglicht. Dafür werden zwei planparallele Kalziumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ) - Platten synchron zueinander verdreht (siehe Abb. 2.3). Da der Reflexionsgrad (an der Grenzfläche) von Kalziumfluorid abhängig vom Einfallswinkel ist, kann über eine Winkeländerung die Laserleistung angepasst werden. Die zweite Kalziumfluoridplatte dient der Korrektur des Strahlversatzes, der durch die erste Platte verursacht wird.

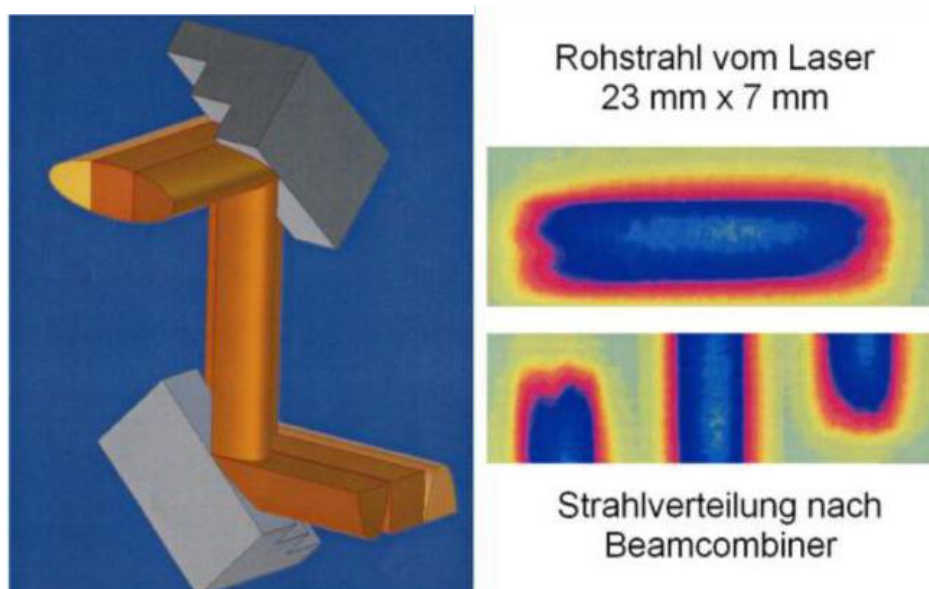


**Abb. 2.3** Schematischer Aufbau des Abschwächers [Ber09]



**Abb. 2.4** Transmissionsgrad des Abschwächers [Häh06]

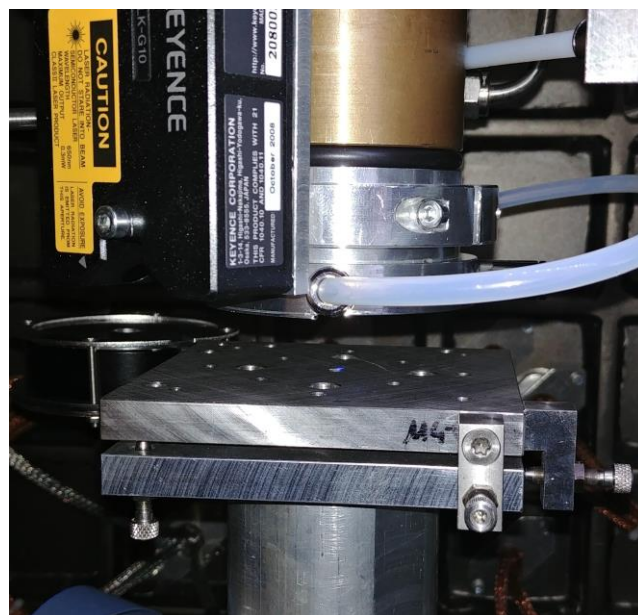
Hähnel [Häh06] gibt den maximalen Transmissionsgrad des Abschwächers mit 75,6 % bei 55° und den minimalen mit 1% bei 0° Abschwächerstellung an (siehe Abb. 2.4). Zu beachten ist, dass es sich bei der Winkelvorgabe nicht um den tatsächlichen Einfallswinkel handelt, sondern um einen softwareseitigen Wert, der nicht kontrolliert werden kann [Häh06]. Nach dem Abschwächer trifft der Laserstrahl auf den Beamcombiner. Dieser besteht aus zwei Treppenspiegeln mit jeweils drei Spiegelsegmenten der Größe 15 x 15 mm<sup>2</sup>. Der Laserstrahl wird beim Durchgang durch den Beamcombiner in drei Teilstrahlen zerlegt, die dann um 90° verdreht wieder zusammengesetzt werden (siehe Abb. 2.5). Dies dient dem Angleichen der unterschiedlichen Strahldivergenzen.



**Abb. 2.5** Funktionsweise des Beamcombiners (links) und Laserstrahlprofil vor und nach dem Beamcombiner (rechts) [Mic05]

Der nachgelagerte Kompressor besteht aus zwei Zylinderspiegeln und verkleinert den Laserstrahl auf einen nahezu quadratischen Strahlquerschnitt von 14 mm x 14 mm. Außerdem gleicht er die Divergenz auf 1 mrad x 1 mrad an. Der Homogenisator besteht aus zwei Mikro-

spiegelarrays mit jeweils 196 Spiegelsegmenten. Das erste Array teilt den einfallenden Laserstrahl in 196 Teilstrahlen auf und fokussiert diese auf dem zweiten Array. Dieses überlagert und durchmischt nun die Teilstrahlen. In Kombination mit dem nachfolgenden System aus Kondensor- und Feldlinse wird so 0,8 m nach dem zweiten Mikrospiegelarray ein 6 mm x 6 mm großer, homogener ausgeleuchteter Fleck erzeugt. Diese Position ist die Maskenebene. Die Maskengeometrie wird mittels eines Ultrakurzpulslasers in eine 50 µm dicke Tantalfolie geschnitten. Die Masken werden danach durch das Objektiv um den Faktor 26,67 verkleinert auf das zu bearbeitende Werkstück abgebildet. Das Auflösungsvermögen des Objektivs ist mit ca. 0,5 µm und die Tiefenschärfe nach Hähnel [Häh06] mit circa 20 µm angegeben.



**Abb. 2.6** Objektiv mit Schutzgasdüse, Triangulationssensor, Leistungsmesskopf und Bearbeitungstisch

Direkt am Objektiv ist eine Crossjet-Düse (siehe Abb. 2.6) befestigt, die das Objektiv vor ablatierten Partikeln schützt. Das Prozessgas wird durch eine weitere Düse stechend an den Ort der Bearbeitung geführt. Weiterhin verhindert eine Ringdüse die Sogwirkung des stechenden Gasstroms, indem sie diesen mit einem Gasschleier umgibt. Als Arbeitsgas wird Stickstoff mit einer Reinheit von 5.0 eingesetzt. Weiterhin ist am Objektiv ein Triangulationssensor befestigt, um den Objektstisch auszurichten. Der Leistungsmesskopf ist am Objektstisch befestigt.

### 2.1.3 Anlagentechnik

Da die vom Laser emittierte Wellenlänge von  $\lambda = 157 \text{ nm}$  von Sauerstoff absorbiert wird, befindet sich der komplette Strahlengang in einer Vakuumkammer aus Edelstahl. Eine Vorpumpe (Scrollpumpe) kann diese auf einen Druck von etwa 0,1 mbar evakuieren. Damit der Druck in der Anlage den Bereich des mittleren Hochvakuums erreicht, ist zusätzlich noch eine Turbomolekularpumpe integriert. Da im Hochvakuum die mittlere freie Weglänge eventuell ablatierter Teilchen so groß wird, dass sie die Optiken im Strahlengang verunreinigen und damit zerstören können, wird die Kammer vor der Bearbeitung mit Stickstoff der Reinheit 5.0 gefüllt. Die Bearbeitungskammer kann unabhängig vom Strahlengang mit der Scrollpumpe bis in den Vorvakuumbereich evakuiert und anschließend ebenso mit Stickstoff gefüllt werden. Dies reicht bereits aus, da der Weg der Strahlung bis zum Werkstück sehr gering ist. Das Werkstück wird über ein Achssystem bestehend aus drei Linearachsen (x-, y- und z-Achse) positioniert. Die Parameter der Positionierachsen können der folgenden Tabelle (Tab. 2.1) entnommen werden.

Tab. 2.1 Parameter der Achspositioniersystems [Mic05]

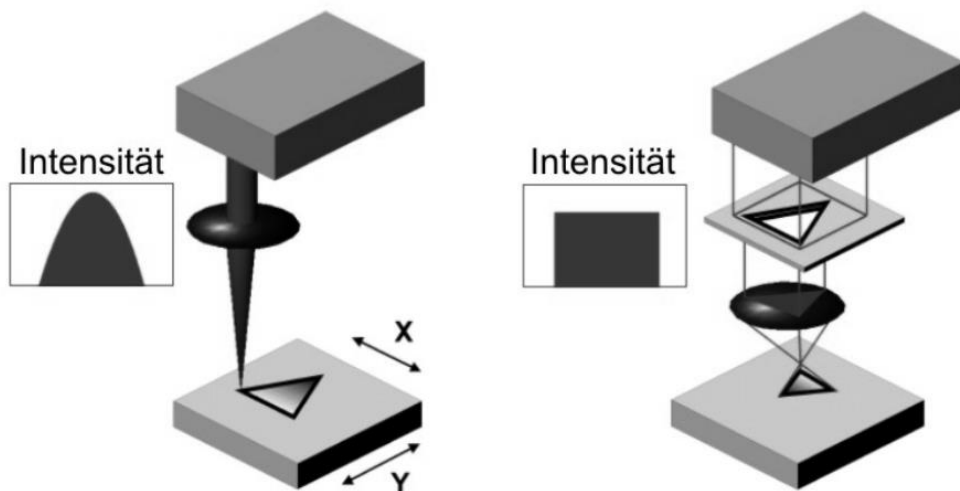
	<b>y-Achse ALS20020</b>	<b>x-Achse ALS10020</b>	<b>z-Achse AVS125</b>
<b>Verfahrweg</b>	200 mm	200 mm	25 mm
<b>Maximale Geschwindigkeit ohne Last</b>	750 mm/s	750 mm/s	50 mm/s
<b>Auflösung</b>	50 nm	50 nm	106 nm
<b>Wiederholgenauigkeit</b>	+/- 0,5 $\mu\text{m}$	+/- 1 $\mu\text{m}$	+/- 0,75 $\mu\text{m}$
<b>Ebenheit</b>	+/- 4 $\mu\text{m}$	+/- 4,8 $\mu\text{m}$	+/- 5 $\mu\text{m}$
<b>Gewicht</b>	17,5 kg	11 kg	10,5 kg
<b>Maximale Last horizontal</b>	70 kg	50 kg	10,5 kg



## 2.2 Lasermikrostrukturierung

### 2.2.1 Maskenprojektionsverfahren

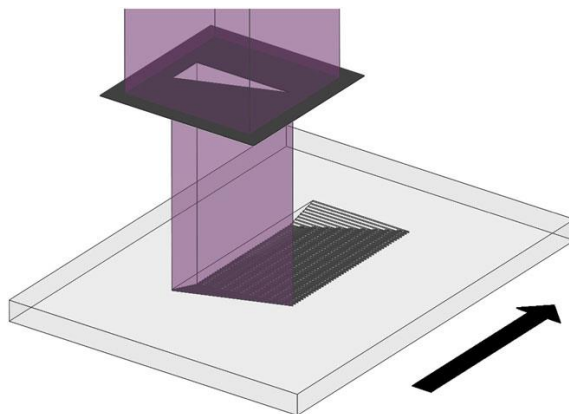
Die Mikrostrukturierung mittels Laserstrahlung kann in zwei Verfahren eingeteilt werden (siehe Abb. 2.7). Wird ein Laser mit einer sehr guten Strahlqualität (Gaußstrahl) verwendet, kann das Substrat direkt schreibend bearbeitet werden. Voraussetzung dafür ist eine Relativbewegung zwischen dem Objektiv und dem Substrat. Dabei entsteht ein ungleichmäßiger Tiefenabtrag. Laser mit einer schlechten Strahlqualität, wie z.B. die Excimerlaser, sind für das direkt schreibende Verfahren ungeeignet und können nur mittels Maskenprojektionsverfahren eingesetzt werden. Dazu wird eine beliebig geformte Blende in den Strahlengang eingebracht, die homogen ausgeleuchtet werden muss [Hüg09]. Diese Transmissionsmaske wird dabei durch das verwendete Objektiv verkleinert auf dem Werkstück abgebildet. Wird im bestrahlten Bereich die materialspezifische Schwellfluenz überschritten, so kommt es zur Übertragung der Maskengeometrie und einem gleichmäßigen Tiefenabtrag. Dabei bestimmen die Fertigungsgenauigkeit der Maske, die verwendete Laserwellenlänge, die Größe des homogenen Flecks und der Abbildungsmaßstab des Objektivs die minimal erzeugbaren Strukturen.



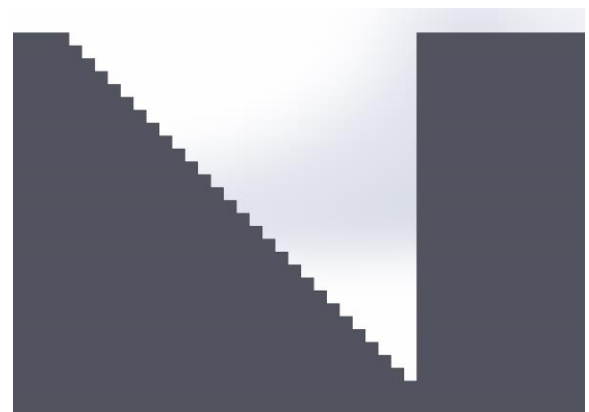
**Abb. 2.7** Abtrag mittels Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück (links) oder Maskenprojektion mit homogener Bestrahlung (rechts) [Hüg09]

## 2.2.2 Herstellung von Spiegelflächen

Im Maskenprojektionsverfahren kann die Tiefe der Struktur mittels der Anzahl der übereinandergesetzten Einzelabträge gesteuert werden. Erfolgt nach einem Einzelabtrag eine geringfügige Relativbewegung zwischen der Maske und dem Werkstück, so ergibt sich eine gestufte Struktur (siehe Abb. 2.9). Die Ausprägung der Stufenstruktur ist abhängig von der Pulsenergie, der Verfahrensgeschwindigkeit der dynamischen Maske, dem Pulsüberlappungsgrad sowie der Anzahl eingebrachter Einzelpulse, bevor eine Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück erfolgt. Der Anteil der gerichteten Reflexion an dieser Struktur (Spiegelfläche) wird größer, je kleiner deren Rauheit bezogen auf die Wellenlänge der einfallenden elektromagnetischen Strahlung ist. Daraus folgt, dass die einzelnen Stufensegmente möglichst klein bzw. nicht mehr unterscheidbar sein müssen. Gestufte Abträge können allgemein auch mittels Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück unter Einsatz spezieller Masken im Maskenprojektionsverfahren hergestellt werden (siehe Abb. 2.8). Die Strukturen sind dann jedoch nicht lokal auf die Spiegelfläche begrenzt.



**Abb. 2.8** Schematische Darstellung des „mask dragging“-Verfahrens mit Dreiecksmasken [Pfe11]

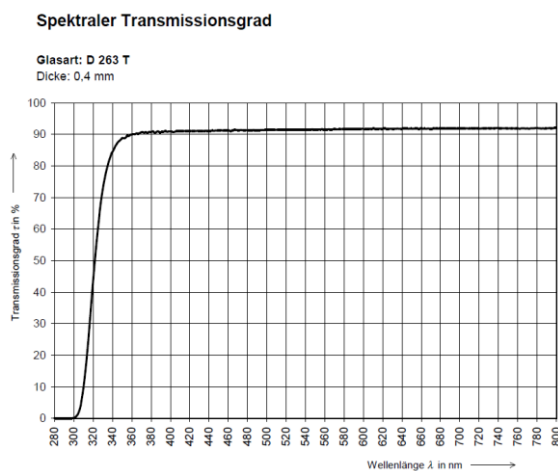


**Abb. 2.9** Schematische Darstellung der Spiegelfläche, strukturiert mit der vorgestellten Bewegungseinrichtung

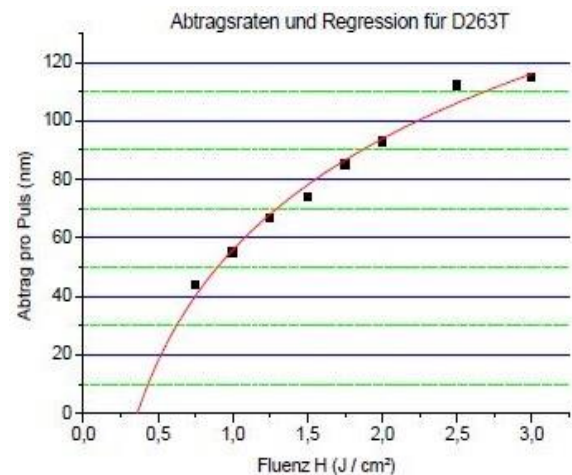
## 3. Material und Methoden

### 3.1 Borosilikatglas D263T

Das farblose, amorphe Borosilikatglas D263T der Firma Schott AG ist aufgrund seiner Zusammensetzung chemisch besonders stabil [Sch05]. Es wird unter anderem für Liquid Cristal Displays (LCD), touch control panels, Solarzellen und Mikrooptiken mit hoher Laserzerstörungsschwelle eingesetzt [IOF19]. Abb. 3.1 zeigt den Transmissionsgrad des Werkstoffs in Abhängigkeit der eingestrahelten Wellenlänge. Aus der Abbildung geht hervor, dass das Material unterhalb einer Wellenlänge von  $\lambda = 300$  nm nicht mehr transparent ist und mit dem Fluorlaser bearbeitet werden kann. Die Substratfläche beträgt  $20 \times 30$  mm<sup>2</sup> bei einer Dicke von 0,5 mm. Weitere chemische und physikalische Eigenschaften sind dem Produktdatenblatt [Sch05] zu entnehmen.



**Abb. 3.1** Spektraler Transmissionsgrad von D263T [Sch05]

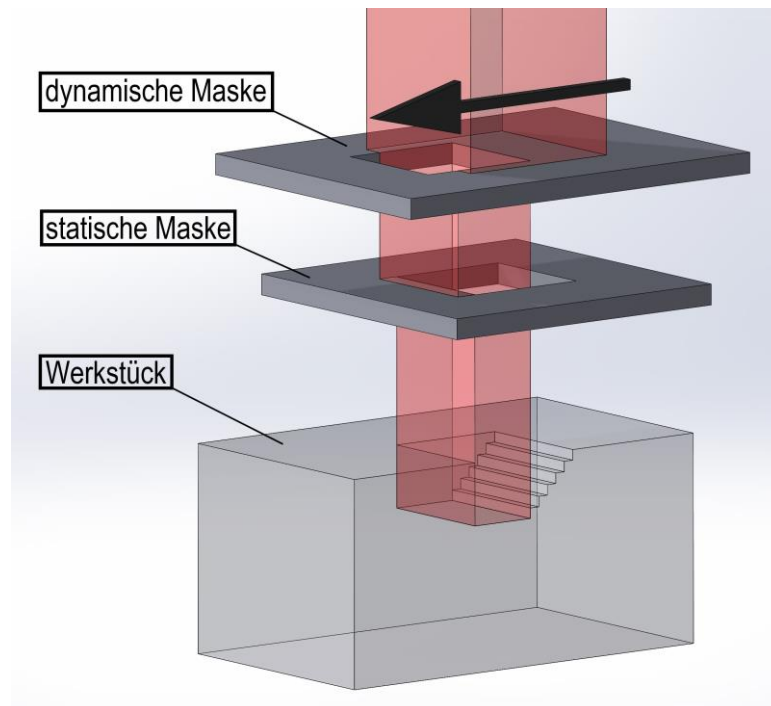


**Abb. 3.2** Abtragsrate pro Puls bei  $f_p = 200$  Hz in D263T [Ber09]

Bertram [Ber09] führte bereits umfassende Untersuchung mit der Laserwellenlänge  $\lambda = 157$  nm und D263T durch. Der Abtrag pro Puls bei einer Repetitionsrate von 200 Hz in Abhängigkeit von der Fluenz ist in Abb. 3.2 dargestellt. Die Schwellfluenz wird mit  $0,36$  J/cm<sup>2</sup> angegeben.

### 3.2 Strukturierungsmethode

Die relative Bewegung der Projektionsmasken zueinander wird über eine feststehende, statische Maske und eine dazu linear verschiebbare, dynamische Maske realisiert. Zwischen der statischen Maske und dem Werkstück erfolgt keine Relativbewegung. In Abb. 3.3 ist der prinzipielle Prozess dargestellt.



**Abb. 3.3** Schematische Darstellung der Maskenanordnung

Der Laserstrahl (rot) ist auf die untere, statische Maske ausgerichtet. Damit wird ihm eine definierte Außenkontur, in diesem Fall quadratisch, vorgegeben. Die darüberliegende, dynamische Maske ist zu Beginn des Prozesses so positioniert, dass sie den Laserstrahl nicht beeinflusst. Nun wird der erste Laserpuls ausgelöst und generiert auf dem Werkstück einen Abtrag. Danach wird die dynamische Maske linear in Richtung des Pfeils (B-Achse) verschoben und beschneidet nun den Laserstrahl in einer Dimension. Dies resultiert bei erneutem Auslösen eines Laserpulses in einem kleineren Abtrag innerhalb des ersten Abtrages. Der Prozess wird nun so oft wiederholt, bis entweder der Laserstrahl komplett von der dynamischen Maske verdeckt wird oder die gewünschte Struktur generiert wurde. Die Kontur der abschattenden Kante kann hierbei frei gewählt werden, um verschiedenste Spiegelflächen zu strukturieren. In der Darstellung, wie auch bei den in Kapitel 3.4 und 4.2 beschriebenen Projektionsmasken, wurde sie als Gerade ausgeführt, da so ebene, geneigte Flächen strukturiert werden können.

### **3.3 Maskenbewegungseinrichtung**

Die vorher beschriebene Methode wurde in Form einer kompletten Bewegungseinrichtung mit der 3D-CAD-Software SolidWorks® der Firma Dassault Systèmes umgesetzt. Die hierbei wichtigsten Faktoren werden nachfolgend erklärt.

#### **Positionierungsgenauigkeit der Bewegungseinrichtung**

Entscheidend für die Einsetzbarkeit der Konstruktion ist die Einhaltung der geforderten Präzision. Diese wird durch die Abtragstiefen pro Puls (siehe Abb. 3.2) und die zu erzeugende Spiegelneigung bestimmt. Soll bspw. ein 45°-Spiegel bei einer Fluenz von  $H = 1 \text{ J/cm}^2$  strukturiert werden, so muss die Verschiebung zwischen zwei Abträgen ca. 55 nm betragen. Dies wird in der Konstruktion über die Kombination eines Gewindetribs (1 mm Steigung) mit einem Servomotor (4000 Inkremente pro Umdrehung) gewährleistet. Zusätzlich befindet sich am Servomotor ein Getriebe mit einer 1:33 Übersetzung. Somit ergibt sich für ein verfahrenes Inkrement des Motors theoretisch eine Verschiebung der dynamischen Maske um 7,6 nm, was einer Verschiebung des Abtrages auf dem Substrat von ca. 0,3 nm entspricht. Diese Achse wird weiterhin als B-Achse bezeichnet. Ein eventuelles Spiel in diesem System wird durch eine unidirektionale Verfahweise umgangen. Ein Hallsensor dient zur Nullpunktreferenzierung der beweglichen Teile. Damit ist der Startpunkt für jeden Abtrag gleich und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben. Der Gewindetrieb muss dezentral mit dem Halter der dynamischen Maske verbunden werden, da er sonst entweder den Laserstrahl blockieren oder die Bewegungsfreiheit der dynamischen Maske einschränken würde. Das so entstehende Moment auf die Lagerung wird durch zwei parallele Schienenführungen aufgefangen. Laut den Herstellerangaben beträgt die Laufparallelität 3  $\mu\text{m}$  auf die Schienenlänge von 115 mm. Die Führungen sind mit Vakuurfett geschmiert, um eine reibungsfreie und genaue Bewegung zu gewährleisten. Für die nötige Bewegungssteifigkeit werden alle Teile auf eine Grundplatte geschraubt, die 160 x 150 mm<sup>2</sup> groß ist.

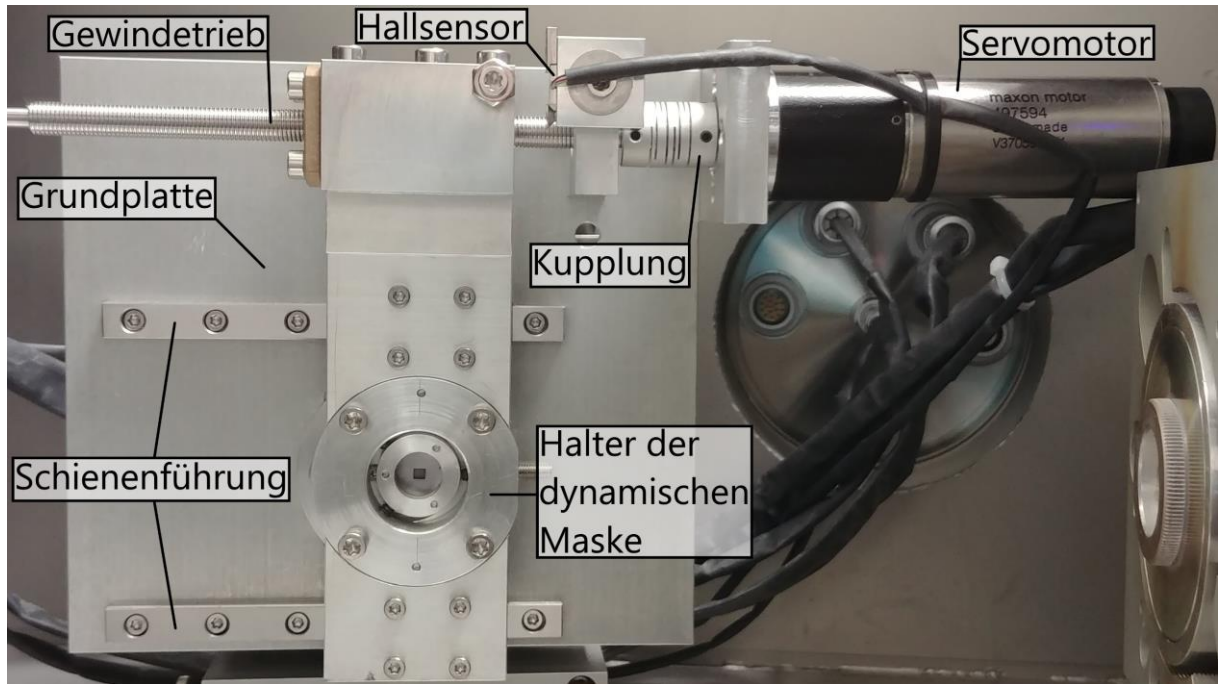
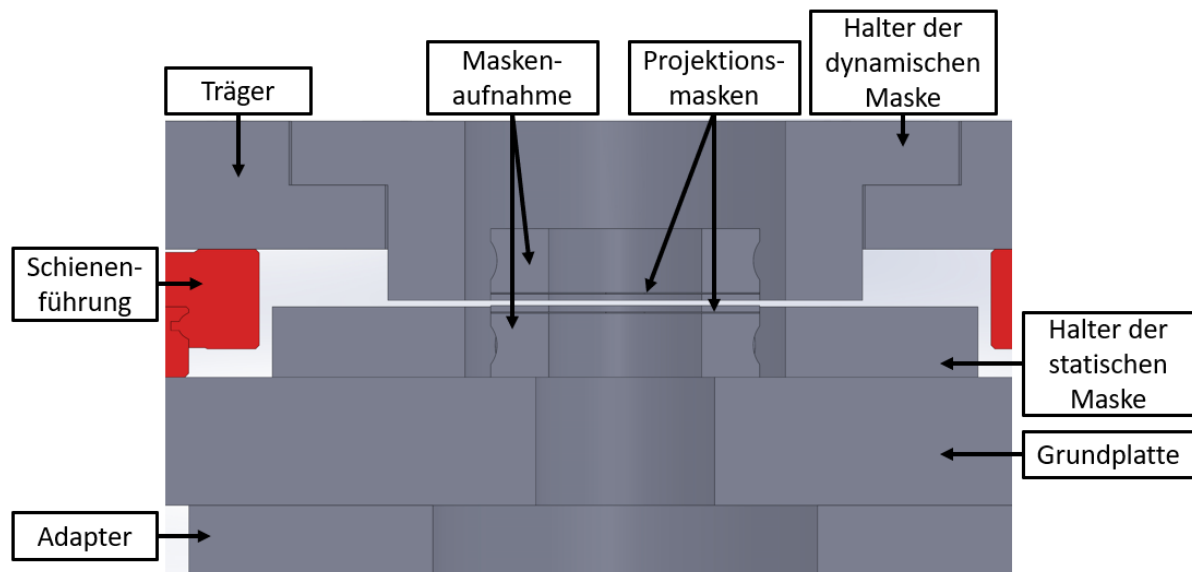


Abb. 3.4 Bewegungseinrichtung

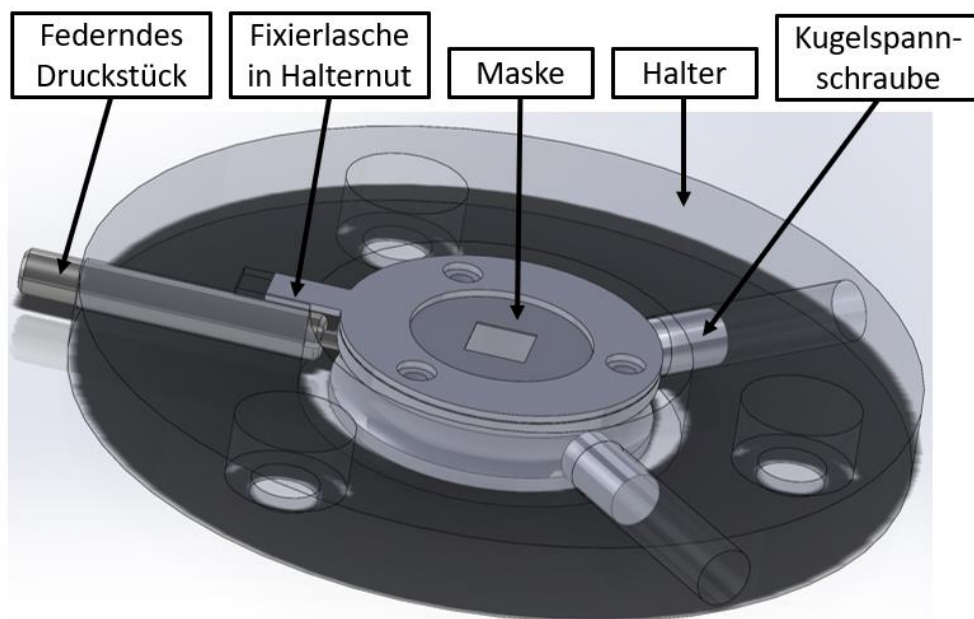
### Positionierung der Masken

Die Projektionsmasken müssen möglichst nah zueinander positioniert werden können, damit der Abstand der Abbildungsebenen gering ist. Die Masken werden mittels eines lasergeschnittenen, 0,5 mm dicken Fixierblechs auf die rotationssymmetrische Aufnahme geschraubt. So wird gewährleistet, dass sich die Masken nicht verziehen. In das Blech und die Aufnahme werden Senkkopfbohrungen eingebracht, um eine Kollision der Schraubenköpfe mit dem jeweils gegenüberliegenden Maskenhalter zu verhindern (siehe Abb. 3.7 rechts). In den Träger ist eine Bohrung eingebracht, damit der Halter der dynamischen Maske so weit versenkt werden kann, dass der Abstand zwischen den Maskenhaltern 0,5 mm beträgt (siehe Abb. 3.5). Der Abstand der Projektionsmasken beträgt somit 1,5 mm.



**Abb. 3.5** Schnitt durch die Bewegungseinrichtung im Konstruktionsprogramm

Die Position der Masken innerhalb der Halter kann über Kugelspannschrauben verändert und damit justiert werden (siehe Abb. 3.6). Die Fixierung des Verdrehwinkels wird über eine Lasche des Fixierblechs gewährleistet, die in eine Nut des Halters greift.

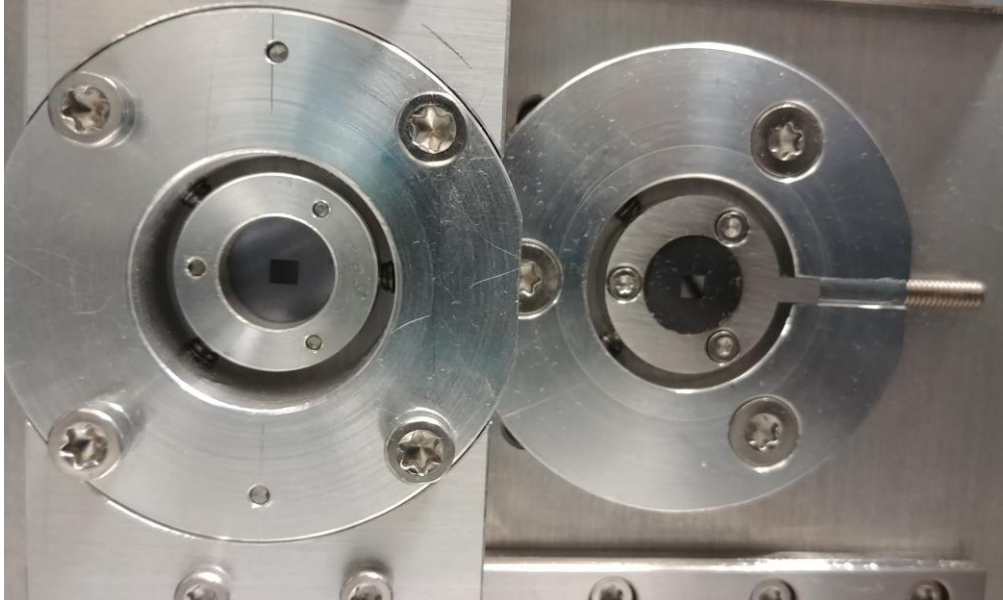


**Abb. 3.6** Dreipunktgelagerte statische Maske in Haltevorrichtung (transparent)

### Flexibilität der Masken

Die Masken sollen schnell und mit geringem Aufwand wechselbar sein. Aus diesem Grund wird eine Dreipunktlagerung aus zwei Kugelspannschrauben und einem federnden Druckstück genutzt (siehe Abb. 3.6). Somit kann die Maskenaufnahme durch Bewegung in Richtung des federnden Druckstücks aus dem Halter genommen werden, ohne dass die Kugelspann-

schrauben bewegt werden. Wird eine neue Maske eingesetzt, so ist keine erneute Justage notwendig. Um die dynamische Maske zu wechseln, muss der Maskenhalter aus dem Träger genommen werden. Damit die Justage der Maske dadurch nicht beeinflusst wird, wurden nach erstmaliger Justage Positionierstifte in den Halter und den Träger eingebracht (Abb. 3.7).



**Abb. 3.7** Projektionsmasken in den jeweiligen Haltevorrichtungen und eingebrachte Positionierstifte im Halter der dynamischen Maske

### **Adaptierung der Bewegungseinrichtung**

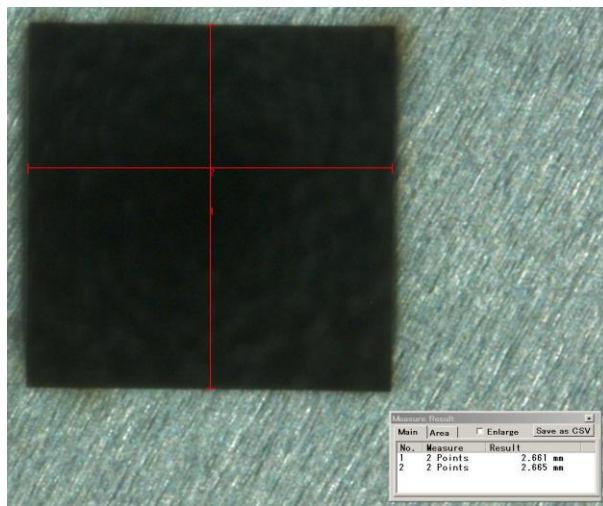
Damit die Bewegungseinrichtung genutzt werden kann, wird sie mittels eines Adapters auf einen Halter für optische Elemente montiert. Dieser ist auf der optischen Schiene (Hutschiene) der Strahlführung befestigt wird. Der Halter kann, wenn auch nur in gewissen Bereichen, in allen sechs Freiheitsgraden manipuliert werden, was die exakte Positionierung der Bewegungseinrichtung erlaubt. Ohne den Adapter würde der Freiheitsgrad der Rotation um die optische Achse entfallen.

Bei der Adaptierung müssen auch die räumlichen Einschränkungen am Einsatzort beachtet werden. Dies betrifft sowohl die geometrischen Limitationen, die durch die Innengröße der Kammer gesetzt sind, als auch andere optische Elemente, die sich auf der optischen Schiene befinden.

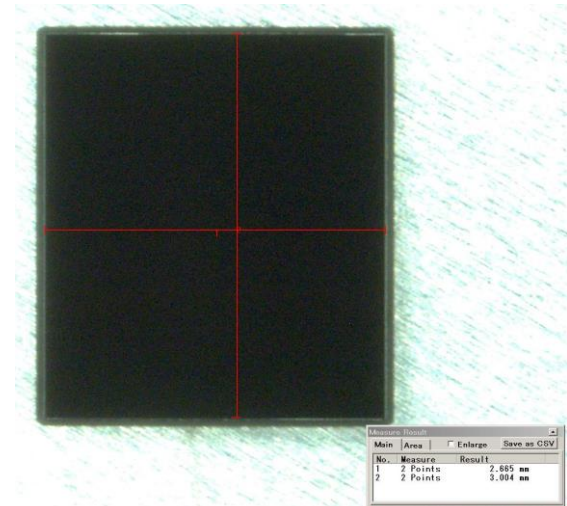


### 3.4 Projektionsmasken

Die verwendeten Projektionsmasken sind in 50 µm dicke Tantalfolie mit einem Ultrakurzpuls-laser geschnitten. Die dynamische Maske ist in B-Richtung (in Abb. 3.9 vertikal) länger, damit eine Vorjustage der Einrichtung mittels einer Kamera ausreicht, um eine komplette Öffnung der Einrichtung zu gewährleisten.



**Abb. 3.8** Statische Maske; horizontal 2,665 mm, vertikal 2,661 mm



**Abb. 3.9** Dynamische Maske; horizontal 2,665 mm, vertikal 3,004 mm

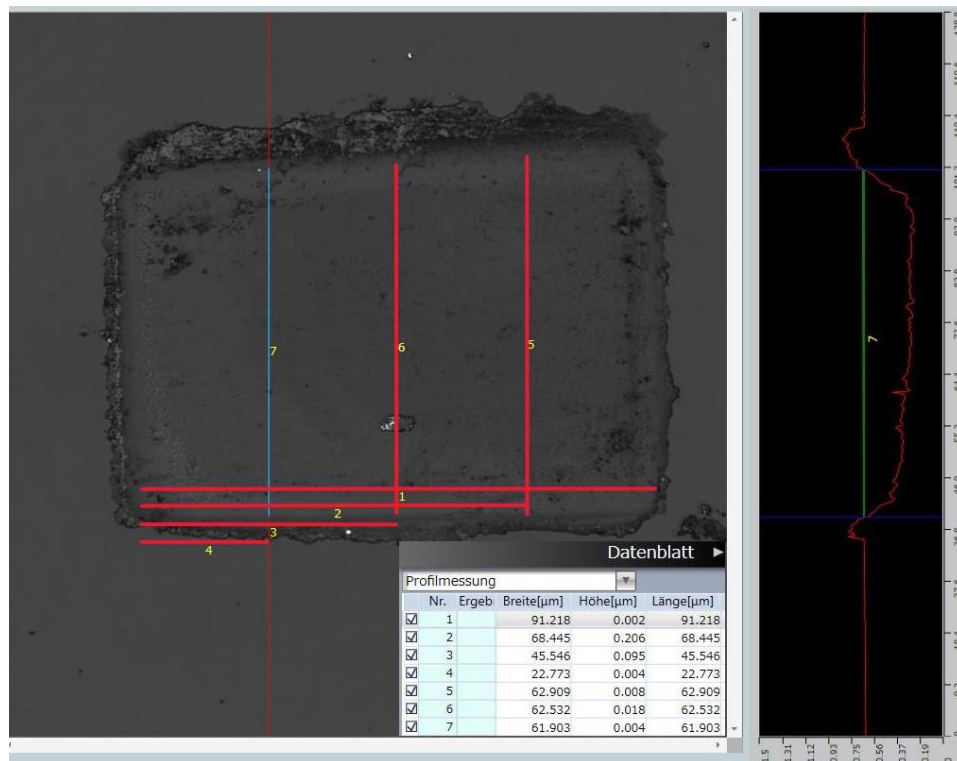
## 4. Ergebnisse und Diskussion

Die Justage der Projektionsmasken relativ zueinander erfolgt mittels Digitalmikroskop der Firma Keyence. Nach dem Einbau der Bewegungseinrichtung in die Fluorlaseranlage werden Testabträge generiert, um die Bewegungseinrichtung auf den Laserstrahl auszurichten.

### 4.1 Charakterisierung der Bewegungseinrichtung

#### 4.1.1 Vermessung des Abtrags

Der Abtrag ist nicht exakt quadratisch. Die Abweichung resultiert aus einer fehlenden Justiermöglichkeit des Verdrehwinkels der dynamischen Maske (siehe 4.2 Optimierung der Bewegungseinrichtung). Aus diesem Grund wird das für alle nachfolgenden Ergebnisse dieses Unterkapitels verwendete Messverfahren beschrieben. Als Messgerät wird für alle folgenden Messungen das Laserscanning-Mikroskop Olympus Lext OLS4100 verwendet.



**Abb. 4.1** Laserscanning-Aufnahme eines Abtrags mit den Positionen der Profilschnitte (links), Profilschnitt zur Messung der Abtragsbreite entlang der Linie 7 (rechts) und die Längen der jeweiligen Profilschnitte im Datenblatt ( $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $b_{\text{theo}} = 70 \mu\text{m}$ )

Da die untere Kante des Abtrags die Abbildung der statischen Maske darstellt, wird sie als Referenz für die Messung gewählt. Bei 25, 50 und 75 % ihrer Länge, gemessen von der linken Abtragskante, werden Profilschnitte senkrecht zu der Kante in den Abtrag gelegt. In

Abb. 4.1 sind die entsprechenden Linien eingezeichnet und ihre jeweilige Länge im Datenblatt vermerkt. Die Länge des Abtrages wird an der Substratoberfläche gemessen (Abb. 4.1 rechts). Die drei Abstände werden dann gemittelt.

#### 4.1.2 Prozessparameter

Nachfolgend werden für eine Charakterisierung verschiedene Messreihen generiert, um den Einfluss der Prozessparameter zu untersuchen. Es werden 10 Testfelder untereinander angelegt, bei denen jeweils die statische Maske 0.266 mm (10 % der Kantenlänge der statischen Maske) mehr abgeschattet wird. In der jeweils ersten Reihe wird die dynamische Maske von 100 % zu 0 % Öffnung verfahren und in der zweiten Reihe von 0 % zu 100 % Öffnung. Diese Messreihen werden bei den Laserpulsfluenzen  $0,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $1,5 \text{ J/cm}^2$  und  $2,5 \text{ J/cm}^2$  und jeweils 10 Pulsen pro Abtrag bei einer Frequenz von  $f_p = 200 \text{ Hz}$  generiert (siehe Abb. 4.2, von links nach rechts). Somit wird eine eventuelle Richtungs- und Laserpulsfluenzabhängigkeit der Strukturierung untersucht.

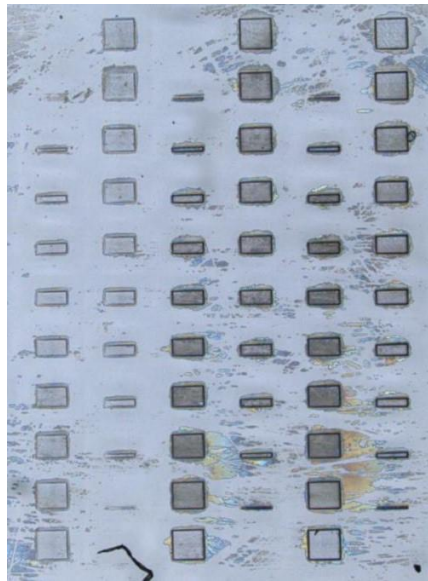
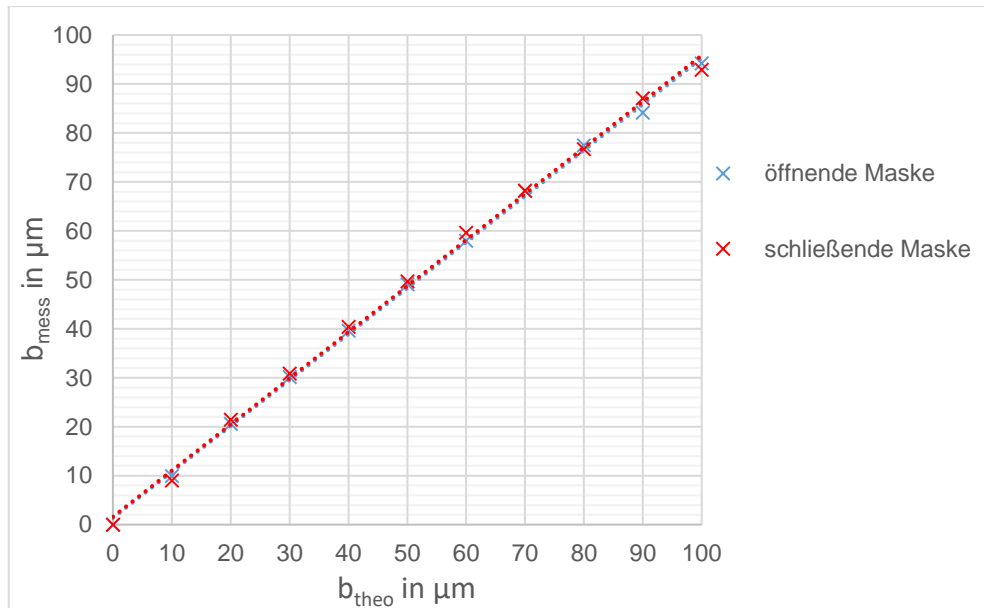


Abb. 4.2 Parameterfeld der Einzelabträge

### 4.1.3 Abhängigkeit der Abtragsbreite von der Verfahrrichtung der B-Achse



**Abb. 4.3** Abhängigkeit der gemessenen Abtragsbreite von der Verfahrrichtung der B-Achse bei  $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$

Im obigen Diagramm (Abb. 4.3) ist die gemessene Breite des Abtrags  $b_{\text{mess}}$  in Abhängigkeit von der theoretischen Abtragsbreite  $b_{\text{theo}}$  dargestellt, wobei diese sich aus der Maskenposition  $B$  und dem Abbildungsmaßstab  $\beta$  des Objektivs nach Formel 4.1 berechnet.

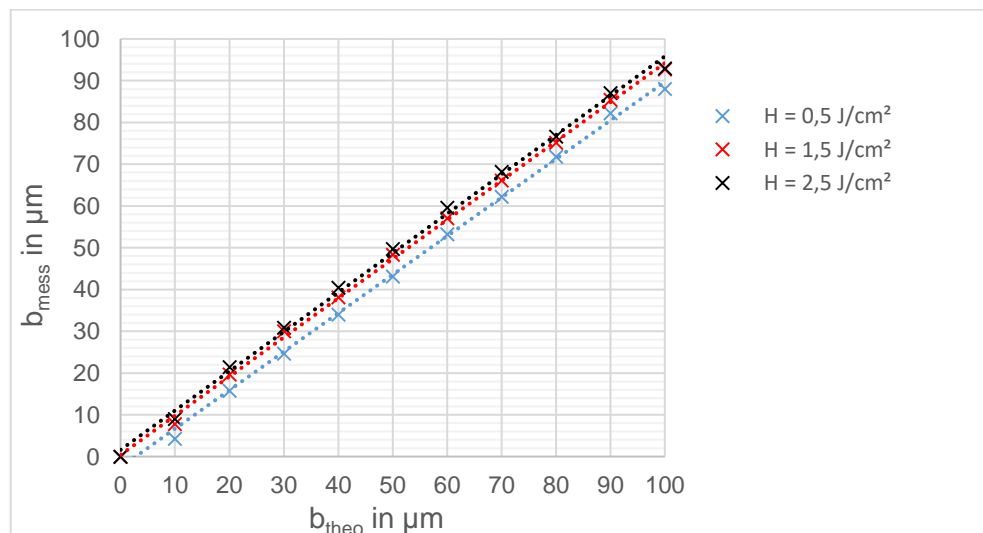
$$b_{\text{theo}} = \frac{B}{\beta} \quad (4.1)$$

Die Beschriftung der Datenreihen entspricht der Verfahrrichtung der Bewegungseinrichtung. „öffnende Maske“ steht für eine Messreihe bei größer werdender Maskenfläche, wobei „schließende Maske“ für eine kleiner werdende Maskenfläche steht. Das Diagramm ist repräsentativ für alle verwendeten Laserpulsfluenzen, die Diagramme für  $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$  und  $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$  befinden sich im Anhang. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Messwerte bzw. die linearen Regressionsgeraden für beide Verfahrrichtungen der B-Achse übereinander liegen. Somit kann eine Richtungsabhängigkeit der Abtragsbreite von der Verfahrrichtung der B-Achse ausgeschlossen werden.

#### 4.1.4 Laserpulsfluenzabhängigkeit der Abtragsbreite

Da keine Richtungsabhängigkeit nachgewiesen werden konnte, wird nachfolgend nur noch auf die Messungen bei kleiner werdender Maskenöffnung („schließende Maske“) eingegangen, da die Spiegelflächen mit dieser Maskenverfahrerrichtung strukturiert werden sollen. Bei größer werdender Maskenöffnung würde der letzte Laserpuls gleichzeitig die Substratoberfläche und den tiefsten Bereich der Struktur abtragen müssen, was aufgrund der Schärfentiefe bei Strukturiefen  $> 20 \mu\text{m}$  zu geänderten Abtragsbedingungen führt. Weiterhin beeinflusst jeder Laserpuls bei größer werdender Maskenöffnung die zuvor strukturierten Bereiche, was Formabweichungen bedingen kann.

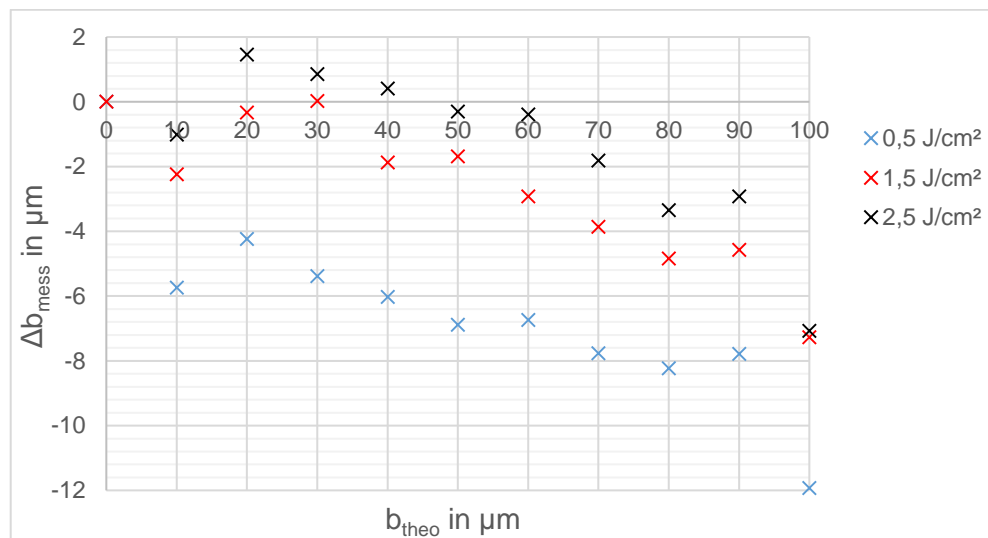
Wie in Abb. 4.4 zu sehen ist, werden mit höher werdender Laserpulsfluenz auch die Abträge breiter. Die Messwerte, die bei  $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$  generiert wurde, weichen so stark ab, da die verwendete Laserpulsfluenz nur wenig größer als die materialspezifische Schwellfluenz ist. Dadurch kann es vorkommen, dass in den Randbereichen der Abbildung die Schwellfluenz nicht überschritten wird und somit der Abtrag kleiner wird. Weiterhin ist die Differenz der Messwerte bei  $0,5 \text{ J/cm}^2$  zu  $1,5 \text{ J/cm}^2$  deutlich größer als die Differenz der Werte bei  $1,5 \text{ J/cm}^2$  zu  $2,5 \text{ J/cm}^2$ , was bedeutet, dass eine weitere Erhöhung der Laserpulsfluenz die Abtragsbreite nicht nennenswert beeinflussen wird. Der Anstieg der linearen Regressionsgeraden ist gleich, somit wirkt sich eine Änderung der Laserpulsfluenz unabhängig von der Blendenpositionen gleichmäßig auf alle Abträge aus.



**Abb. 4.4** Abhängigkeit der gemessenen Abtragsbreite in Abhängigkeit von der theoretischen Abtragsbreite und der Laserpulsfluenz

Abb. 4.5 zeigt die Abhängigkeit der Maßabweichung der Abtragsbreiten  $\Delta b_{\text{mess}}$  von der Laserpulsfluenz und der theoretischen Abtragsbreite  $b_{\text{theo}}$ . Eine negative Abweichung steht für

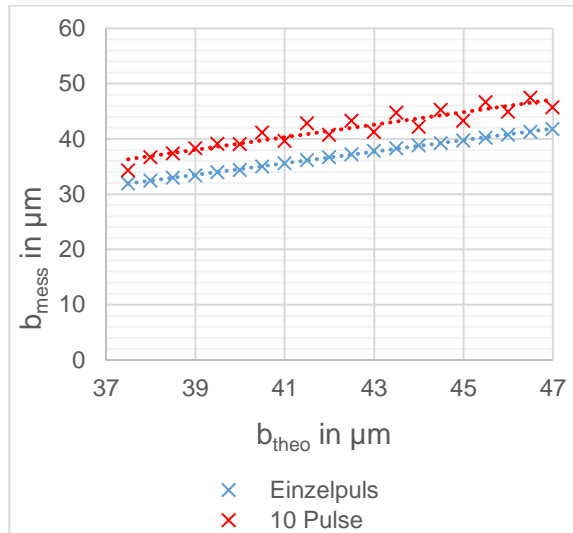
eine Abtragsbreite, die kleiner als der theoretische Wert ist. Mit steigender Laserpulsfluenz nähern sich die Abtragsbreiten den theoretischen Werten an. Es wird deutlich, dass sich ab  $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$  und bis zu einer theoretischen Abtragsbreite von ca.  $50 \mu\text{m}$  Abweichungen von unter bzw. ca.  $2 \mu\text{m}$  ergeben, was einem Fehler von rund 4 % entspricht. Wird die Blende weiter verfahren, so nimmt der Fehler in der Abtragsbreite zu. Dies kann ein Resultat der inhomogenen Leistungsverteilung im Abtragsfeld sein.



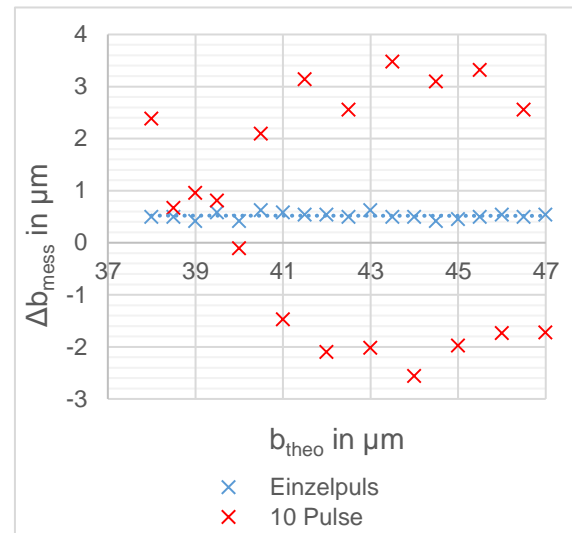
**Abb. 4.5** Abweichung der gemessenen Abtragsbreiten vom theoretischen Wert bei unterschiedlichen Laserpulsfluenzen

#### 4.1.5 Positioniergenauigkeit der dynamischen Maske

Für die Überprüfung der Positioniergenauigkeit wird die dynamische Maske zwischen den Abträgen um  $13,3 \mu\text{m}$  verschoben, was einer Verschiebung der Abtragskante auf dem Substrat von circa  $0,5 \mu\text{m}$  entspricht. Die Abträge werden bei  $H = 2 \text{ J/cm}^2$  generiert. Für die Messreihe „10 Pulse“ beträgt die Repetitionsrate 200 Hz. In Abb. 4.6 ist die gemessene Abtragsbreite in Abhängigkeit von der theoretischen Abtragsbreite und der Anzahl der eingebrachten Pulse dargestellt. Wie erwartet, haben beide linearen Regressionsgeraden einen vergleichbaren Anstieg. Die Einzelpulsabträge sind jeweils kleiner, da jeder weitere Laserpuls auch die Flanken des Abtrages beeinflusst. Es fällt auf, dass die Abtragsbreiten bei 10 Pulsen mehr um die lineare Regressionsgerade schwanken.



**Abb. 4.6** Positioniergenauigkeit von Einzelpulsabtrag und Abtrag mit 10 Pulsen



**Abb. 4.7** Änderung der Abtragsbreiten von Einzelpulsabtrag und Abtrag mit 10 Pulsen

Abb. 4.7 stellt die Änderung der gemessenen Abtragsbreite bezogen auf den vorherigen Abtrag in Abhängigkeit von der theoretischen Abtragsbreite dar und verdeutlicht so diese Schwankung. Theoretisch sollte die sich ergebende lineare Regressionsgerade parallel zur Abszisse verlaufen und die Ordinate bei  $0,5 \mu\text{m}$  schneiden, also einen Mittelwert darstellen. Bei 10 Pulsen pro Abtrag stimmt allerdings keiner der Messwerte mit dieser Theorie überein. Zusätzlich sind die Werte alternierend. Dies kann ein Resultat aus dem Nachschwingprozess der verfahrenen y-Achse des Koordinatentischs und/ oder der B-Achse der Bewegungseinrichtung sein. Dafür spricht, dass trotz der großen Schwankungen alle Abträge breiter sind, als die Einzelpulsabträge. Um die genaue Ursache zu klären, müssen im Programmcode Verweilzeiten nach der jeweiligen Achsbewegung vorgesehen werden oder die Verfahrensgeschwindigkeit der y-Achse verringert werden. Da die lineare Regressionsgerade der Einzelpulsabträge hingegen nahezu exakt mit der eingangs erwähnten Theorie übereinstimmt, erfüllt die Bewegungseinrichtung prinzipiell die geforderte Positionsgenauigkeit.

#### 4.1.6 Erhöhung der Genauigkeit

Um die Ursache der Abweichungen in Abb. 4.7 herauszustellen, werden Pausenzeiten nach den Achsbewegungen eingebaut sowie die Verfahrensgeschwindigkeit der y-Achse variiert. Die dynamische Maske wird wieder um  $13,3 \mu\text{m}$  zwischen den Abträgen verschoben. Die Laserpulsfluenz beträgt jeweils  $1,3 \text{ J}/\text{cm}^2$ .

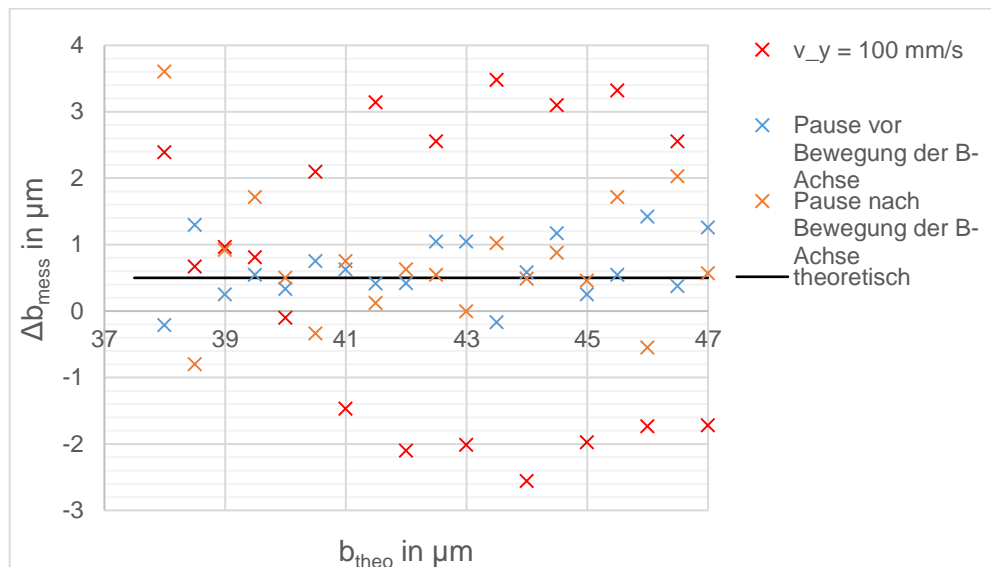


Abb. 4.8 Vergleich der Abweichungen mit Pausenzeiten

Die Werte der Datenreihe „ $v_y = 100 \text{ mm/s}$ “ sind von Abb. 4.7 übernommen und dienen als Referenz für die Abweichungen bei der mit einer Verfahrgeschwindigkeit von  $100 \text{ mm/s}$  verfahrenen y-Achse. Theoretisch sollten alle Werte bezogen auf den vorherigen Abtrag eine Abweichung von  $0,5 \mu\text{m}$  aufweisen. Nach dem CNC-Programm der Laseranlage wird erst die y-Achse verfahren, dann die B-Achse und zuletzt werden die 10 Laserpulse mit  $200 \text{ Hz}$  positionssynchron ausgelöst. Über die Pausenzeit vor oder nach der Bewegung der B-Achse wird demnach der Einfluss der Maskenbewegung auf die Genauigkeit des Abtrags untersucht. Es ist zu erkennen, dass die Pausenzeiten allgemein die Abweichung verringern. Allerdings ist es irrelevant, ob die Pausenzeit vor oder nach der Bewegung der Maske eingefügt wird. Somit kann die Abweichung nur ein Resultat des Nachschwingens der y-Achse sein, was nachfolgend untersucht wird.

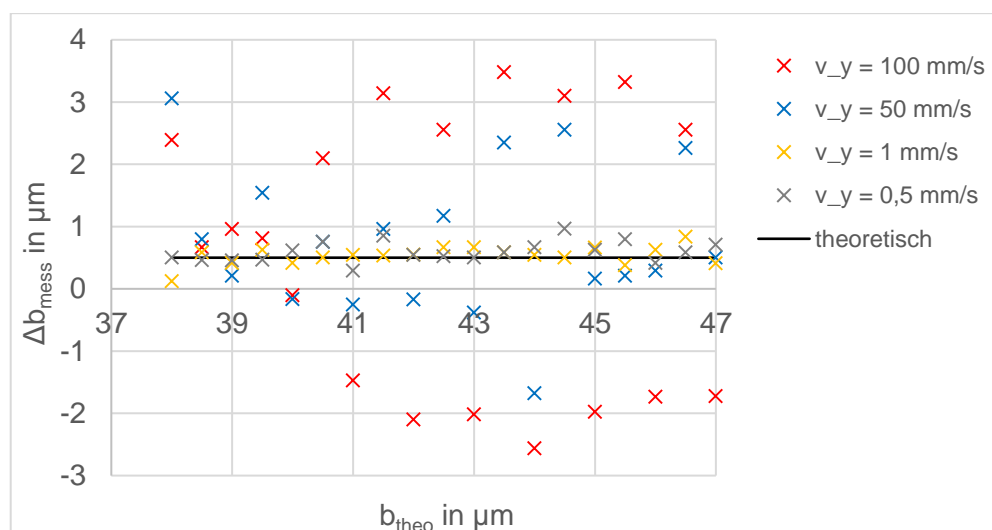


Abb. 4.9 Vergleich der Abweichungen bei unterschiedlichen Verfahrgeschwindigkeiten der y-Achse



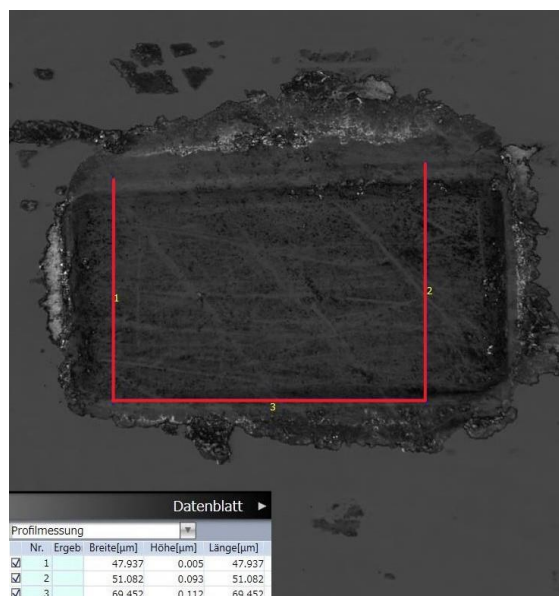
Die Datenreihe „ $v_y = 100 \text{ mm/s}$ “ dient wieder als Referenz. Nun ist zu erkennen, dass die Verfahrgeschwindigkeit der  $y$ -Achse einen großen Einfluss auf die Abtragsgenauigkeit hat. Während bei  $50 \text{ mm/s}$  weiterhin deutliche Abweichungen zum theoretischen Wert zu messen sind, liegen alle Messwerte bei den Verfahrgeschwindigkeiten  $v_y \leq 1 \text{ mm/s}$  innerhalb von  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  Abweichung um den theoretischen Wert. Auch kann so das Alternieren der Abweichungen deutlich verringert werden. Es empfiehlt sich also, wenn während der Bearbeitung eine Bewegung der  $y$ -Achse unumgänglich ist, diese mit Verfahrgeschwindigkeiten im Bereich von  $1 \text{ mm/s}$  zu bewegen, um die Abweichungen zur theoretischen Abtragsbreite zu minimieren.

## 4.2 Optimierung der Bewegungseinrichtung

Während der Justage und den Tests der Bewegungseinrichtung traten die nachfolgend beschriebenen Probleme auf.

### Positioniergenauigkeit der Masken

Dieses Problem der relativen Ausrichtung zueinander betrifft die beiden Masken und das Schienenführungssystem, da für eine genaue Strukturierung die Kanten der Masken exakt parallel zur Schienenführung ausgerichtet sein müssen. Die Ausrichtung wurde mit einem Digitalmikroskop durchgeführt. Jedoch wurde diese Ausrichtung bereits durch das Anziehen der Verschraubung verändert und konnte daher nur auf minimal  $50 \mu\text{m}$  genau eingestellt werden. Aus diesem Grund sind die Projektionsmasken nicht deckungsgleich. Wie bereits erwähnt, ist die dynamische Maske, bezogen auf die statische Maske, verdreht.



**Abb. 4.10** Abtrag mit eingezeichneten Profilschnitten ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $b_{\text{theo}} = 50 \mu\text{m}$ )

Der exakte Maskenverdrehwinkel ist über den Abtrag nur grob bestimmbar. In Abb. 4.10 ist die Messung beispielhaft dargestellt. Der Maskenverdrehwinkel berechnet sich aus den Längen der im Datenblatt angegebenen Messtrecken  $MS$ :

$$\gamma_M = \arctan \frac{MS_2 - MS_1}{MS_3} \quad (4.2)$$

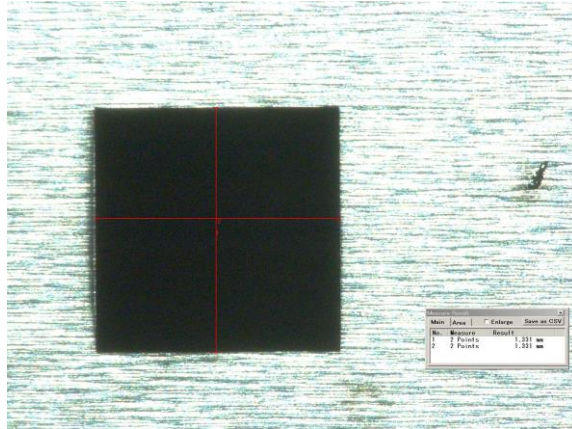
Hierfür wurde wieder die untere Abtragskante als Referenz gewählt. Von dieser aus wird an zwei Punkten der Abstand zur oberen Kante gemessen ( $MS_1$  und  $MS_2$ ) sowie der Abstand der entstandenen Profilschnitte bestimmt ( $MS_3$ ). Nachfolgend wird die Differenz der Abstandsmessungen gebildet und durch den Abstand der Profilschnitte geteilt. Der Arkustangens dieses Quotientens liefert nun den Maskenverdrehwinkel, der für den Abtrag in Abb. 4.10 bei  $2,6^\circ$  und im Mittel bei ca.  $3^\circ$  liegt. Somit wird eine andere Art der Fixierung notwendig, die eine genauere Einstellung des Verdrehwinkels der Masken erlaubt. Dahingehend erweist sich auch die Verwendung der Laschen an den Masken als ungünstig, da diese die nachträgliche Ausrichtung limitieren. Das wiederum bedeutet, dass eine exakte Positionierung und hohe Flexibilität bei der Maskenwahl nicht mit dem gleichen Fixierungsmechanismus erreichbar sind. Weiterhin wird die Verwendung von Positionsmarken (bspw. in Kreuzform) empfohlen, um die Ausrichtung zu erleichtern. Diese können in den Randbereich der Maskenfläche eingebracht werden, da sie dort keinen Einfluss auf den generierten Abtrag im Substrat haben.

### **Maskengröße**

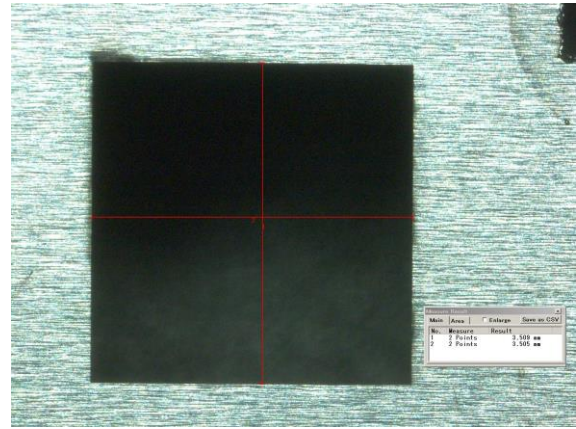
Um den Einfluss fehlerhafter Justage zu minimieren, sollte die dynamische Maske in beiden Dimensionen größer als die statische Maske sein. Sind beide Masken gleich groß und relativ zueinander verdreht, so beeinflusst dies mindestens zwei Kanten des Abtrags. Dieser Fehler ist auch in den Abtragsbildern Abb. 4.2 und Abb. 4.10 zu erkennen. Zusätzlich zur oberen Kante wird auch die linke Kante von der dynamischen Maske vorgegeben und ist dadurch zur unteren Kante mehr als die theoretischen  $90^\circ$  geneigt. Ist die dynamische Maske jedoch deutlich größer, so beeinflusst ein Winkelfehler nur die obere Abtragskante.

### Geänderte Projektionsmasken

Die nun verwendeten Projektionsmasken sind ebenfalls in 50 µm dicke Tantalfolie mit einem Ultrakurzpuls-Laser geschnitten. Es erfolgte eine Verkleinerung der statischen Maske, um die Größe des Abtrages auf 50 x 50 µm<sup>2</sup> zu limitieren, wohingegen die dynamische Maske vergrößert wurde.



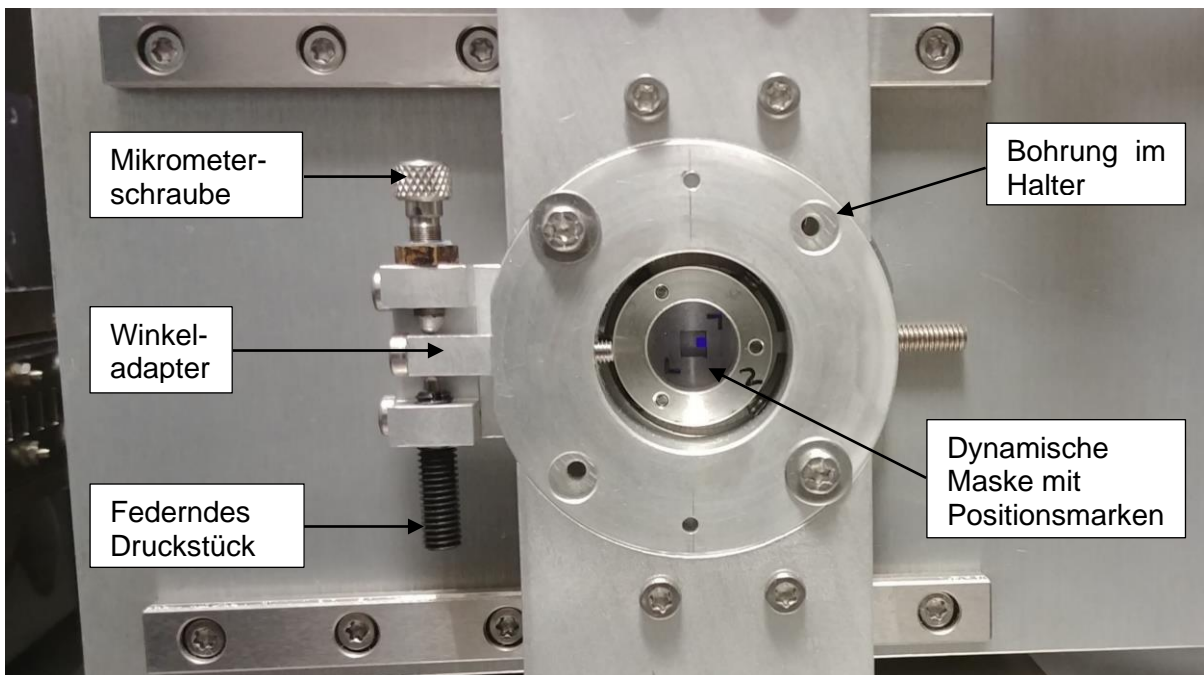
**Abb. 4.11** Statische Maske; horizontal 1,331 mm, vertikal 1,331 mm



**Abb. 4.12** Dynamische Maske; horizontal 3,509 mm, vertikal 3,505 mm

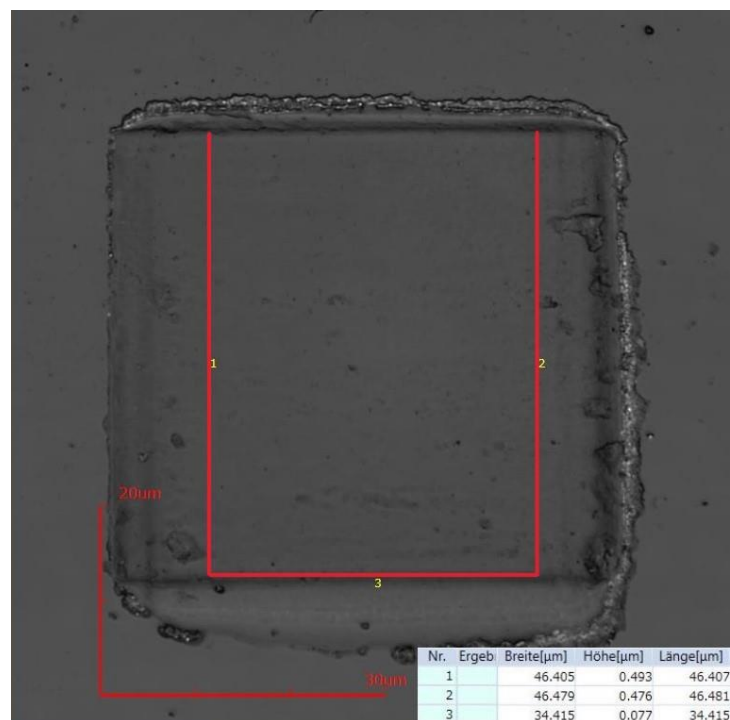
### Konstruktive Änderungen an der Bewegungseinrichtung

Die Problematik des Maskenverdrehwinkels wird mit einer Justageeinheit gelöst, die an den Träger der dynamischen Maske geschraubt wird (siehe Abb. 4.13). Aufgrund des begrenzten Platzes vor der Bewegungseinrichtung (10 mm zwischen der Trägeroberfläche und der vorgelagerten Feldlinse) kann diese nur seitlich am Träger befestigt werden. Die Justageeinheit besteht aus einem Winkeladapter, einer Mikrometerschraube und einem dazu konzentrischen, federnden Druckstück. Die lineare Bewegung der Mikrometerschraube wird über den Winkeladapter, der an den Halter der dynamischen Maske geschraubt ist, in eine Rotation umgewandelt. Dies ist nur möglich, da die Bohrung im Träger als Spielpassung gefertigt wurde. Somit wird eine eventuelle Linearbewegung des Halters hinreichend gering und eine Verdrehung der Mikrometerschraube resultiert direkt in einer Rotationsbewegung der dynamischen Maske. Das federnde Druckstück presst dabei den Winkeladapter gegen die Mikrometerschraube. Da bisher ein minimaler Maskenverdrehwinkel von ca. 3° einstellbar war, wurde die Justageeinheit auf eine mögliche Rotation des Halters von ± 5° dimensioniert. Um den Halter trotz der Rotationsbewegung zu fixieren, werden die entsprechenden Bohrungen vergrößert und die Fixierschrauben mit Unterlegscheiben versehen, da deren Kopfdurchmesser nur wenig größer als die neuen Bohrungen sind (siehe Abb. 4.13). Die vorher eingesetzten Positionierstifte wurden entfernt.



**Abb. 4.13** Justageeinheit am Träger der dynamischen Maske und geänderte dynamische Maske

Zum Test der Justageeinheit wurde der Abtrag wie bereits in Abb. 4.10 vermessen.



**Abb. 4.14** Abtrag mit eingezeichneten Profilschnitten nach Einbau der Justageeinheit

Aus den Längen der eingezeichneten Profilschnitte berechnet sich der Maskenverdrehwinkel nach dem Einbau der Justageeinheit mit der Formel 4.2 zu  $\gamma_M = 0,1^\circ$ . Somit kann nun der Maskenverdrehwinkel hinreichend genau eingestellt werden.

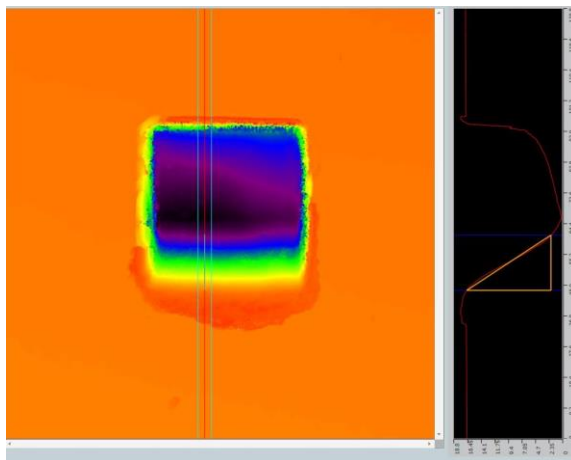
### 4.3 Optimierung des Strukturierungsprozesses

#### Fokussachführung

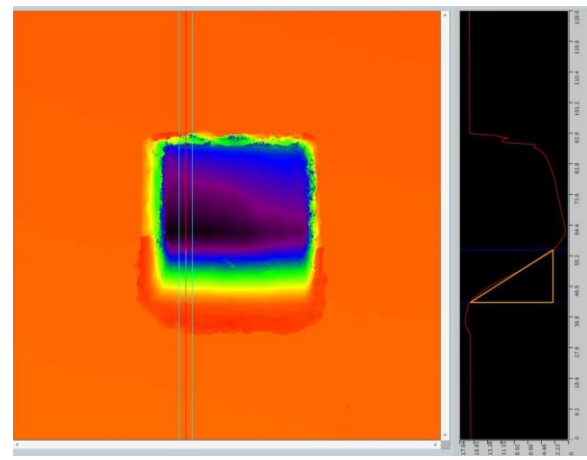
Die Schärfentiefe des Objektivs limitiert die Tiefe der Strukturen bei gleichen Abtragsbedingungen auf ca. 20  $\mu\text{m}$ . Damit Strukturierungstiefen  $> 30 \mu\text{m}$  mit definiertem Abtrag erreicht werden können, muss die Fokusebene nachgeführt werden. Im CNC-Programm wird nach jedem erfolgten Abtrag die z-Position des Koordinatentischs korrigiert. Der Korrekturwert ergibt sich aus dem Produkt des voreingegebenen Werts der Abtragstiefe pro Puls bei der jeweiligen Laserpulsfluenz und Repetitionsrate (siehe Abb. 4.21) und der Anzahl der Pulse pro angefahrener Maskenposition. Der Einfluss des Umlenkspiels der z-Achse auf die ersten Fokussachführungen wird umgangen, indem der Koordinatentisch vor dem Beginn der Strukturierung erst deutlich weiter abgesenkt wird (negative z-Richtung) und daraufhin die erste Bearbeitungsposition anfährt.

#### Pausenzeiten

Im Strukturierungsprogramm wird zuerst der Laserpuls ausgelöst, danach wird die z-Position korrigiert und abschließend die dynamische Maske bewegt. Die Strukturierung erfolgt damit positionssynchron. Die y-Achse wird während der Strukturierung nicht verfahren. Für die Maskenbewegung wurde bereits in 4.1.6 festgestellt, dass Pausenzeiten das Strukturierungsergebnis nicht beeinflussen. Wie in Abb. 4.16 zu sehen ist, trifft dies auch für die Bewegung der z-Achse zu. Der Flächenneigungswinkel ist mit und ohne Pausenzeit gleich. Die Tiefe der Strukturen und deren Rauheit sind ebenfalls identisch. Somit ist gezeigt, dass die Struktur mit maximaler Bearbeitungsgeschwindigkeit erzeugt werden kann, ohne dass das Ergebnis variiert.



**Abb. 4.15** Falschfarbendarstellung eines Abtrags ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta b = 300 \text{ nm}$ ); 0,5 s Pause nach Verfahren der z-Achse;  
 $\gamma = 42^\circ$ ;  $S_q = 10 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$



**Abb. 4.16** Falschfarbendarstellung eines Abtrags ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta b = 300 \text{ nm}$ ); ohne Pause nach Verfahren der z-Achse;  
 $\gamma = 42^\circ$ ;  $S_q = 10 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$

#### 4.4 Auswertung der Flächen mittels MATLAB-Programm

Für die Untersuchung der strukturierten Flächen muss die Punktwolke mit den Höheninformationen (z-Werte) der einzelnen Messpunkte entkippt werden. Die Auswertungssoftware des Laserscanning-Mikroskops Olympus Lext OLS4100 ermöglicht dies zwar grundsätzlich, allerdings resultiert die Entkippung einer Fläche mit großem Neigungswinkel und damit, senkrecht zur Substratoberfläche gesehen, kleinem Messbereich in Darstellungsfehlern. Um dennoch alle Flächen einheitlich auswerten zu können, wurde ein Auswertungsalgorithmus mit *MATLAB* geschrieben, einem Programm der Firma *MathWorks*.

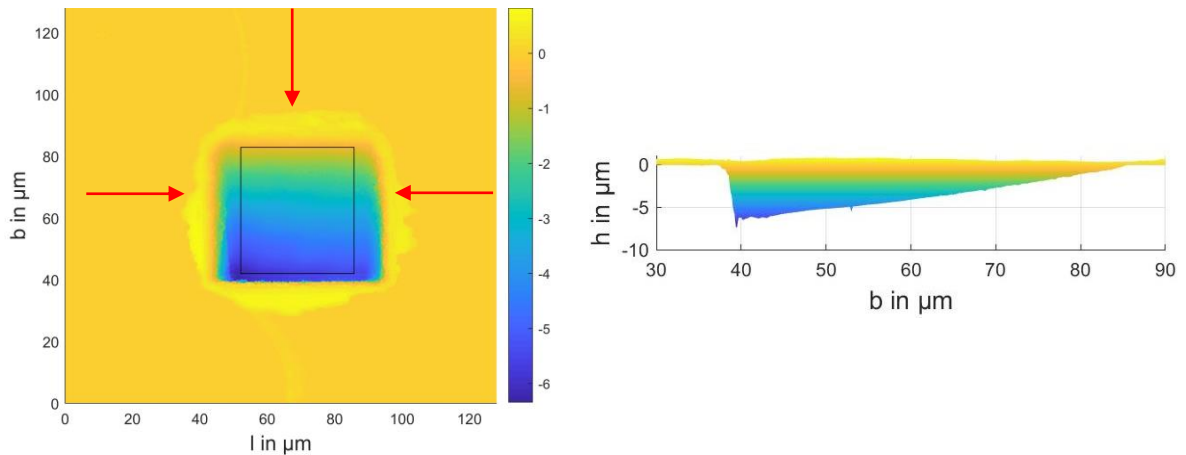
Die Darstellungen im folgenden Abschnitt beziehen sich auf eine bei  $1,5 \text{ J/cm}^2$  und mit  $\Delta b = 800 \text{ nm}$  strukturierte Fläche. Der laterale Versatz der für die Fläche relevanten Abtragskante  $\Delta b$  berechnet sich über Formel 4.3 aus der Bewegung der dynamischen Maske zwischen zwei Abtragspositionen  $\Delta B$  und dem Abbildungsmaßstab  $\beta$ . Dieser Versatz wird nachfolgend als Abtragsverschiebung bezeichnet.

$$\Delta b = \frac{\Delta B}{\beta} \quad (4.3)$$

Um die Messpunktwolke für die Auswertung aufzubereiten, wird zunächst die Substratoberfläche entkippt und in die b-l-Ebene verschoben. Nachfolgend wird der Bereich in der Höhenmatrix selektiert, der die strukturierte Fläche repräsentiert (siehe Abb. 4.17). Für die Grenzen in Richtung der Abtragslänge  $l_{\max}$ ,  $l_{\min}$  und in Richtung der Abtragsbreite  $b_{\max}$  wird dabei entlang des jeweiligen Pfeils von Rand der Höhenmatrix zum Zentrum hin nach dem zehnten z-Wert gesucht, für den gilt:

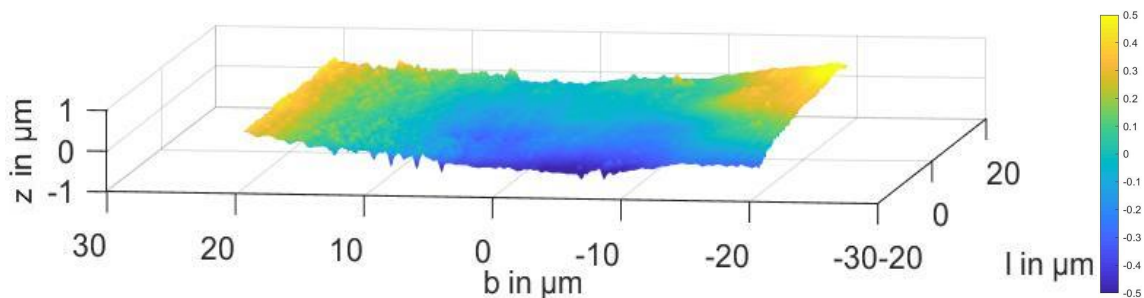
$$z \leq \frac{z_{\max}}{15} \quad (4.4)$$

Dabei steht  $z_{\max}$  für die maximale Tiefe der Struktur, d.h. für den Abstand zwischen dem größten und kleinsten z-Wert. Der zehnte Wert wird gewählt, da somit ausgeschlossen werden kann, dass der Messbereich durch Messfehler (Peaks) fälschlicherweise zu groß dimensioniert wird. Dieser Wert liegt nun mit hinreichender Sicherheit in einer Flanke der Struktur. Mit einem zusätzlichen Offset-Wert zum jeweiligen z-Wert von  $7,5 \mu\text{m}$  für  $l_{\min}$  und  $l_{\max}$  bzw.  $1,25 \mu\text{m}$  für  $b_{\max}$  ergeben sich drei Grenzwerte des Messbereichs.  $b_{\min}$  ergibt sich aus der Summe des Offsets von  $1,25 \mu\text{m}$  und dem b-Wert des tiefsten Punkts der Struktur. Falls sich innerhalb der Fläche Störstrukturen befinden, kann  $b_{\min}$  auch manuell angepasst werden.



**Abb. 4.17** Abtrag mit selektiertem Messbereich und **Abb. 4.18** Seitliche Ansicht des Abtrags, Flächenneigungswinkel  $\gamma = 6,7^\circ$

Der Mittelpunkt dieses Bereichs wird für eine bessere Darstellung auf den Koordinatenursprung verschoben. Nachdem die Neigung der Fläche bestimmt wurde, kann diese mittels Rotation um die b-Achse und Verschiebung in z-Richtung so korrigiert werden, dass die Messpunkte im Mittel in der b-l-Ebene liegen (siehe Abb. 4.19).



**Abb. 4.19** Rotierte Fläche

Für die Berechnung der Flächenrauheit werden die Messwerte mit der folgenden zweidimensionalen, rotationssymmetrischen Gauß-Gewichtsfunktion  $s(x,y)$  nach DIN EN ISO 16610-61 [DIN1] gefiltert:

$$s(b_{Abst}, l_{Abst}) = \frac{1}{\varepsilon^2 \cdot \lambda_c^2} \cdot \exp \left[ -\frac{\pi}{\varepsilon^2} \left( \frac{b_{Abst}^2 + l_{Abst}^2}{\lambda_c^2} \right) \right] \quad (4.5)$$

Dabei ist

- $b_{Abst}$  der Abstand von der Mitte (Maximum) der Gewichtsfunktion in b-Richtung;
- $l_{Abst}$  der Abstand von der Mitte (Maximum) der Gewichtsfunktion in l-Richtung;
- $\lambda_c$  die Grenzwellenlänge oder cut-off-Wellenlänge;
- $\varepsilon$  die Konstante, um die 50 % Übertragungseigenschaft bei der Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  zur Verfügung zu stellen.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \quad (4.6)$$

Weiterhin wird die Gewichtsfunktion nur im Bereich von

$$-L_c \cdot \lambda_c \leq \sqrt{b_{Abst}^2 + l_{Abst}^2} \leq L_c \cdot \lambda_c \quad (4.7)$$

wiedergegeben, wobei  $L_c$  der Abschneideindex der Gauß-Gewichtsfunktion ist. Dieser Index hat einen direkten Einfluss auf den Implementierungsfehler der Gewichtsfunktion und liegt zwischen 0,5 und 1. Für den im Algorithmus verwendeten Abschneideindex  $L_c = 1$  wird in DIN EN ISO 16610-21:2012 ein Implementierungsfehler von  $9,47 \cdot 10^{-6} \%$  angegeben [DIN2], was hinreichend gering ist.

Das Welligkeitsprofil wird aus der Faltung der Gewichtsfunktion  $s(x,y)$  mit der Messpunkt wolke nach Formel 4.8 berechnet.

$$z_{Well} = z * s \quad (4.8)$$

Das Rauheitsprofil ergibt sich aus der Subtraktion des Welligkeitsprofils von der Messpunkt wolke zu:

$$z_{Rau} = z - z_{Well} \quad (4.9)$$

In den Endabschnitten eines offenen Profils bzw. einer offenen Oberfläche können unbeabsichtigte Änderungen des Filter-Ansprechverhaltens auftreten, welche gemäß DIN EN ISO 16619-28:2016 [DIN3] als Endeffekte bezeichnet werden. Da das verwendete Gauß-Flächenfilter keine automatische Endeffektkorrektur beinhaltet, muss nach [DIN3] entweder der Endeffektbereich kompensiert werden oder die Filtergleichung darf nicht auf die gesamte Oberfläche angewendet werden. Aus diesem Grund ist im Auswertungsalgorithmus eine Verkleinerung der Oberfläche des Rauheitsprofils um  $\lambda_c/2$  in jedem Endeffektbereich vorgesehen. Da die Auswertung der Höhenmatrix mit drei verschiedenen Grenzwellenlängen erfolgen soll ( $\lambda_c = (2,5; 8; 25) \mu\text{m}$ ), ergeben sich somit auch drei verschieden große  $z_{Rau}$ -Matrizen (siehe Achseneinteilung Abb. 4.20). Diese Verkleinerung der Messpunkt wolke ist auch die Ursache dafür, dass bei großen Flächenneigungswinkeln und damit, senkrecht zur Substratoberfläche gesehen, sehr schmalen Strukturen die restlichen Messpunkte nicht aus-



reichen, um eine Flächenrauheit anzugeben. Basierend auf dem resultierenden Rauheitsprofil berechnet sich die mittlere quadratische Höhe nach DIN EN ISO 25178-2 [DIN4] zu:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint z_{\text{Rau}}^2(b, l) db dl} \quad (4.10)$$

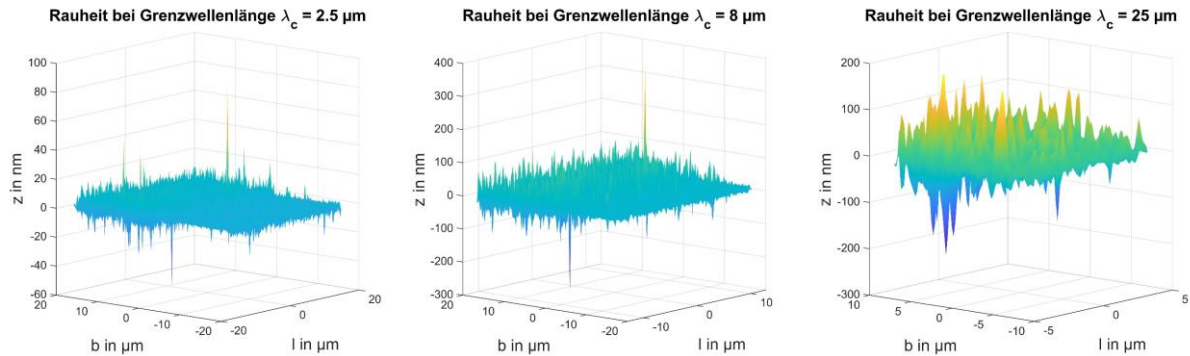


Abb. 4.20 Rauheitsprofile;  $S_q = 2,1 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $S_q = 12,9 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 8 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $S_q = 22 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 25 \text{ }\mu\text{m}$

## 4.5 Parameterstudie

Da sich die Position der optischen Elemente im Strahlengang seit der Untersuchung von Bertram geändert hat, wurde die Abtragstiefe pro Puls  $h_P$  und pro Laserpulsfluenz erneut gemessen und um weitere Repetitionsraten ergänzt. Dabei berechnet sich die Schwellfluenz für D263T zu  $H_s = 0,25 \text{ J/cm}^2$ . Dieser Wert liegt unter der Schwellfluenz, die Bertram angibt.

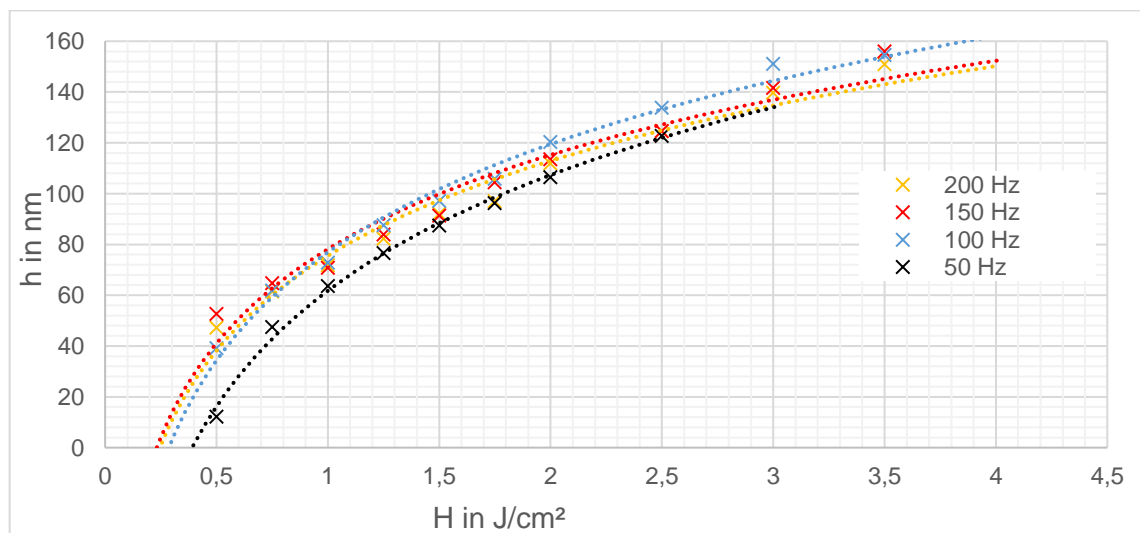


Abb. 4.21 Abtrag pro Puls in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz und der Repetitionsrate

Wie bereits beschrieben, erfolgt die Bearbeitung positionssynchron. Damit ist die Repetitionsrate kein direkt einstellbarer Prozessparameter, sondern ergibt sich aus der Masken-

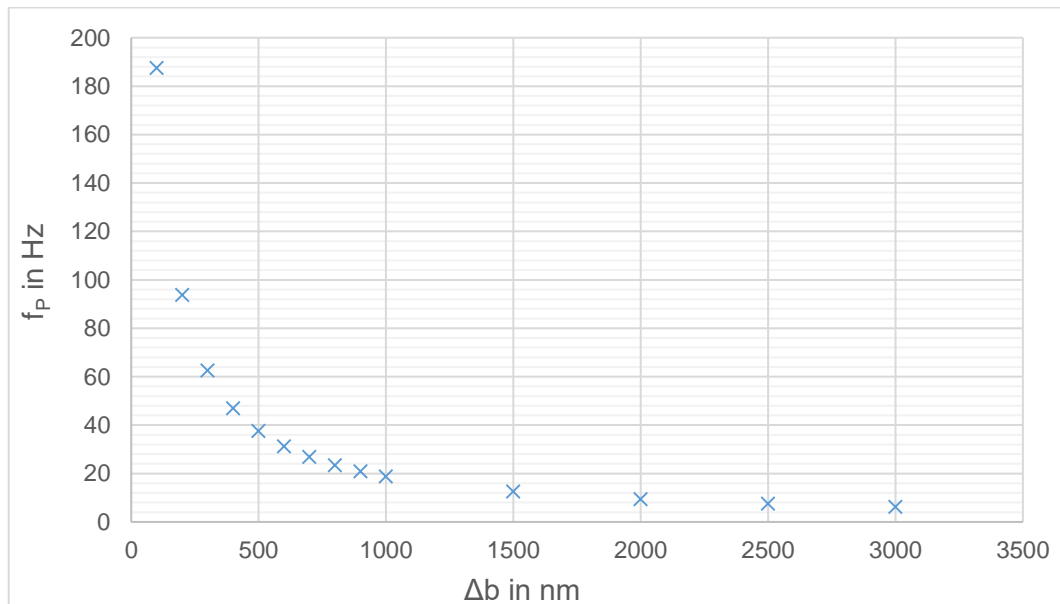
verschiebung  $\Delta B$  und der Verfahrensgeschwindigkeit  $v_B$  der dynamischen Maske sowie den Parametern für den Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgang. Für die Approximation der Repetitionsrate wird die folgende Formel genutzt:

$$f_P = \frac{v_B}{\Delta B} \quad (4.11)$$

$v_B$  beträgt für alle geneigten Flächen in dieser Arbeit 0,5 mm/s. Mit Formel 4.3 ergibt sich:

$$f_P = \frac{v_B}{\Delta b \cdot \beta} \quad (4.12)$$

Die unterschiedlichen  $\Delta b$ -Werte resultieren in folgenden Repetitionsraten:

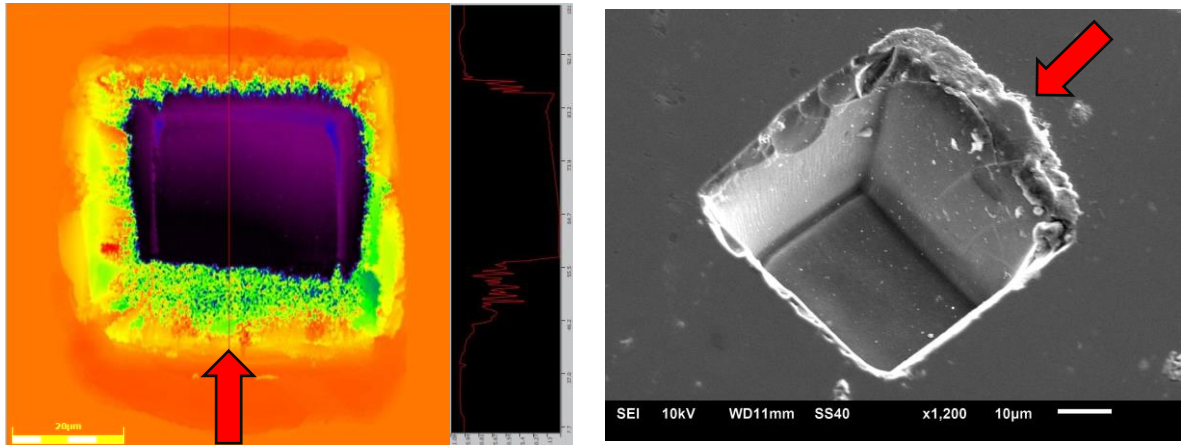


**Abb. 4.22** Repetitionsrate in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung

Es wird deutlich, dass die Repetitionsrate mit größer werdender Abtragsverschiebung geringer wird. Für die Repetitionsraten bei  $\Delta b > 300$  nm wird der Abtrag pro Puls und pro Laserpulsfluenz mit den Messwerten bei  $f_P = 50$  Hz approximiert.

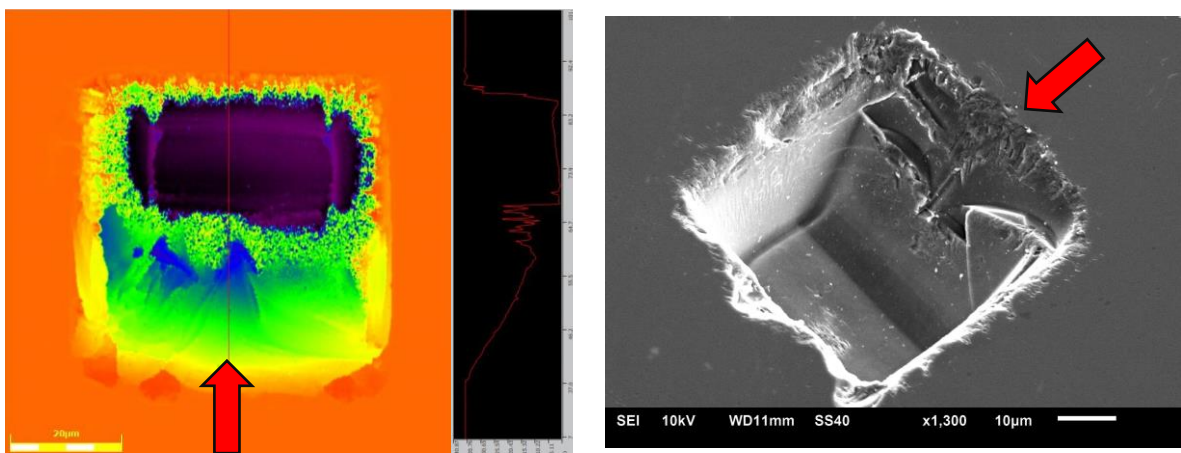
Die Tiefe der nachfolgend beschriebenen Strukturen wird im CNC-Programm auf  $h = 10 \mu\text{m}$  limitiert, da ab ca.  $h = 15 \mu\text{m}$  die Strukturen mit großem Flächenneigungswinkel zum Teil nicht mehr fehlerfrei mit dem Laserscanningmikroskop aufgenommen werden können, obwohl dieses laut den Herstellerangaben Flanken bis zu einer Neigung von  $85^\circ$  auflöst. Wie in Abb. 4.23 zu erkennen ist, kann die strukturierten Fläche (siehe Pfeil), die im Raster-

elektronenmikroskop (REM) als nahezu fehlerfrei dargestellt wird, nicht mittels Laserscanningmikroskop ausgewertet werden. Da der Flächenneigungswinkel hier nur bei ca.  $70^\circ$  liegt, könnten die Messfehler durch die geringe Oberflächenrauheit bedingt sein.



**Abb. 4.23** Falschfarbendarstellung (links) und REM-Aufnahme (rechts) eines Abtrags mit  $h = 36 \mu\text{m}$  ( $H = 2,25 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta x = 50 \text{ nm}$ )

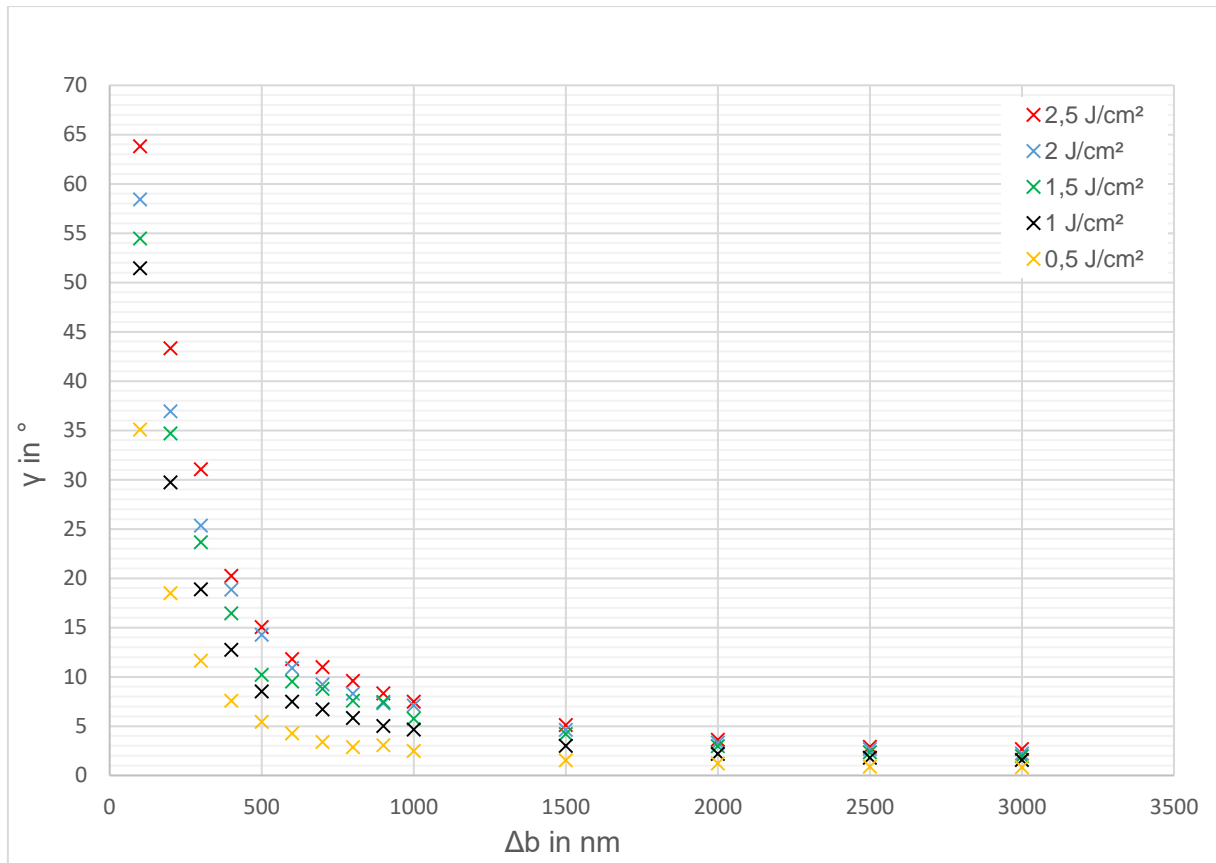
Weiterhin kommt es bei Abträgen mit einer Tiefe  $>15 \mu\text{m}$  mit erhöhter Wahrscheinlichkeit zu Ausplatzungen. Daher ist eine Auswertung dieser Abträge hinsichtlich Rauheit und Neigungswinkel nicht sinnvoll (siehe Abb. 4.24).



**Abb. 4.24** Falschfarbendarstellung (links) und REM-Aufnahme (rechts) eines Abtrags mit  $h = 36 \mu\text{m}$  ( $H = 2,25 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta x = 100 \text{ nm}$ )

### Flächenneigungswinkel $\gamma$

Nachfolgend wurde der Einfluss der Abtragsverschiebung und der Laserpulsfluenz auf den Flächenneigungswinkel untersucht.



**Abb. 4.25** Flächenneigungswinkel  $\gamma$  in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung und der Laserpulsfluenz

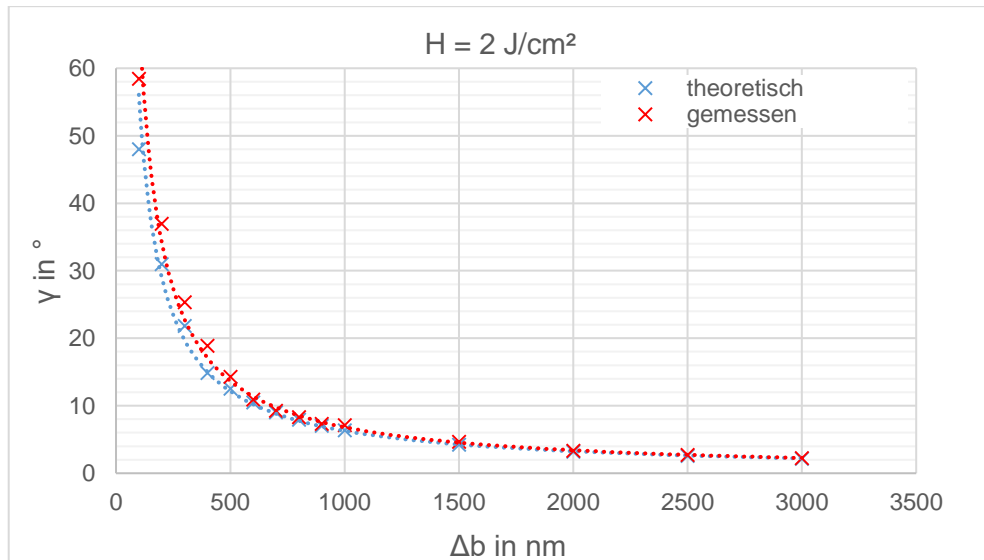
Aus Abb. 4.25 geht hervor, dass der Flächenneigungswinkel  $\gamma$  mit kleiner werdender Abtragsverschiebung und mit steigender Laserpulsfluenz steiler wird. Dies folgt dem theoretischen Zusammenhang der genannten Größen (vgl. Abb. 2.9 Schematische Darstellung der Spiegelfläche, strukturiert mit der vorgestellten Bewegungseinrichtung):

$$\tan \gamma = \frac{h_P}{\Delta b} \quad (4.13)$$

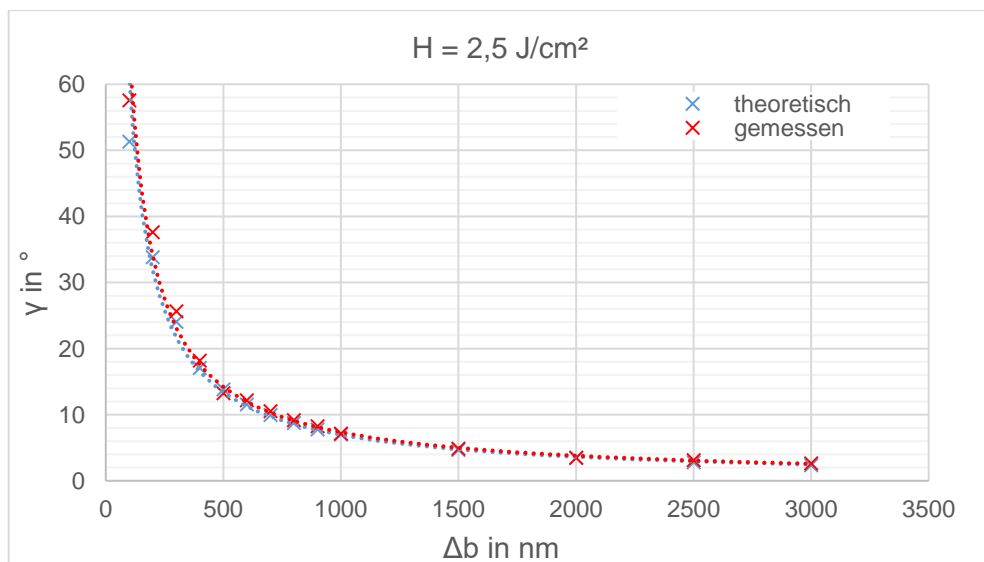
Wobei  $h_P$  für die Abtragstiefe pro Laserpuls steht (vgl. Abb. 4.21). Bei gegen 0 gehender Abtragsverschiebung und ausreichender Pulszahl würde sich theoretisch ein Flächenneigungswinkel von ca. 90° einstellen, wohingegen eine sehr große Abtragsverschiebung in ca. 0° resultiert. Weiterhin gilt, dass ein höherer Abtrag pro Puls, d.h. eine höhere Laserpulsfluenz, einen steileren Flächenneigungswinkel bedingt. Diese Tendenzen werden auch im obigen Diagramm ersichtlich. Die Messwerte für die Laserpulsfluenzen 0,75 J/cm<sup>2</sup>, 1,25 J/cm<sup>2</sup>,

1,75 J/cm<sup>2</sup>, 2,25 J/cm<sup>2</sup> und 2,75 J/cm<sup>2</sup> wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit dargestellt und befinden sich im Anhang.

Jedoch beschreibt die Formel 4.13 nicht alle experimentellen Ergebnisse, wie in Abb. 4.26 zu erkennen.



**Abb. 4.26** Vergleich der theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel bei  $H = 2 \text{ J/cm}^2$



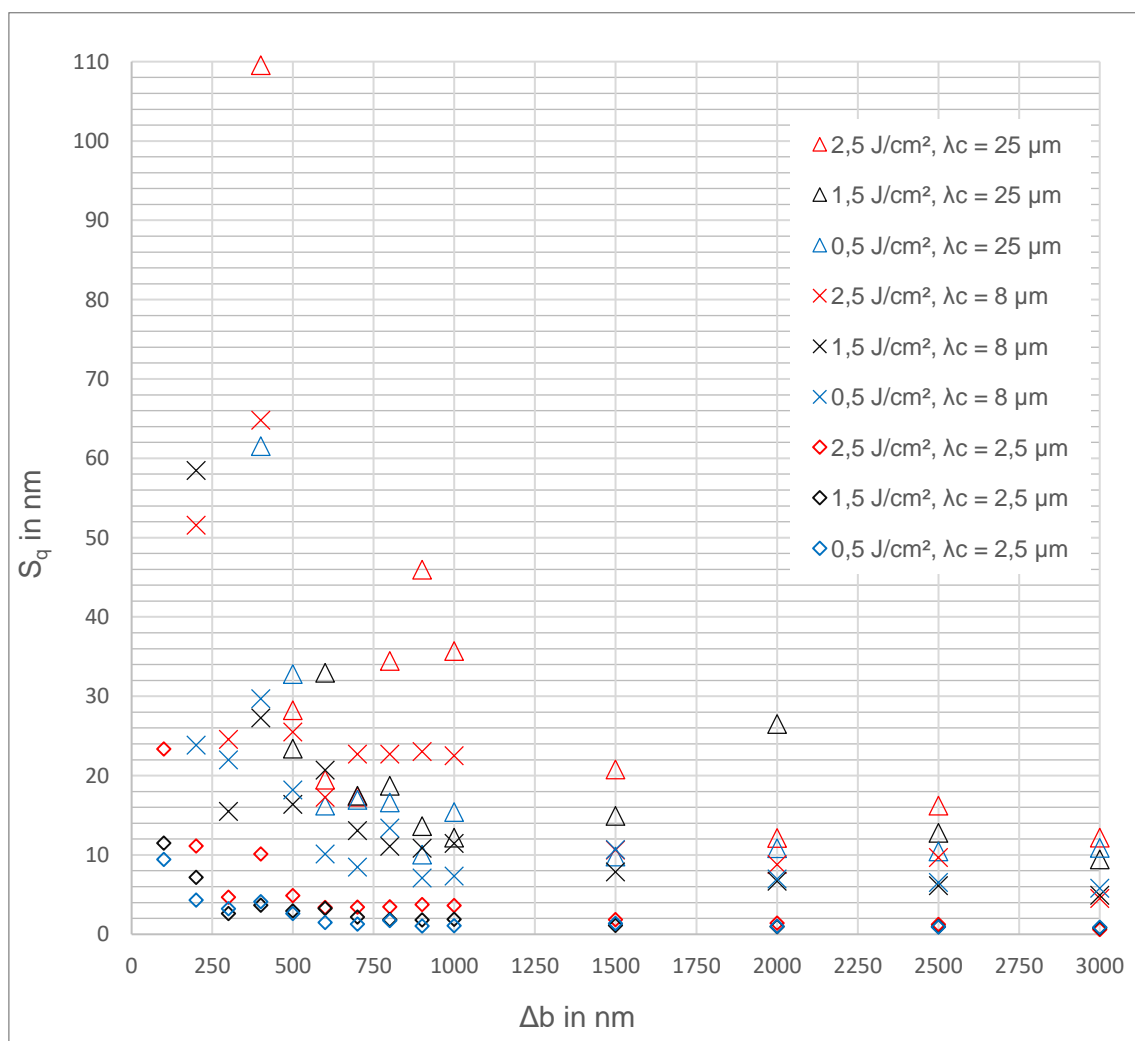
**Abb. 4.27** Vergleich der theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel bei  $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$

Abb. 4.26 und Abb. 4.27 zeigen jeweils den theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel für einen Parametersatz. Bei einer Abtragsverschiebung kleiner ca. 400 nm nimmt die Abweichung des gemessenen zum theoretischen Winkel erheblich zu, wobei der gemessene Wert stets größer ist. Ein Grund dafür kann sein, dass die Genauigkeit des Laserscanning-

Mikroskops bei sehr steilen und glatten Flächen geringer wird (vgl. Abb. 4.23). Weiterhin nimmt die Anzahl der Messpunkte bei steiler werdender Fläche und gleichbleibender Strukturtiefe ab, sodass die Breite der Messfläche einen Einfluss auf den gemessenen Flächenneigungswinkel hat, da die strukturierte Fläche eine Durchbiegung aufweist (vgl. Kapitel 4.7). Die genaue Ursache der Winkelabweichung sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Da die Genauigkeit der Ergebnisse in diesem Bereich der Abtragsverschiebung nicht verifiziert werden kann, wird auf diese in der folgenden Auswertung nicht näher eingegangen.

### Oberflächenrauheit $S_q$

Nachfolgend wird der Einfluss der Abtragsverschiebung und der Laserpulsfluenz auf die Oberflächenrauheit untersucht. Für die Filterung des Primärprofils (siehe Kapitel 4.4) werden im nachfolgenden Diagramm (Abb. 4.28) die Grenzwellenlängen von 2,5  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Oberflächenrauheiten der nicht in den Diagrammen dargestellten Flächen befinden sich im Anhang.

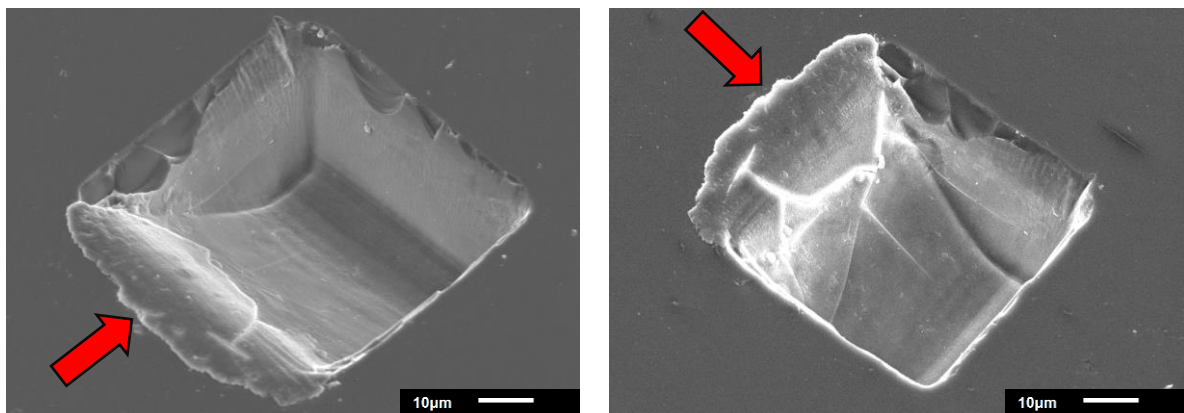


**Abb. 4.28** Oberflächenrauheit  $S_q$  in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung, der Laserpulsfluenz und der Grenzwellenlänge

Aus Abb. 4.28 geht hervor, dass die Oberflächenrauheit sowohl mit steigender Laserpulsfluenz als auch mit kleinerer Abtragsverschiebung größer wird. Weiterhin nimmt die Rauheit mit größer werdender Grenzwellenlänge zu, da dann Ortsfrequenzen mit betrachtet werden, die zuvor dem Welligkeitsprofil zugeordnet waren. Ab einer Abtragsverschiebung von  $\Delta b = 500$  nm wurde bei  $\lambda_c = 2,5$   $\mu\text{m}$  eine Oberflächenrauheit unter 8 nm erreicht. Die Rauheit befindet sich, bezogen auf die für Datenübertragung genutzte Wellenlänge von 850 nm (Designwellenlänge) [Sta06], in einem Bereich  $< \lambda/100$ . Somit kann davon ausgegangen werden, dass durch die in diesem Parameterfeld strukturierten Flächen die Phaseninformation der daran reflektierten Strahlung nahezu gleich bleibt. Der Flächenneigungswinkel ist in diesem Parameterbereich jedoch kleiner als  $15^\circ$  und die Flächen damit nicht als Umlenkspiegel nutzbar.

#### 4.6 Untersuchung einer als Umlenkspiegel geeigneten Fläche

Anhand von Abb. 4.25 und Abb. 4.28 wird deutlich, dass Flächen strukturiert werden können, die prinzipiell als  $90^\circ$  Umlenkspiegel nutzbar sind. Für eine qualitative Untersuchung werden mittels eines Rasterelektronenmikroskops Aufnahmen eines Abtrags der Tiefe  $h = 30$   $\mu\text{m}$  mit geeigneten Parametern erstellt.



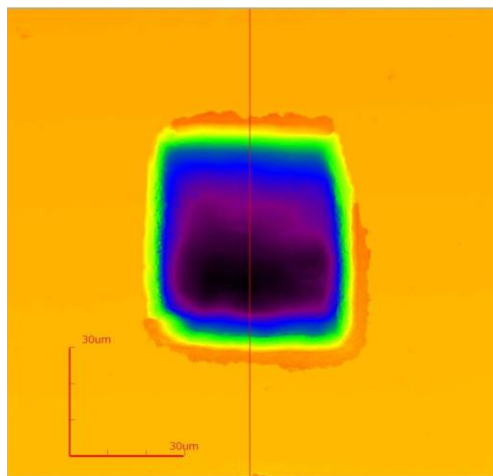
**Abb. 4.29** REM-Aufnahmen eines Abtrags mit  $h = 30$   $\mu\text{m}$  und  $\gamma = 38^\circ$  ( $H = 2,75$   $\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $\Delta b = 200$  nm),  $S_q = 18$  nm bei  $\lambda_c = 2,5$   $\mu\text{m}$

Die linke REM-Aufnahme in Abb. 4.29 verdeutlicht die Tiefe der Struktur, wohingegen das rechte Bild den Abtrag um  $90^\circ$  gedreht zeigt, um die strukturierte Fläche (siehe Pfeil) besser darzustellen. Es fällt auf, dass sich in der strukturierten Fläche Spannungsrisse bilden, die o.g. Ausplatzungen bedingen können. Eine Ursache dieser Risse kann die hohe verwendete Laserpulsfluenz sein. Weiterhin wird deutlich, dass der Neigungswinkel mit tiefer werdendem Abtrag und beginnend ab ca. 50% der maximalen Strukturtiefe geringer wird. Damit ist auch der gesamte Flächenneigungswinkel geringer als in der Parameterstudie ( $\gamma = 44,2^\circ$ , siehe Anhang) ermittelt. Zusätzlich zu der Leistungsschwankung des Lasers kann eine Ver-

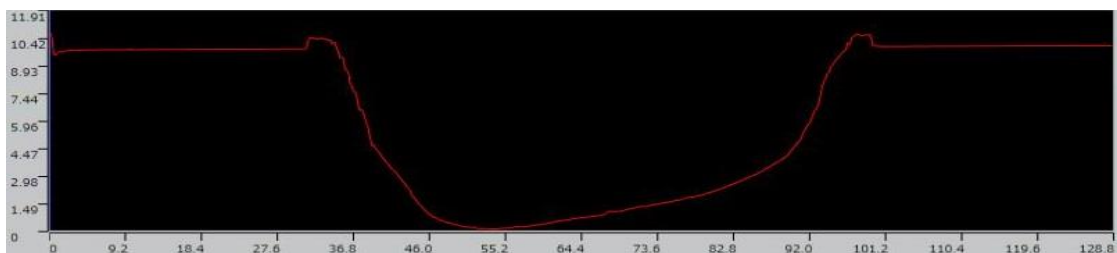
minderung der Laserpulsfluenz aus der zunehmenden Ablagerung von Debris am Objektiv resultieren. Weiterhin wirken aufgrund der Fokuspachführung die Abtragskanten als eine Maske, die den Laserstrahl abschattet und somit die für die Bearbeitung zur Verfügung stehende Laserleistung verringert. Diese Abschattung kann auch die Ursache für die Abplatzungen an den Abtragskanten sein. Die quantitative Auswertung der Fläche kann mittels Laserscanningmikroskop durchgeführt werden, da diese weder zu steil ist noch Ausplatzungen aufweist und ergibt eine Oberflächenrauheit von 18 nm, was ca.  $\lambda/45$  entspricht. Es können demnach prinzipiell Umlenkspiegel mit hinreichend geringer Rauheit hergestellt werden. Die Optimierung hinsichtlich erreichbarer Strukturiefen der geeigneten Parametersätze sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. In dieser Arbeit wird aufgrund der festgestellten Herausforderungen die Limitation auf  $h = 10 \mu\text{m}$  beibehalten.

#### 4.7 Ebenheitskorrektur der strukturierten Fläche

Die inhomogene Intensitätsverteilung im Laserstrahl (siehe Abb. 4.30) verhindert die Strukturierung einer exakt ebenen Fläche. Die reale Fläche ist ein Resultat aus der Überlagerung der durch die Abtragsverschiebung theoretisch entstehenden Fläche und der durch die Intensitätsverteilung bedingten Abtragsflanke (siehe Abb. 4.31, linke Flanke).



**Abb. 4.30** Falschfarbendarstellung eines Abtrags ( $h = 10 \mu\text{m}$ ,  $\Delta b = 0$ ) mit eingezeichnetem Profilschnitt

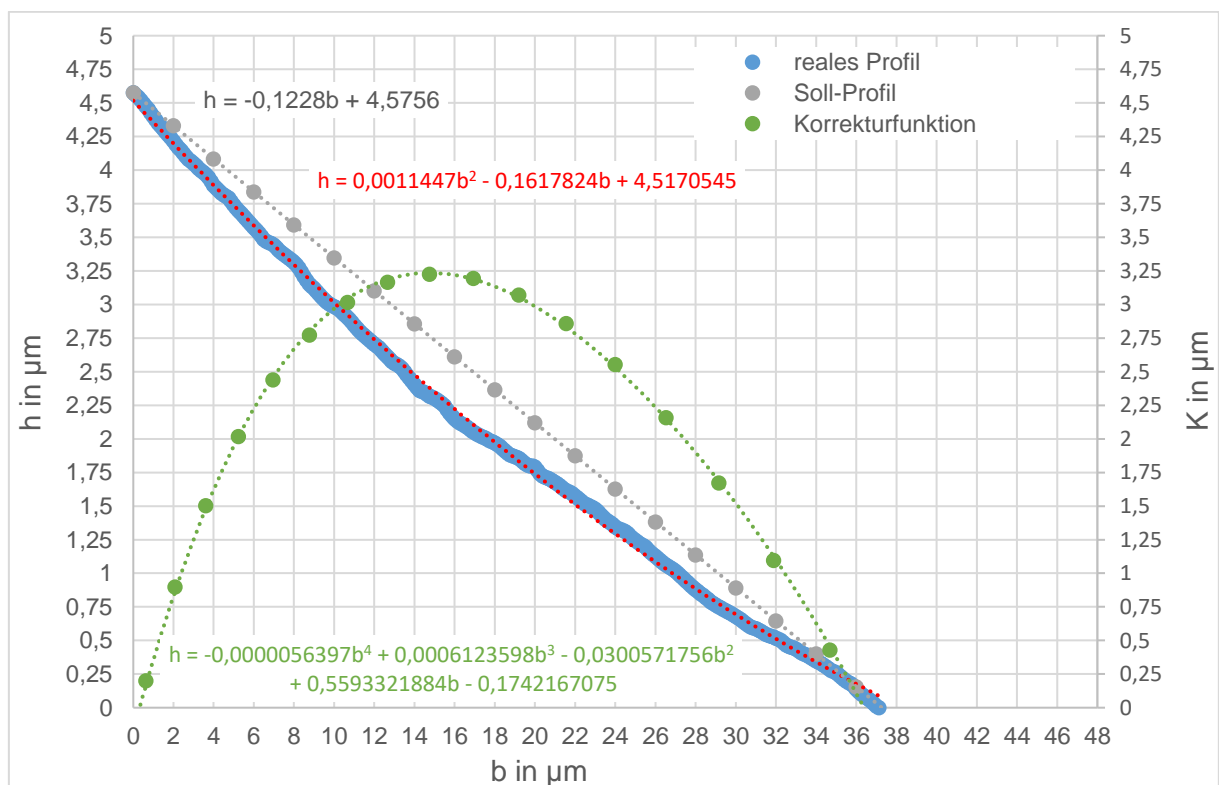


**Abb. 4.31** Profilschnitt durch Struktur mit  $\Delta b = 0$



Somit wird eine Korrektur der Fläche notwendig, die die Abweichungen kompensiert. Dies kann über eine Veränderung der Laserpulsfluenz oder der Maskenbewegung in Abhängigkeit der Maskenposition bzw. Abtragsposition erreicht werden. In den Bereichen der Fläche, wo die Flächenneigung zu groß ist, kann demnach entweder die Laserleistung und damit die Laserpulsfluenz am Bearbeitungsort verringert oder die Maskenbewegung zwischen zwei Abträgen vergrößert werden. Für die Nachregelung der Laserleistung muss jedoch der Leistungsmesskopf angefahren werden, d.h. die Strukturierung wird unterbrochen. Die Korrektur über die Maskenbewegung ist somit praktikabler, da eine Änderung der Abtragsverschiebung im Nanometerbereich den Strukturierungsprozess nicht beeinflusst.

Die Berechnung der Korrekturfunktion wird mittels des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel durchgeführt. Da der entsprechende Korrekturwert für jede Abtragsposition verschieden ist, wird für die Implementierung in das CNC-Programm der Laseranlage ein Polynom berechnet, das die Korrekturwerte mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2 > 0,99$  repräsentiert. Die Geradengleichung des Soll-Profiles berechnet sich mittels der Koordinaten des ersten Messpunktes des realen Profils und der Soll-Neigung der Fläche. Ein b-Wert des realen Profils berechnet sich aus der Mittelung der b-Werte von  $l = -7,5 \mu\text{m}$  bis  $l = +7,5 \mu\text{m}$  (vgl. Abb. 4.33). Der Korrekturwert für eine Abtragsposition entspricht dem Abstand der b-Werte des realen Profils und des Soll-Profiles bei dem gleichen h-Wert.

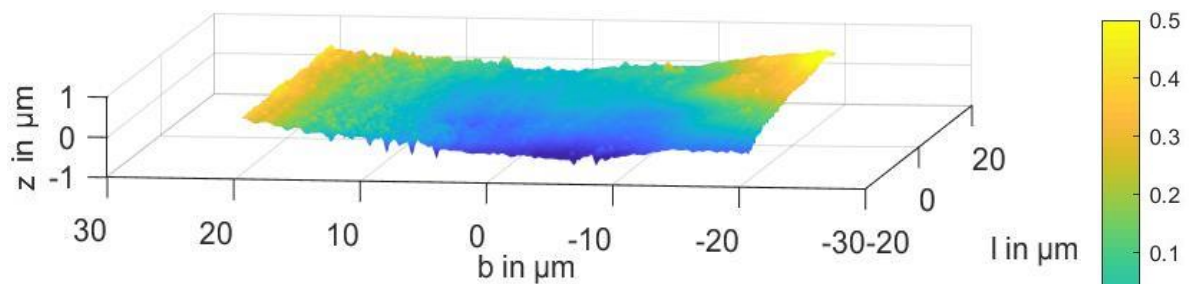


**Abb. 4.32** Bestimmung der Korrekturfunktion aus den b-Werten des realen Profils ( $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta b = 800 \text{ nm}$ ) und des Soll-Profiles

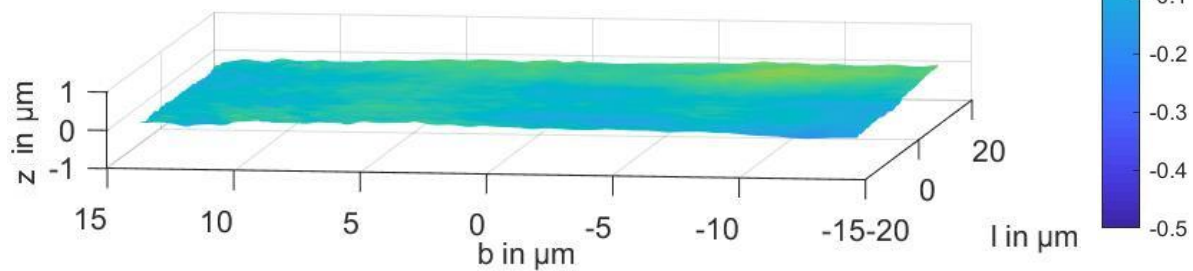
Im CNC-Programm wird nun zuerst die theoretisch nächste Abtragsposition mittels des festgelegten  $\Delta b$  berechnet und dieser Wert dann in die Korrekturfunktion eingesetzt. Die korrigierte Abtragsverschiebung  $\Delta b_{\text{korrr}}$  berechnet sich dann zu:

$$\Delta b_{\text{korrr}} = \Delta b + K_{\text{neu}} - K_{\text{alt}} \quad (4.14)$$

Dabei steht  $K_{\text{alt}}$  für den Korrekturwert der aktuellen Abtragsposition und  $K_{\text{neu}}$  für den Korrekturwert der nächsten Maskenposition.

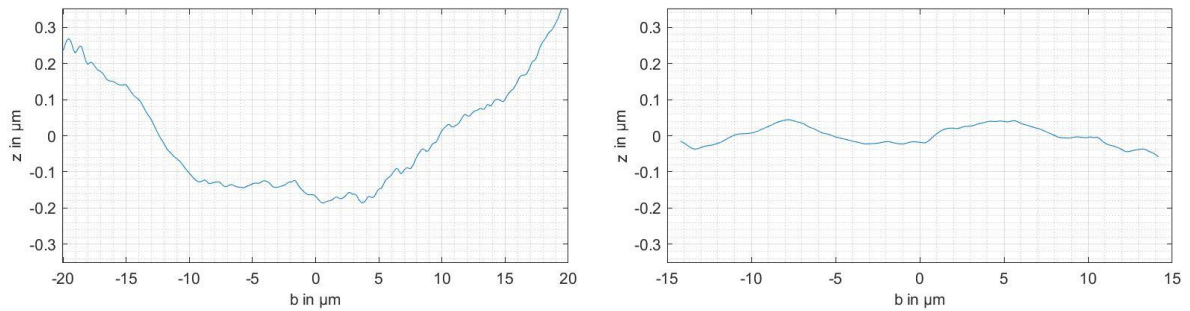


**Abb. 4.33** Rotierte Fläche ohne Korrektur ( $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta b = 800 \text{ nm}$ ),  $S_q = 2 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$

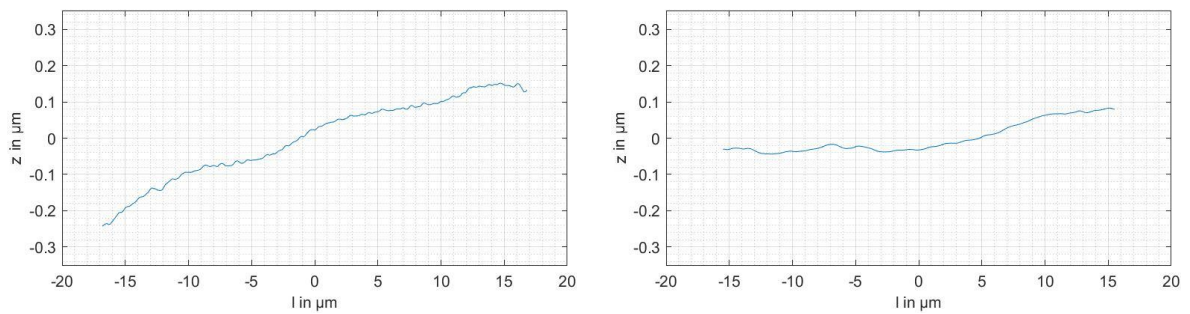


**Abb. 4.34** Rotierte Fläche mit Korrektur ( $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $\Delta b = 800 \text{ nm}$ ),  $S_q = 0,5 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$

Wie in Abb. 4.34 und Abb. 4.35 zu erkennen ist, kann mittels der beschriebenen Korrektur die Durchbiegung der Fläche aus Abb. 4.33 fast vollständig entfernt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Fläche nur in  $b$ -Richtung korrigiert werden kann. Auf die Abweichung in  $l$ -Richtung hat weder die Maskenbewegung bzw. Abtragsverschiebung noch die Laserpulsfluenz einen direkten Einfluss. Jedoch wird durch die Änderung des  $b$ -Profils auch die Abweichung des  $l$ -Profils geringer. Dieser indirekte Einfluss der Korrekturfunktion wird im prinzipiell gleichbleibenden, gestauchten  $l$ -Profilverlauf in Abb. 4.36 deutlich.



**Abb. 4.35** In l-Richtung gemitteltes b-Profil ohne (links) und mit Korrekturfunktion (rechts)



**Abb. 4.36** In b-Richtung gemitteltes l-Profil ohne (links) und mit Korrekturfunktion (rechts)

Weiterhin ist mittels der Korrekturfunktion der Neigungswinkel nicht beliebig einstellbar, da sich bei ändernder Flächenbreite auch die durch die Intensitätsverteilung bedingte Abtragsflanke ändert. Für die Strukturierung einer definiert geneigten Spiegelfläche sollte demnach ein Parametersatz mit einem Neigungswinkel gewählt werden, dessen Differenz zum Soll-Neigungswinkel möglichst gering ist.

Dieser Korrekturalgorithmus ist nicht auf ebene Flächen limitiert. Es können auch Formabweichungen von gekrümmten Strukturen korrigiert werden. Diese Möglichkeit sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

### 4.8 Herstellung von Flächen mit definierter Neigung

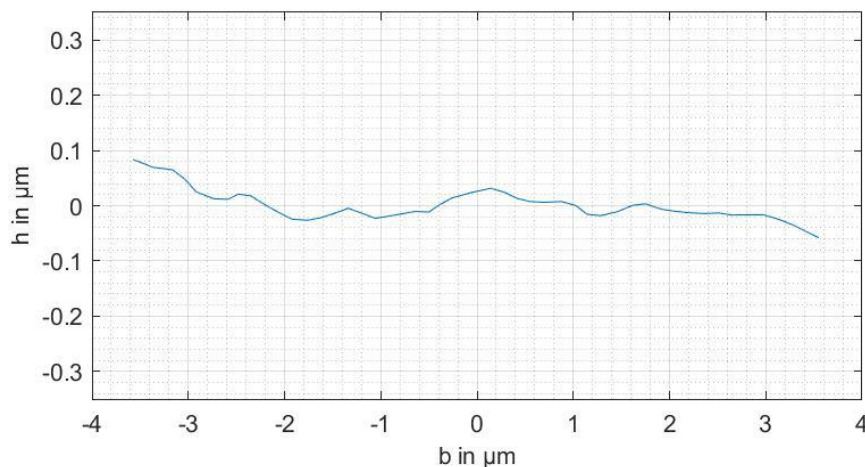
Nachfolgend soll die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit des Strukturierungsprozesses unter der Verwendung der Korrekturfunktion bei unterschiedlichen Flächenneigungswinkeln untersucht werden. Dafür wird die Strukturierung mit einem Parametersatz jeweils fünfmal durchgeführt. Dies liefert die folgenden Ergebnisse:

Tab. 4.1 Ergebnisse der Herstellung von Flächen mit definierter Neigung

Parameter	Fläche Nr.	gemessener Winkel in °	gemessene Rauheit in nm bei $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$	Abweichung vom Soll-Neigungswinkel in °
Basisparameter: $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 200 \text{ nm}$ , $\gamma = 34,7^\circ$  korrigiert auf: $\gamma_{\text{Soll}} = 34,7^\circ$	1	35,2	7,7	+0,5
	2	34,7	6,9	$\pm 0,0$
	3	35,2	6,6	+0,5
	4	34,4	6,4	-0,3
	5	34,8	6,5	+0,1
	Mittel	34,9	6,8	+0,2
Basisparameter: $H = 1,75 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 600 \text{ nm}$ , $\gamma = 11^\circ$  korrigiert auf: $\gamma_{\text{Soll}} = 10^\circ$	1	10,6	1,3	+0,6
	2	10,8	1,3	+0,8
	3	10,4	1,3	+0,4
	4	10,1	2,0	+0,1
	5	10,0	0,9	$\pm 0,0$
	Mittel	10,4	1,4	+0,4
Basisparameter: $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 700 \text{ nm}$ , $\gamma = 8,8^\circ$  korrigiert auf: $\gamma_{\text{Soll}} = 10^\circ$	1	10,3	0,9	+0,3
	2	10,5	0,9	+0,5
	3	10,7	1,3	+0,7
	4	9,9	1,2	-0,1
	5	10,1	0,7	+0,1
	Mittel	10,3	1,0	+0,3
Basisparameter: $H = 2 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 500 \text{ nm}$ , $\gamma = 14,3^\circ$  korrigiert auf: $\gamma_{\text{Soll}} = 10^\circ$	1	10,6	1,8	+0,6
	2	10,4	1,6	+0,4
	3	10,4	1,6	+0,4
	4	10,3	1,8	+0,3
	5	10,1	0,9	+0,1
	Mittel	10,4	1,5	+0,4
Basisparameter: $H = 2,75 \text{ J/cm}^2$ , $\Delta b = 200 \text{ nm}$ , $\gamma = 44,2^\circ$  korrigiert auf: $\gamma_{\text{Soll}} = 45^\circ$	1	48,0	10,1	+3,0
	2	45,2	7,3	+0,2
	3	44,6	7,7	-0,4
	4	42,2	6,8	-2,8
	5	43,1	5,4	-1,9
	Mittel	44,6	7,5	-0,4

$$\gamma = 34,7^\circ$$

Zuerst wird untersucht, ob der Flächenneigungswinkel eines definierten Parametersatzes auch mit Korrekturfunktion reproduzierbar ist. Dafür werden die Parameter  $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$  und  $\Delta b = 200 \text{ nm}$  gewählt. Diese resultierten nach in einem Flächenneigungswinkel von  $34,7^\circ$ . Auf diesen Winkel wird auch die Korrekturfunktion ausgelegt. Aus Tab. 4.1 geht hervor, dass die strukturierten Flächen eine gemittelte Abweichung vom Soll-Neigungswinkel von  $+0,2^\circ$  aufweisen, was einer relativen mittleren Abweichung von ca.  $+1\%$  entspricht. Die Reproduzierbarkeit ist demnach hinreichend gegeben. Die über die Flächen gemittelte Oberflächenrauheit beträgt  $6,8 \text{ nm}$  bei  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$ .



**Abb. 4.37** In I-Richtung gemitteltes b-Profil von Fläche Nr. 5 bei Soll-Neigungswinkel  $\gamma = 34,7^\circ$

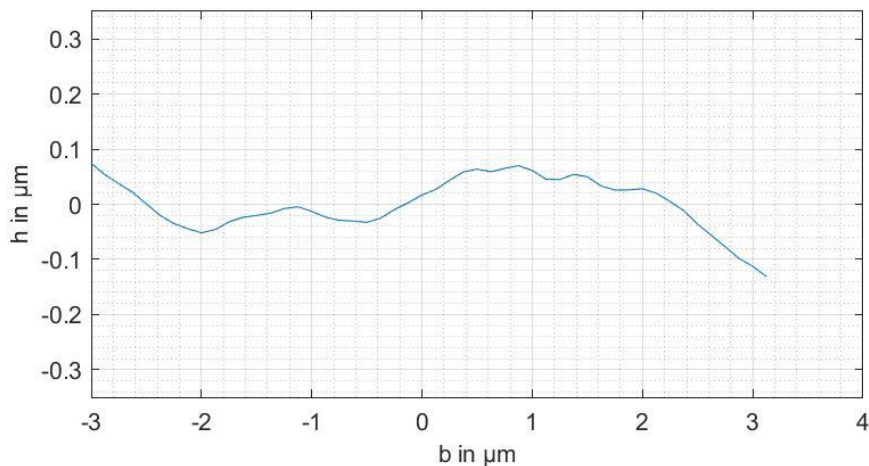
Abb. 4.37 zeigt das über alle I-Werte gemittelte b-Profil der Fläche Nr. 5. Es ist zu erkennen, dass die Profilhöhe zwischen  $-2,9 \mu\text{m} \leq b \leq 3,1 \mu\text{m}$  um ca.  $\pm 30 \text{ nm}$  schwankt.

$$\gamma = 10^\circ$$

Der Einfluss des gemessenen Neigungswinkels eines Parametersatzes auf die korrigierte Fläche wird anhand des Soll-Neigungswinkels von  $10^\circ$  untersucht. Dafür werden drei Parametersätze gewählt, mit denen Flächen strukturiert wurden, die einen geringfügig kleineren bzw. größeren Neigungswinkel aufweisen. Tab. 4.1 ist zu entnehmen, dass alle drei korrigierten Flächen im Mittel nahezu gleich geneigt sind und dabei jeweils um  $+0,3$  bzw.  $+0,4^\circ$  vom Soll-Neigungswinkel abweichen. Der Flächenneigungswinkel kann demnach, wie bereits in Kapitel 4.7 theoretisch beschrieben, mittels der Korrekturfunktion in gewissen Bereichen sowohl verkleinert als auch vergrößert werden. Die Oberflächenrauheit schwankt im Mittel um  $1 \text{ nm}$  und ist damit für alle Parametersätze geringer geworden (vgl. Anhang).

$\gamma = 45^\circ$ 

Um den für Umlenkspiegel benötigten Winkel von  $45^\circ$  einzustellen, werden die Parameter  $H = 2,75 \text{ J/cm}^2$  und  $\Delta b = 200 \text{ nm}$  gewählt, die in einem Flächenneigungswinkel von  $44,2^\circ$  resultieren (siehe Anhang). Mittels Korrekturfunktion wird der Soll-Neigungswinkel auf  $45^\circ$  festgelegt. Nach Tab. 4.1 fällt auf, dass die Spannweite der Ergebnisse deutlich größer als bei den vorangegangenen Parametersätzen ist, was durch die Prozessschwankungen sowie durch die geringe Größe des Messbereichs bedingt ist. Im Mittel beträgt die Abweichung vom Soll-Neigungswinkel  $-0,4^\circ$  und damit ca.  $-1\%$ .



**Abb. 4.38** In I-Richtung gemittelttes b-Profil von Fläche Nr. 2 bei Soll-Neigungswinkel  $\gamma = 45^\circ$

Abb. 4.38 zeigt das über alle I-Werte gemittelte b-Profil der Fläche Nr. 2. Die Profilhöhe schwankt zwischen  $-3 \mu\text{m} \leq b \leq 2,9 \mu\text{m}$  um ca.  $\pm 60 \text{ nm}$ . Demnach nimmt die Ebenheitsabweichung mit größer werdendem Flächenneigungswinkel zu.

Da die Rauheit aller hergestellten Flächen im Bereich  $< \lambda/100$  der Designwellenlänge und die gemittelte Abweichung jeweils unter  $0,5^\circ$  liegt, ist die Funktion der Flächen als Spiegel und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hinreichend gegeben.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Herstellung von definiert geneigten Spiegelflächen ist mittels der Fluorlasermikrostrukturierung möglich. Für die Umsetzung der Strukturierungsmethode wurde in einer Vorarbeit eine Bewegungseinrichtung entwickelt und gebaut. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Bewegungseinrichtung nochmals optimiert. Die Parameterstudie zeigt, dass mittels der Variation der Maskenverschiebung zwischen zwei Abtragspositionen und der Laserpulsfluenz der Neigungswinkel der strukturierten Fläche nahezu beliebig einstellbar ist. Dabei wird mit kleinerer Laserpulsfluenz und größerer Maskenverschiebung der Winkel der Spiegelfläche geringer. Die Oberflächenrauheit wird mit kleiner werdendem Winkel geringer und befindet sich unterhalb ca.  $30^\circ$  bei einer Grenzwellenlänge von  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$  im Bereich weniger Nanometer. Dies entspricht weniger als einem Hundertstel der Designwellenlänge. Bedingt durch die Intensitätsverteilung im Laserstrahl weisen die Spiegelflächen eine Ebenheitsabweichung auf, die mittels der Anwendung des vorgestellten Korrekturalgorithmus hinreichend gering wird. Weiterhin kann über die Korrektur der Neigungswinkel im Bereich weniger Grad angepasst werden.

In nachfolgenden Arbeiten sollen weitere Strukturierungsmöglichkeiten untersucht werden. Die Oberflächenrauheit von Flächen mit großem Neigungswinkel könnte verringert werden, indem mehrere flache Abträge mit einer geeigneten Fokuspachführung auf eine Position strukturiert werden. Ein zweiter Ansatz resultiert aus der Abtragsuntersuchung. Da der Flankenwinkel eines Abtrags abhängig von der Anzahl der eingebrachten Laserpulse ist, wäre die Einstellung des Neigungswinkels über die Pulszahl pro Abtragsposition umsetzbar. Die Maskenverschiebung zwischen zwei Abtragspositionen entspricht dann der Breite der Abtragsflanke. Weitere Untersuchungen sollten außerdem das Ziel verfolgen, die Strukturtiefe bei mindestens gleichbleibender Oberflächenrauheit zu erhöhen, um die nutzbare Spiegelfläche zu vergrößern. Ein Ansatz dafür wäre die Verwendung einer größeren statischen Maske, um den Einfluss der Abschattungseffekte zu minimieren. Um die exakte Vermessung von Spiegelflächen mit großem Neigungswinkel zu ermöglichen, sollten diese in einem experimentellen Aufbau mit der Designwellenlänge bestrahlt werden. Auf diesem Wege kann auch der Einfluss der Ebenheitsabweichung auf die Phasenfront und die Reflektivität der Spiegelfläche untersucht werden. Weiterhin sollte bei Einzelpulsabtrag pro Maskenposition die Verfahrensgeschwindigkeit der dynamischen Maske bei gleicher Verschiebung der Abtragskante variiert werden.

## Literaturverzeichnis

- [Ber09] Bertram, René: Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, 2009.
- [Bro05] Brokmann, Ulrike: Beitrag zur Mikrostrukturierung von fotostrukturierbarem Glas mittels UV-Laserstrahlung. Dissertation, 2005.
- [Büt15] Büttner, Sebastian: F2-Lasermikrostrukturierung von Mikrooptiken in D263T. Masterarbeit, Hochschule Mittweida, 2015.
- [Dah08] Dahotre, Narendra B.; Harimkar, Sandip P.: Laser fabrication and machining of materials. Springer, New York, NY, 2008.
- [DIN1] DIN EN ISO 16610-61:2015: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung –Teil 61: Lineare Flächenfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-61:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-61:2015. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN2] DIN EN ISO 16610-21:2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung –Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011); Deutsche Fassung EN ISO 16610-21:2012. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN3] DIN EN ISO 16610-28:2016: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung -Teil 28: Profilfilter: Endeffekte (ISO 16610-28:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16610-28:2016. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN4] DIN EN ISO 25178-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft -Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 25178-2:2012. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [Eic15] Eichler, Hans J.; Eichler, Jürgen: Laser. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Häh06] Hähnel, Falk: Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser, Hochschule Mittweida, 2006.
- [Her13] Hermatschweiler, Martin: 3D-Druck erobert die Mikroskala, 2013, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/latj.201300001>; Zugriff am 13.03.2019.
- [Hüg09] Hügel, Helmut; Graf, Thomas: Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [Hwu09] Hwu, Ruey-Jen: Micro-optic elements and method for making the same, 2009, <https://patentimages.storage.googleapis.com/68/db/45/b03415a4824b8c/US7531104.pdf>; Zugriff am 11.03.2019.
- [IOF19] IOF, Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik: Mikrooptik aus Kieselglas, Borosilikatglas und Silizium, <https://www.iof.fraunhofer.de/content/dam/iof/de/documents/pb/mikrooptik-kieselglas-d.pdf>; Zugriff am 21.05.2019.
- [Klo17] Klocke, Fritz: Fertigungsverfahren 2. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Mic05] 3D Micromac AG: Technikhandbuch Fluor Laser Station EX-157, Chemnitz, 2005.
- [Nan18] Nanoscribe GmbH: MicroOptics, 2018, [https://www.nanoscribe.de/files/9415/4391/2944/AppNote\\_MicroOptics.pdf](https://www.nanoscribe.de/files/9415/4391/2944/AppNote_MicroOptics.pdf); Zugriff am 12.03.2019.



- [Nau14] Naumann, Helmut: Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik. Carl Hanser Verlag, 2014.
- [Pfe11] Pfeifer, Michael: Herstellung von Blaze-Gittern in Quarzglas durch Mikrostrukturierung mittels F2-Laser, Hochschule Mittweida, 2011.
- [Sch05] Schott AG: D263T, 2005, [https://cmi.epfl.ch/organisation/files/D263T\\_d.pdf](https://cmi.epfl.ch/organisation/files/D263T_d.pdf), Zugriff am 28.03.2019.
- [Sta06] Stach, M., et al.: Bidirektionale optische Datenübertragung im Gbit/s-Bereich bei 850 nm Wellenlänge für Automotive- und Inhaus-Netze basierend auf neuartigen Transceiver-Bauelementen sowie PCS-Fasern oder Gradientenindex-Glasfasern. Beitrag in: Kommunikationskabelnetze. Informationstechnische Gesellschaft im VDE (Hg.), 2006.
- [Syr19] Syrbe, Eric: Entwicklung einer Bewegungseinrichtung für Projektionsmasken zur Strukturierung von Spiegelflächen in optischen Materialien. Praktikumsbericht, Hochschule Mittweida, 2019.
- [Wor09] Worsch, Christian, et al.: Isothermes Heißprägen von beschichteten Glaswafern. Vakuum in Forschung und Praxis 21, 2009.

## Anhang

**Abb. 4.3 Abhängigkeit der gemessenen Abtragsbreite von der Verfahrrichtung der B-Achse bei  $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$**

Datenreihe „öffnende Maske“

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	10	9,14	10,23	10,47	9,95
3	20	19,96	20,80	20,93	20,56
4	30	29,65	29,99	30,83	30,16
5	40	39,84	39,00	39,93	39,59
6	50	48,31	48,94	49,91	49,06
7	60	56,95	58,30	58,72	57,99
8	70	67,77	68,40	68,52	68,23
9	80	77,21	77,25	77,97	77,48
10	90	83,88	84,05	84,42	84,12
11	100	93,65	94,32	94,57	94,18

Datenreihe „schließende Maske“

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$
1	100	92,39	93,23	93,15	92,92
2	90	87,19	87,02	87,02	87,08
3	80	77,25	76,33	76,37	76,65
4	70	67,40	67,27	69,89	68,19
5	60	59,68	59,09	60,06	59,61
6	50	49,21	49,74	50,16	49,70
7	40	40,14	40,20	40,89	40,41
8	30	30,57	30,66	31,33	30,85
9	20	20,93	21,26	22,19	21,46
10	10	8,93	8,56	9,48	8,99
11	0	0,00	0,00	0,00	0,00

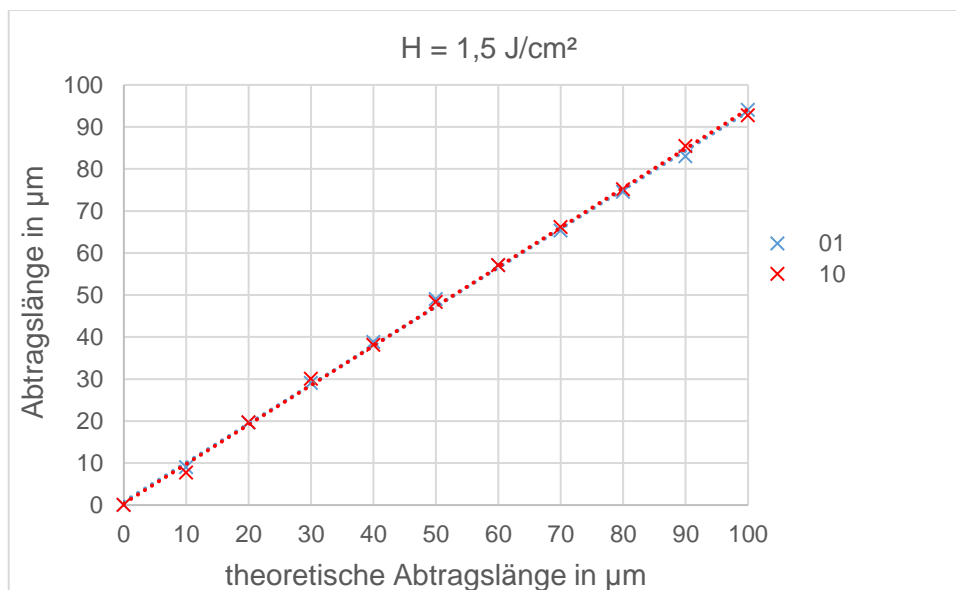
**Richtungsabhängigkeit bei  $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$**

Datenreihe „öffnende Maske“

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	10	8,93	9,19	8,93	9,02
3	20	19,50	19,50	19,75	19,59
4	30	28,81	29,19	29,19	29,06
5	40	38,38	38,38	39,76	38,84
6	50	49,20	48,57	49,20	48,99
7	60	57,00	56,74	57,63	57,12
8	70	65,43	65,55	65,05	65,34
9	80	73,60	74,99	74,99	74,53
10	90	82,41	83,04	83,42	82,96
11	100	94,11	93,99	93,99	94,03

Datenreihe „schließende Maske“

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$
1	100	92,23	92,98	92,98	92,73
2	90	84,17	86,19	85,93	85,43
3	80	74,99	75,24	75,24	75,16
4	70	66,31	66,06	66,06	66,14
5	60	56,62	58,25	56,37	57,08
6	50	47,43	48,94	48,57	48,31
7	40	37,75	37,62	39,00	38,12
8	30	28,93	30,45	30,70	30,02
9	20	19,63	19,38	20,01	19,67
10	10	7,42	7,55	8,30	7,76
11	0	0,00	0,00	0,00	0,00



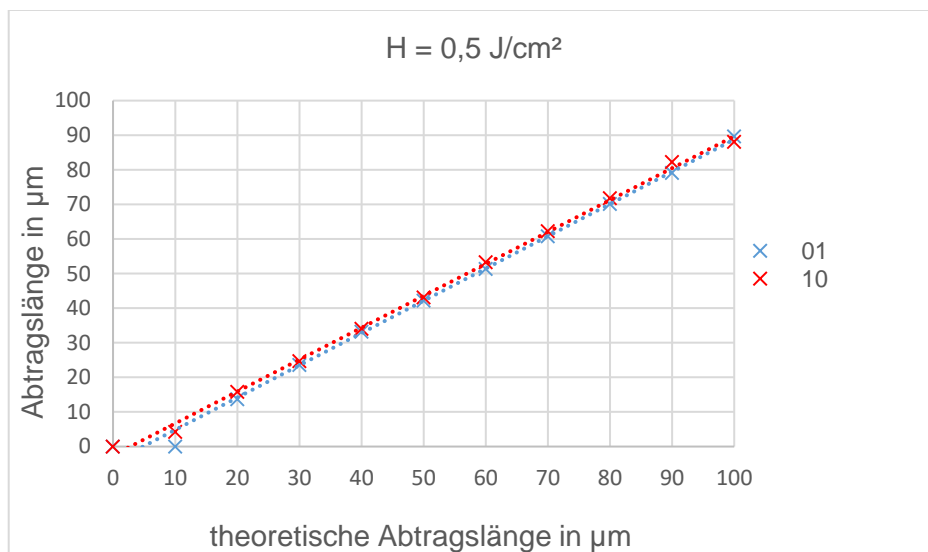
### Richtungsabhängigkeit bei $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$

Datenreihe „öffnende Maske“

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	10	0,00	0,00	0,00	0,00
3	20	12,88	14,47	13,67	13,67
4	30	22,86	23,65	24,20	23,57
5	40	32,29	33,26	34,01	33,19
6	50	41,02	42,53	43,03	42,19
7	60	50,20	51,21	52,51	51,31
8	70	60,44	60,85	60,85	60,71
9	80	69,24	70,33	70,58	70,05
10	90	78,51	78,89	79,85	79,08
11	100	89,29	89,16	90,42	89,62

Datenreihe „schließende Maske“

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$
1	100	87,61	87,95	88,66	88,07
2	90	81,28	83,04	82,33	82,22
3	80	70,75	71,63	72,93	71,77
4	70	61,27	62,53	62,91	62,24
5	60	52,97	53,35	53,47	53,26
6	50	42,90	43,41	43,03	43,11
7	40	34,10	33,59	34,22	33,97
8	30	23,40	24,03	26,42	24,62
9	20	15,35	15,60	16,35	15,77
10	10	3,40	4,28	5,10	4,26
11	0	0,00	0,00	0,00	0,00



**Abb. 4.5 Abweichung der gemessenen Abtragsbreiten vom theoretischen Wert bei unterschiedlichen Laserpulsfluenzen**

$H = 0,5 \text{ J/cm}^2$

$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	$b_{\text{mess}}$ in $\mu\text{m}$	Abweichung in $\mu\text{m}$
0	0,00	0,00
10	0,00	-10,00
20	13,67	-6,33
30	23,57	-6,43
40	33,19	-6,81
50	42,19	-7,81
60	51,31	-8,69
70	60,71	-9,29
80	70,05	-9,95
90	79,08	-10,92
100	89,62	-10,38

$H = 1,5 \text{ J/cm}^2$

$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	$b_{\text{mess}}$ in $\mu\text{m}$	Abweichung in $\mu\text{m}$
0	0,00	0,00
10	9,02	-0,98
20	19,59	-0,41
30	29,06	-0,94
40	38,84	-1,16
50	48,99	-1,01
60	57,12	-2,88
70	65,34	-4,66
80	74,53	-5,47
90	82,96	-7,04
100	94,03	-5,97

$$H = 2,5 \text{ J/cm}^2$$

$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	$b_{\text{mess}}$ in $\mu\text{m}$	Abweichung in $\mu\text{m}$
0	0,00	0,00
10	9,95	-0,05
20	20,56	0,56
30	30,16	0,16
40	39,59	-0,41
50	49,06	-0,94
60	57,99	-2,01
70	68,23	-1,77
80	77,48	-2,52
90	84,12	-5,88
100	94,18	-5,82

**Abb. 4.6 Positioniergenauigkeit von Einzelpulsabtrag und Abtrag mit 10 Pulsen**

Und

**Abb. 4.7 Änderung der Abtragsbreiten von Einzelpulsabtrag und Abtrag mit 10 Pulsen**

Einzelpuls

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	31,33	32,34	32,21	31,96	
2	37,995	31,96	32,20	32,96	32,46	0,50
3	38,495	32,46	33,34	33,09	32,96	0,50
4	38,995	32,84	33,72	33,59	33,38	0,42
5	39,495	34,60	33,85	33,47	33,97	0,59
6	39,995	34,22	34,98	33,97	34,39	0,42
7	40,495	34,60	35,36	35,10	35,02	0,63
8	40,995	34,85	36,11	35,86	35,61	0,59
9	41,495	35,48	36,36	36,61	36,15	0,55
10	41,995	36,24	36,87	36,99	36,70	0,55
11	42,495	36,87	37,24	37,49	37,20	0,50
12	42,995	37,75	37,75	38,00	37,83	0,63
13	43,495	38,38	38,25	38,38	38,33	0,50
14	43,995	38,75	38,88	38,88	38,84	0,50
15	44,495	39,13	39,27	39,38	39,26	0,42
16	44,995	39,76	39,51	39,89	39,72	0,46
17	45,495	40,01	40,14	40,51	40,22	0,50
18	45,995	40,51	40,77	41,02	40,77	0,55
19	46,495	41,02	41,14	41,65	41,27	0,50
20	46,995	41,39	42,02	42,02	41,81	0,54

## 10 Pulse

Abtrag	$b_{theo}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	33,47	34,60	34,85	34,31	
2	37,995	36,11	36,99	36,99	36,70	2,39
3	38,495	36,87	38,00	37,24	37,37	0,67
4	38,995	38,12	37,87	39,00	38,33	0,96
5	39,495	38,50	39,38	39,56	39,15	0,81
6	39,995	39,01	38,63	39,51	39,05	-0,10
7	40,495	40,77	40,89	41,77	41,14	2,10
8	40,995	39,26	39,89	39,89	39,68	-1,47
9	41,495	42,28	42,90	43,28	42,82	3,15
10	41,995	40,39	40,39	41,39	40,72	-2,10
11	42,495	42,65	43,28	43,91	43,28	2,56
12	42,995	40,39	41,39	42,02	41,27	-2,01
13	43,495	44,67	44,67	44,92	44,75	3,48
14	43,995	42,53	42,90	41,14	42,19	-2,56
15	44,495	44,67	45,42	45,80	45,30	3,10
16	44,995	43,91	42,78	43,28	43,32	-1,97
17	45,495	45,92	46,68	47,34	46,65	3,33
18	45,995	44,92	44,92	44,92	44,92	-1,73
19	46,495	46,81	47,69	47,94	47,48	2,56
20	46,995	45,04	45,67	46,55	45,76	-1,72

Abb. 4.8 Vergleich der Abweichungen mit Pausenzeiten

## 1s Pause nach Bewegung der B-Achse

Abtrag	$b_{theo}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	31,46	32,21	32,46	32,04	
2	37,995	34,98	36,36	35,61	35,65	3,61
3	38,495	33,97	34,98	35,61	34,85	-0,80
4	38,995	35,48	35,98	35,86	35,77	0,92
5	39,495	37,24	38,38	36,87	37,49	1,72
6	39,995	37,75	38,63	37,62	38,00	0,50
7	40,495	36,61	39,63	36,74	37,66	-0,34
8	40,995	36,99	39,38	38,88	38,42	0,75
9	41,495	38,63	38,50	38,50	38,54	0,13
10	41,995	38,38	40,01	39,13	39,17	0,63
11	42,495	39,76	39,89	39,51	39,72	0,55
12	42,995	39,13	40,26	39,76	39,72	0,00
13	43,495	39,76	41,69	40,77	40,74	1,02
14	43,995	40,01	41,90	41,77	41,23	0,49
15	44,495	42,28	42,02	42,02	42,11	0,88
16	44,995	42,15	42,78	42,78	42,57	0,46
17	45,495	43,28	43,53	46,05	44,29	1,72
18	45,995	43,16	44,16	43,91	43,74	-0,55
19	46,495	45,04	46,60	45,67	45,77	2,03
20	46,995	45,30	47,18	46,55	46,34	0,57

## 1s Pause vor Bewegung der B-Achse

Abtrag	$b_{theo}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	31,58	31,83	31,71	31,71	
2	37,995	31,33	31,83	31,33	31,50	-0,21
3	38,495	32,21	32,96	33,22	32,80	1,30
4	38,995	32,08	33,47	33,59	33,05	0,25
5	39,495	33,34	33,47	33,97	33,59	0,55
6	39,995	33,47	34,22	34,10	33,93	0,34
7	40,495	34,35	34,85	34,85	34,68	0,75
8	40,995	34,98	35,61	35,36	35,31	0,63
9	41,495	34,60	35,98	36,61	35,73	0,42
10	41,995	35,61	36,49	36,36	36,15	0,42
11	42,495	36,87	36,99	37,75	37,20	1,05
12	42,995	37,75	38,75	38,25	38,25	1,05
13	43,495	37,87	38,00	38,38	38,08	-0,17
14	43,995	38,00	39,00	39,00	38,67	0,59
15	44,495	39,13	39,63	40,77	39,84	1,17
16	44,995	39,76	40,39	40,14	40,09	0,25
17	45,495	40,26	40,77	40,89	40,64	0,55
18	45,995	41,52	42,15	42,53	42,07	1,43
19	46,495	41,90	42,28	43,16	42,44	0,38
20	46,995	43,28	43,79	44,04	43,70	1,26

**Abb. 4.9 Vergleich der Abweichungen bei unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten der y-Achse**

$v_y = 50 \text{ mm/s}$

Abtrag	$b_{theo}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	31,33	32,08	32,21	31,87	
2	37,995	34,35	35,36	35,10	34,94	3,06
3	38,495	34,85	36,49	35,86	35,73	0,80
4	38,995	35,10	36,36	36,36	35,94	0,21
5	39,495	36,87	37,60	38,00	37,49	1,55
6	39,995	37,49	37,24	37,24	37,33	-0,16
7	40,495	37,37	38,50	38,38	38,08	0,76
8	40,995	36,74	37,87	38,88	37,83	-0,25
9	41,495	37,62	39,00	39,76	38,79	0,97
10	41,995	36,49	38,88	40,51	38,63	-0,17
11	42,495	39,51	39,26	40,64	39,80	1,17
12	42,995	38,63	40,26	39,38	39,42	-0,38
13	43,495	41,02	42,15	42,15	41,77	2,35
14	43,995	40,51	39,63	40,14	40,09	-1,68
15	44,495	41,90	42,15	43,91	42,65	2,56
16	44,995	41,52	43,41	43,53	42,82	0,17
17	45,495	42,53	42,90	43,66	43,03	0,21
18	45,995	43,41	42,90	43,66	43,32	0,29
19	46,495	45,30	46,68	44,79	45,59	2,27
20	46,995	45,42	46,05	46,81	46,09	0,50

$v_y = 1 \text{ mm/s}$ 

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	31,20	32,34	32,34	31,96	
2	37,995	31,83	32,21	32,21	32,08	0,13
3	38,495	32,21	32,84	32,96	32,67	0,59
4	38,995	32,84	33,34	33,09	33,09	0,42
5	39,495	33,47	33,72	33,97	33,72	0,63
6	39,995	33,85	34,10	34,47	34,14	0,42
7	40,495	33,85	35,10	34,98	34,64	0,50
8	40,995	34,85	35,48	35,23	35,19	0,55
9	41,495	35,10	35,86	36,21	35,72	0,54
10	41,995	35,86	36,61	36,36	36,28	0,55
11	42,495	36,36	37,37	37,12	36,95	0,67
12	42,995	37,37	38,12	37,37	37,62	0,67
13	43,495	37,87	38,50	38,25	38,21	0,59
14	43,995	38,38	38,88	39,00	38,75	0,54
15	44,495	38,75	39,13	39,89	39,26	0,50
16	44,995	39,38	39,89	40,50	39,92	0,67
17	45,495	39,89	40,01	41,02	40,30	0,38
18	45,995	40,51	40,77	41,52	40,93	0,63
19	46,495	41,27	41,78	42,28	41,77	0,84
20	46,995	41,65	42,23	42,69	42,19	0,41

 $v_y = 0,5 \text{ mm/s}$ 

Abtrag	$b_{\text{theo}}$ in $\mu\text{m}$	Position 1 in $\mu\text{m}$	Position 2 in $\mu\text{m}$	Position 3 in $\mu\text{m}$	Mittelwert in $\mu\text{m}$	Änderung in $\mu\text{m}$
1	37,495	31,20	31,96	32,08	31,75	
2	37,995	31,58	32,59	32,59	32,25	0,50
3	38,495	32,08	32,97	33,09	32,71	0,46
4	38,995	32,46	33,34	33,72	33,17	0,46
5	39,495	32,74	33,72	34,47	33,64	0,47
6	39,995	33,72	34,22	34,85	34,26	0,62
7	40,495	34,73	34,98	35,36	35,02	0,75
8	40,995	34,73	35,73	35,49	35,32	0,30
9	41,495	35,73	36,49	36,30	36,17	0,86
10	41,995	36,30	36,74	37,12	36,72	0,55
11	42,495	36,99	37,24	37,49	37,24	0,52
12	42,995	37,12	38,00	38,12	37,75	0,50
13	43,495	38,50	37,87	38,63	38,33	0,59
14	43,995	38,88	38,75	39,38	39,00	0,67
15	44,495	39,63	39,76	40,51	39,97	0,97
16	44,995	40,01	40,51	41,27	40,60	0,63
17	45,495	40,64	41,27	42,28	41,39	0,80
18	45,995	41,14	41,77	42,53	41,81	0,42
19	46,495	41,77	42,40	43,03	42,40	0,59
20	46,995	42,65	43,03	43,66	43,11	0,71



**Abb. 4.10 Abtrag mit eingezeichneten Profilschnitten ( $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $b_{\text{theo}} = 50 \text{ }\mu\text{m}$ )**

Datenblatt Profilmessung

Nr.	Breite in $\mu\text{m}$	Höhe in $\mu\text{m}$	Länge in $\mu\text{m}$
1	47,937	0,005	47,937
2	51,082	0,093	51,082
3	69,452	0,112	69,452

**Abb. 4.11 Statische Maske; horizontal 1,331 mm, vertikal 1,331 mm**

Datenblatt Längenmessung

Nr.	Länge in mm
1	1,331
2	1,331

**Abb. 4.12 Dynamische Maske; horizontal 3,509 mm, vertikal 3,505 mm**

Datenblatt Längenmessung

Nr.	Länge in mm
1	3,509
2	3,505

**Abb. 4.14 Abtrag mit eingezeichneten Profilschnitten nach Einbau der Justageeinheit**

Datenblatt Profilmessung

Nr.	Breite in $\mu\text{m}$	Höhe in $\mu\text{m}$	Länge in $\mu\text{m}$
1	46,405	0,493	46,407
2	46,479	0,476	46,481
3	34,415	0,077	34,415

**Abb. 4.25 Flächenneigungswinkel  $\gamma$  in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung und der Laserpulsfluenz**

$\gamma$  in  $^\circ$

$\Delta b$ in nm	H in $\text{J/cm}^2$				
	2,75	2,5	2,25	2	1,75
100	59,3	63,8	60,9	58,4	56,0
200	44,2	43,3	39,2	36,9	35,3
300	32,4	31,1	26,8	25,3	24,1
400	22,9	20,3	19,2	18,9	16,8
500	17,6	15,1	14,6	14,3	12,9
600	13,9	11,8	12,2	10,9	11,0
700	12,1	11,0	10,3	9,2	9,6
800	10,7	9,6	9,4	8,3	8,4
900	9,6	8,3	8,4	7,3	7,5
1000	8,4	7,5	7,2	7,1	6,6
1500	5,7	5,1	5,0	4,6	4,4
2000	4,2	3,6	3,9	3,3	3,4
2500	3,5	2,9	3,0	2,7	2,7
3000	2,9	2,7	2,6	2,2	2,3

$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	1,5	1,25	1	0,75	0,5
100	54,5	52,0	51,5	44,2	35,1
200	34,7	30,7	29,7	25,1	18,5
300	23,7	19,1	18,9	14,7	11,6
400	16,4	14,2	12,7	10,4	7,6
500	10,2	10,7	8,5	7,8	5,5
600	9,5	8,2	7,5	6,3	4,3
700	8,8	7,4	6,7	5,3	3,4
800	7,6	6,3	5,8	4,8	2,9
900	7,4	5,8	5,0	4,2	3,1
1000	5,8	5,5	4,7	3,9	2,5
1500	4,2	3,6	3,0	2,5	1,5
2000	3,0	2,8	2,2	1,9	1,2
2500	2,3	2,1	1,8	1,5	0,9
3000	2,0	1,8	1,6	1,3	0,8

**Abb. 4.26 Vergleich der theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel bei  $H = 2 \text{ J/cm}^2$**

$\Delta b$ in nm	theoretischer Flächen- neigungswinkel in °	gemessener Flächen- neigungswinkel in °
100	48,0	58,4
200	31,0	36,9
300	21,8	25,3
400	14,8	18,9
500	12,5	14,3
600	10,5	10,9
700	9,0	9,2
800	7,9	8,3
900	7,0	7,3
1000	6,3	7,1
1500	4,2	4,6
2000	3,2	3,3
2500	2,5	2,7
3000	2,1	2,2

**Abb. 4.27 Vergleich der theoretischen und gemessenen Flächenneigungswinkel bei  $H = 2,5 \text{ J/cm}^2$**

$\Delta b$ in nm	theoretischer Flächen- neigungswinkel in °	gemessener Flächen- neigungswinkel in °
100	51,3	46,2
200	33,8	37,6
300	24,1	25,7
400	17,1	18,2
500	13,8	13,3
600	11,6	12,2
700	10,0	10,6
800	8,7	9,2
900	7,8	8,2
1000	7,0	7,2
1500	4,7	4,9
2000	3,5	3,5
2500	2,8	3,1
3000	2,3	2,7

**Abb. 4.28 Oberflächenrauheit  $S_q$  in Abhängigkeit von der Abtragsverschiebung, der Laserpulsfluenz und der Grenzwellenlänge**

$S_q$  in nm bei  $\lambda_c = 2,5 \mu\text{m}$

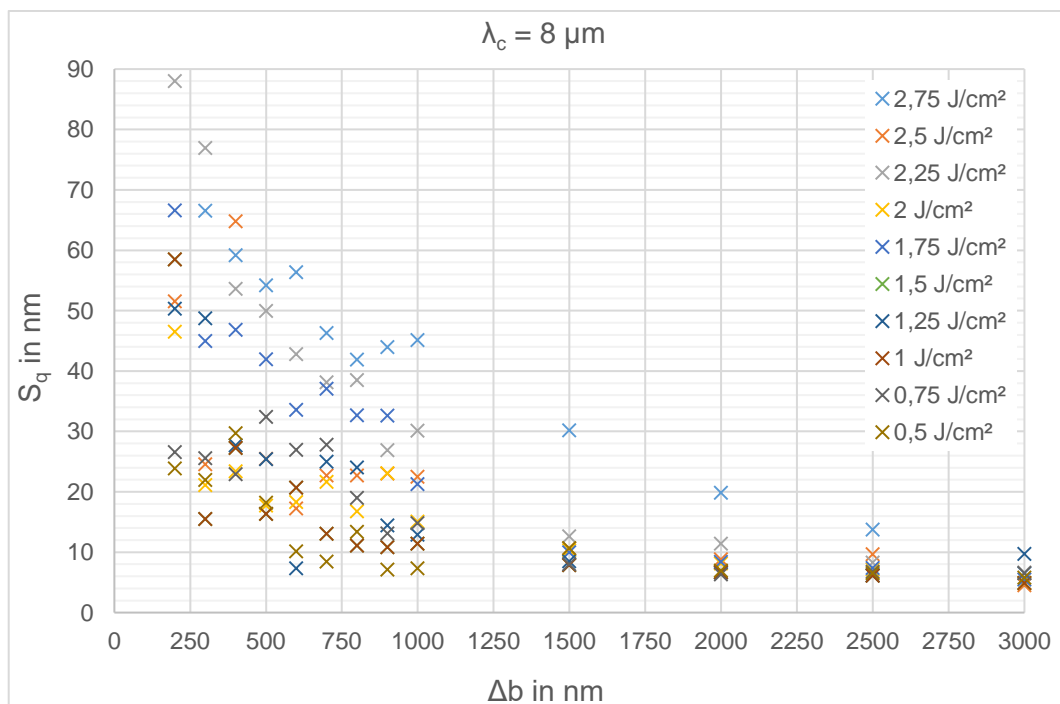
$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	2,75	2,5	2,25	2	1,75
100	16,83	23,36	14,86	12,85	14,95
200	13,27	11,11	13,07	6,95	10,71
300	10,36	4,67	11,54	3,90	7,73
400	9,51	10,12	8,56	4,85	7,50
500	8,66	4,89	8,03	3,62	7,65
600	9,03	3,36	6,78	3,39	5,90
700	7,45	3,43	6,04	3,33	6,06
800	6,73	3,48	6,11	2,64	5,24
900	6,61	3,75	4,38	3,57	4,91
1000	6,84	3,64	5,11	2,53	3,64
1500	4,71	1,86	2,72	1,68	1,76
2000	3,33	1,39	2,16	1,20	1,33
2500	1,83	1,26	1,40	1,01	1,12
3000	1,22	0,58	1,05	0,77	0,85

$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	1,5	1,25	1	0,75	0,5
100	13,53	13,36	11,48	12,26	9,45
200	7,12	8,21	7,15	3,98	4,30
300	3,18	7,48	2,63	4,38	3,23
400	2,74	4,81	3,67	4,11	4,12
500	2,32	4,63	2,93	5,01	2,63
600	2,95	1,19	3,25	3,93	1,48
700	2,23	4,21	2,15	3,79	1,28
800	2,14	4,21	1,86	2,82	1,73
900	2,33	2,37	1,80	2,00	1,05
1000	2,04	2,50	1,88	2,30	1,08
1500	1,16	1,81	1,14	1,26	1,35
2000	1,05	0,99	0,97	0,92	1,00
2500	0,95	0,93	0,94	0,97	0,93
3000	0,78	1,45	0,78	1,01	0,89

$S_q$  in nm bei  $\lambda_c = 8 \mu\text{m}$

$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	2,75	2,5	2,25	2	1,75
100					
200		51,55	88,01	46,50	66,58
300	66,57	24,56	76,93	21,12	44,95
400	59,19	64,81	53,59	23,38	46,84
500	54,19	25,49	49,98	17,72	41,94
600	56,35	17,26	42,82	18,33	33,58
700	46,28	22,71	38,16	21,62	37,08
800	41,92	22,71	38,50	16,77	32,69
900	43,97	23,03	26,92	23,10	32,62
1000	45,16	22,51	30,15	15,08	21,29
1500	30,19	10,62	12,62	10,30	9,99
2000	19,86	8,80	11,40	8,11	8,39
2500	13,73	9,67	8,28	7,12	7,37
3000	6,47	4,52	6,63	4,90	5,46

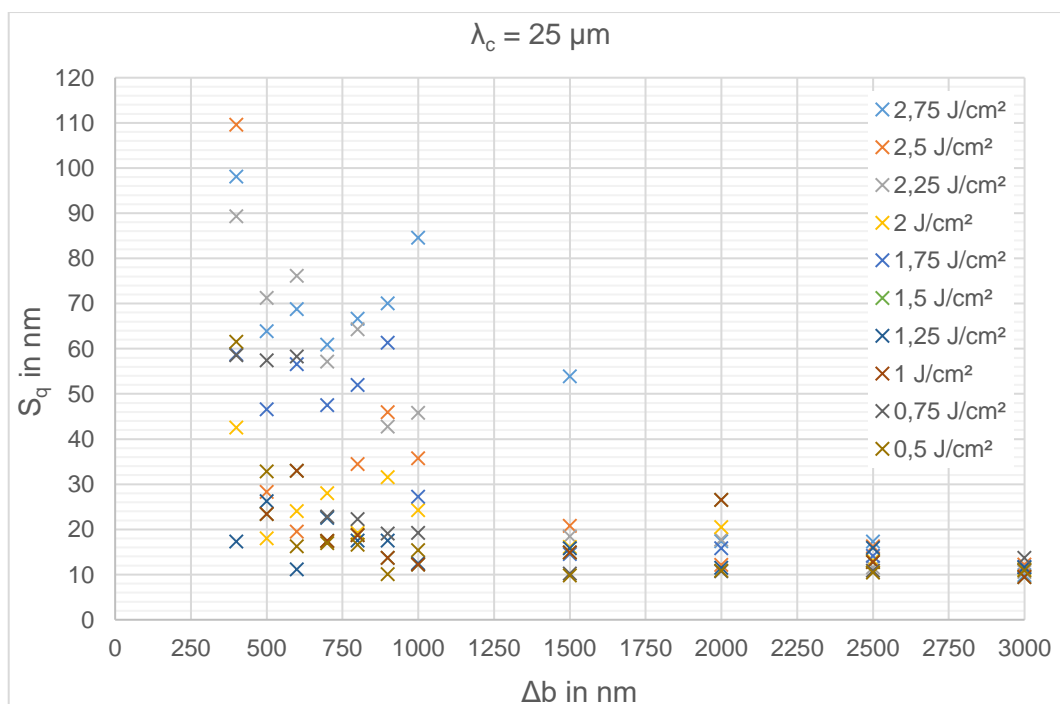
$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	1,5	1,25	1	0,75	0,5
100					
200	49,68	50,33	58,47	26,58	23,85
300	18,67	48,75	15,50	25,59	21,98
400	16,49	27,71	27,27	22,93	29,70
500	12,63	25,42	16,37	32,43	18,18
600	13,99	7,33	20,71	26,96	10,13
700	11,56	24,98	13,06	27,81	8,45
800	12,75	24,03	11,08	18,98	13,38
900	2,33	14,44	10,84	13,12	7,11
1000	12,45	12,87	11,44	14,81	7,32
1500	7,93	8,49	7,85	8,03	10,69
2000	6,86	6,63	6,69	6,35	6,97
2500	6,35	6,15	6,14	6,75	6,54
3000	4,79	9,70	4,92	6,54	5,79



$S_q$  in nm bei  $\lambda_c = 25 \mu\text{m}$

$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	2,75	2,5	2,25	2	1,75
100					
200					
300					
400	98,08	109,55	89,31	42,49	58,78
500	63,86	28,25	71,25	18,01	46,53
600	68,76	19,48	76,08	23,99	56,56
700	60,88	17,33	57,11	28,03	47,45
800	66,61	34,44	64,26	19,18	51,97
900	69,99	45,94	42,72	31,50	61,32
1000	84,53	35,72	45,79	24,20	27,21
1500	53,85	20,76	18,43	16,06	14,52
2000	17,36	12,13	17,73	20,47	15,81
2500	17,26	16,21	11,58	13,15	14,11
3000	9,85	12,19	10,55	11,21	11,69

$\Delta b$ in nm	H in J/cm <sup>2</sup>				
	1,5	1,25	1	0,75	0,5
100					
200					
300					
400	16,40	17,29		58,52	61,53
500	14,17	26,23	23,41	57,41	32,81
600	21,76	11,14	32,96	58,24	16,21
700	16,79	22,51	17,46	22,82	16,96
800	18,76	17,49	18,69	22,25	16,60
900	14,26	17,51	13,65	19,09	10,04
1000	15,89	12,47	12,16	19,18	15,40
1500	14,09	15,83	14,91	10,21	9,79
2000	13,04	11,47	26,49	10,73	10,84
2500	13,18	15,86	12,79	10,85	10,42
3000	9,57	11,52	9,42	13,65	10,90



## **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, 30.09.2019

Eric Syrbe