



MASTERARBEIT

Herr
Eric Syrbe, B.Sc.

**Untersuchungen zur Herstellung
rotationssymmetrischer
mikrooptischer Bauelemente auf
Basis der sequentiellen
Maskenprojektion**

2021

Fakultät **Ingenieurwissenschaften**

MASTERARBEIT

**Untersuchungen zur Herstellung
rotationssymmetrischer
mikrooptischer Bauelemente auf
Basis der sequentiellen
Maskenprojektion**

Autor:

Eric Syrbe, B.Sc.

Studiengang:

Lasertechnik

Seminargruppe:

LT19w1-M

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

Zweitprüfer:

Michael Pfeifer, M.Sc.

Einreichung:

Mittweida, 29.09.2021

Faculty of **Engineering Sciences**

MASTER THESIS

**Studies on the fabrication of
rotationally symmetrical
micro-optical devices based on
sequential mask projection**

author:

Mr. Eric Syrbe, B.Sc.

course of studies:

Laser Technology

seminar group:

LT19w1-M

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

second examiner:

Michael Pfeifer, M.Sc.

submission:

Mittweida, 29.09.2021

Bibliografische Angaben

Syrbe, Eric:

Untersuchungen zur Herstellung rotationssymmetrischer mikrooptischer Bauelemente auf Basis der sequentiellen Maskenprojektion. –2021. –XIII, 65, xx S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Masterarbeit, 2021

Referat

In dieser Arbeit wird ein Verfahren auf Basis der sequentiellen Maskenprojektion zur Herstellung von Mikrolinsen mittels Fluorlasermikrostrukturierung vorgestellt. Der verwendete Versuchsaufbau wird beschrieben, getestet und für eine bestmögliche Formgenauigkeit der Mikrostrukturen optimiert. Nachfolgend werden mittels der Simulation des Strukturierungsprozesses und unter Vorgabe eines Sollkrümmungsradius geeignete Parametersätze berechnet. Der Krümmungsradius der entsprechend strukturierten Mikrolinsen kann somit gezielt eingestellt werden.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Masterarbeit 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

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	7
2 Theoretische Grundlagen	8
2.1 Laseranlage	8
2.2 Lasermikrostrukturierung: Maskenprojektionsverfahren	13
3 Material und Methoden	14
3.1 Borosilikatglas D263T	14
3.2 Maskenherstellung	15
3.3 Versuchsaufbau	17
3.4 Optimierung der Positionsgenauigkeit der Masken	19
3.5 Berechnung geeigneter Prozessparameter	20
3.6 Überprüfung der Formgenauigkeit	24
3.7 Rauheitsanalyse	26
3.8 Auswertung mittels PSD-Funktion	27
3.9 Simulation der Mikrostrukturierung	34
4 Ergebnisse und Diskussion	35
4.1 Test des Versuchsaufbaus	35
4.2 Test des optischen Sensors	37
4.3 Parameterstudie	39
4.4 Test der berechneten Prozessparameter	42
4.5 Auswertung der simulierten Strukturen	45
4.6 Herstellung von Mikrolinsen mit definierten Radien	47
4.7 Auswertung mittels PSD-Funktion	53
4.8 Verringerung der Prozessdauer	59
5 Zusammenfassung und Ausblick	64
Literaturverzeichnis	i
A Abbildungen	v
B Messdaten	viii
Selbstständigkeitserklärung	xx

Abbildungsverzeichnis

1.1	Resistinselarrays nach Di et al. [DLD09]	3
1.2	Heißprägen von Polymerwerkstoffen [YLL18]	4
2.1	Fluorlaser	8
2.2	Schematische Darstellung der Strahlformung und -führung [Ber09]	9
2.3	Schematischer Aufbau (links) und Transmissionsgrad (rechts) des Abschwächers [Häh06, Ber09]	10
2.4	Funktionsweise des Beamcombiners (links) und Laserstrahlprofil vor und nach dem Beamcombiner (rechts) [AG05]	10
2.5	Objektiv mit Schutzgasdüse, Triangulationssensor, Leistungsmesskopf und Bearbeitungstisch	11
2.6	Abtrag mittels Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück (links) oder Maskenprojektion mit homogener Bestrahlung (rechts) [HG09]	13
3.1	Spektraler Transmissionsgrad von D263T [Sch21]	14
3.2	Abtragsrate pro Puls bei $f_P = 200$ Hz in D263T [Ber09]	14
3.3	Tantal-Testbeschichtungen mit unterschiedlicher Dicke	15
3.4	Substratmaske	16
3.5	Durchlichtmikroskopaufnahme der Maske mit $D = 90$ μm	16
3.6	Versuchsaufbau	17
3.7	Maskenrad mit Masken	18
3.8	Teststruktur ohne Korrektur	19
3.9	Vermessung der Abweichung der Abtragsmittelpunkte (rechter Abtrag: Referenzmaske, linker Abtrag: zu korrigierende Maske mit $D = 46$ μm)	20
3.10	Kontur einer kegelförmigen Zielgeometrie mit $\phi_{\text{soll}} = 10^\circ$ und berechnete Abtragskontur	22
3.11	Kontur einer kegelförmigen Zielgeometrie mit $\phi_{\text{soll}} = 20^\circ$ und optimierte berechnete Abtragskontur	23
3.12	Für die Auswertung selektierter Bereich der Mikrostruktur	24
3.13	Referenzstrukturen: Kegel (links) und Linse (rechts)	25

3.14 Vermessene Teststruktur (links) und Formabweichung (rechts) mit $\phi_{\text{ist}} = 7,7^\circ$	25
3.15 Filtermethode zur Formentfernung nach DIN EN ISO 13565-1 [DIN98]	26
3.16 Abgetastetes Profil als ortsdiskrete harmonische Schwingung	28
3.17 Normiertes Betragsquadrat der Fouriertransformierten einer ortsdiskreten harmonischen Schwingung in der doppelt logarithmischen Darstellung (PSD-Funktion)	29
3.18 Realitätsnahes Linsenprofil (links) und zugehörige PSD-Funktion (rechts)	30
3.19 Von-Hann-Wichtungsfunktion mit dem Betragsquadrat der Fouriertransformierten	30
3.20 Normierte PSD-Funktion (links) und Vergrößerung der spektralen Peaks (rechts) eines mit der Von-Hann-Funktion gewichteten, realitätsnahen Linsenprofils	31
3.21 Übersicht der um 60° gedrehten Beispielstruktur	32
3.22 Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit der Teststruktur	33
3.23 Links: Maskenmatrix für $D = 50,8\mu\text{m}$ und rechts: simulierte Beispielstruktur mit $R_{\text{soll}} = 50\mu\text{m}$ mit $H = 1\text{ J/cm}^2$	34
4.1 Kegelstrukturen mit eingezeichneten Höhenlinien (links: ohne Korrektur, rechts: mit Korrektur)	35
4.2 Kegelstrukturen mit einer Strukturierungstiefe von jeweils etwa $5\mu\text{m}$ (links: nach erster Korrektur, rechts: nach zweiter Korrektur)	36
4.3 Optischer Sensor	37
4.4 Korrigierte Kegelstruktur mit eingezeichneten Höhenlinien	38
4.5 Einfluss der Laserpulsfluenz auf den Basiswinkel und die Rauheit der Kegelstruktur	39
4.6 Einfluss der Laserpulsanzahl auf den Basiswinkel und die Rauheit der Kegelstruktur	40
4.7 Einfluss der Maskensequenz auf den Basiswinkel und die Rauheit der Kegelstruktur	41
4.8 Parametertest mit Kegelstrukturen bei $H = 1\text{ J/cm}^2$	42
4.9 Parametertests mit Linsenstrukturen bei $H = 1\text{ J/cm}^2$ ($\Delta z = 55\text{ nm}$)	43
4.10 Gemessener Laserpulsabtrag Δz bei $f_P = 200\text{ Hz}$ in D263T	43
4.11 Vergleich der Linsenstrukturen mit unterschiedlichen Laserpulsabträgen Δz bei $H = 1\text{ J/cm}^2$	44
4.12 Vergleich der berechneten Radien der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Sollradien und Laserpulsfluenzen	45
4.13 Diskretisierung der Simulation in z - und r -Richtung	46
4.14 Formabweichung einer simulierten Linsenstruktur	46

4.15 Vergleich der Oberflächenrauheit der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen	47
4.16 Vergleich der gemessenen Radien der Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen	48
4.17 Abtrag mit 50 Laserpulsen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	49
4.18 Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien	50
4.19 Überlagerung einer simulierten Linsenstruktur mit dem realen Abtragsfeld	50
4.20 Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien von simulierten Strukturen unter Berücksichtigung des realen Abtragsfeldes	51
4.21 Vergleich der Oberflächenrauheit der realen Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen	52
4.22 PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit den verwendeten Masken	53
4.23 PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit den verwendeten Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	54
4.24 PSD-Funktionen der realen Struktur für $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$	55
4.25 PSD-Funktionen der realen Strukturen für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$, jeweils über alle Strukturen eines Parametersatzes gemittelt	55
4.26 PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit idealen Masken	57
4.27 PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit idealen Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	57
4.28 Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit für $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$	58
4.29 Programmübersicht: Positionsüberwachung während der gleichförmigen Bewegung der Drehachse	59
4.30 Beispielhafte Prozesszeitübersicht für $f_p = 60 \text{ Hz}$	61
4.31 Gemessener Basiswinkel und Oberflächenrauheit der Kegelstrukturen für verschiedene Pulswiederhol frequenzen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	62
4.32 Positionierungsfehler bei $f_p = 62 \text{ Hz}$	62
4.33 Gemessener Basiswinkel der Kegelstruktur bei mehreren Überfahren und für verschiedene Laserpulsfluenzen bei $f_p = 60 \text{ Hz}$	63

Anhang	v
A.1 Mikrolinse ($R_{\text{soll}} = 190 \mu\text{m}$, $H = 1 \text{ J/cm}^2$)	v
A.2 PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit den verwendeten Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	v
A.3 PSD-Funktionen der realen Strukturen für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$. . .	vi
A.4 PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit idealen Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	vi
A.5 Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit für $R_{\text{soll}} = 150 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$	vii
A.6 Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit für $R_{\text{soll}} = 250 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$	vii

Tabellenverzeichnis

2.1	Parameter des Achspositioniersystems [AG05]	12
B.1	Masken	ix
B.2	Einfluss der Laserpulsfluenz	x
B.3	Einfluss der Laserpulsanzahl	xi
B.4	Einfluss der Maskensequenz	xi
B.5	Parametertest mit Kegelstrukturen	xii
B.6	Parametertests mit Linsenstrukturen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ ($\Delta z = 55 \text{ nm}$)	xii
B.7	Gemessener Laserpulsabtrag Δz bei $f_p = 200 \text{ Hz}$ in D263T	xiii
B.8	Parametertest mit Linsenstrukturen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ ($\Delta z = 63 \text{ nm}$)	xiii
B.9	Vergleich der gemessenen Radien der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Sollradien und Laserpulsfluenzen	xiv
B.10	Vergleich der Oberflächenrauheit der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen	xiv
B.11	Vergleich der gemessenen Radien der Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen	xv
B.12	Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien ($H = 1 \text{ J/cm}^2$)	xvi
B.13	Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien von simulierten Strukturen unter Berücksichtigung des realen Abtragsfeldes ($H = 1 \text{ J/cm}^2$)	xvi
B.14	Vergleich der Oberflächenrauheit der realen Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen	xvii
B.15	Gemessener Basiswinkel und Oberflächenrauheit der Kegelstrukturen für verschiedene Pulswiederhol frequenzen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$	xviii
B.16	Gemessener Basiswinkel der Kegelstrukturen bei mehreren Überfahren und für verschiedene Laserpulsfluenzen bei $f_p = 60 \text{ Hz}$	xix

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

α	Absorptionskoeffizient
Δx	Abweichung in x -Richtung
Δy	Abweichung in y -Richtung
Δz	Abtragstiefe pro Laserpuls
λ	Wellenlänge
λ_c	Grenzwellenlänge für die Berechnung der Strukturrauheit
ϕ	Basiswinkel der Kegelstruktur
ϕ_{Ist}	Istbasiswinkel der Kegelstruktur
ϕ_{Soll}	Sollbasiswinkel der Kegelstruktur
τ	Pulsdauer
θ	Analysewinkel
A	Amplitude der Schwingung
a	Beschleunigung
A_i	Amplitude der i -ten Schwingung
b	Messfeldbreite
D	Durchmesser der Maske in der Abbildungsebene
E_{Phot}	Photonenenergie
E_{Puls}	Pulsenergie
f_P	Pulswiederholfrequenz
$H(n)$	Von-Hann-Wichtungsfunktion
H_S	Schwellfluenz
k	Ortsfrequenz
k_i	Ortsfrequenz der i -ten Schwingung
k_a	Abtastfrequenz
k_{max}	Größte darstellbare Ortsfrequenz
l	Messfeldlänge
m	Mantellinie des Kegels
N_{Mess}	Anzahl der Messwerte
r	Radius

R_{Ist}	Istradius der Linsenstruktur
R_{Kreis}	Kreisradius
r_{max}	Radius der größten Maske
R_{q}	Quadratisch gemittelte Linienrauheit
R_{soll}	Sollradius der Linsenstruktur
s	Strecke
s_1	Zurückgelegte Strecke in der ersten Bewegungsphase
s_2	Zurückgelegte Strecke in der zweiten Bewegungsphase
S_{q}	Quadratisch gemittelte Flächenrauheit
s_{Start}	Winkelposition der ersten Maske
t	Zeit
t_1	Benötigte Zeit für die erste Bewegungsphase
t_2	Benötigte Zeit für die zweite Bewegungsphase
t_{gesamt}	Benötigte Zeit bis zum Erreichen der Winkelposition der ersten Maske
v	Verfahrgeschwindigkeit
v_0	Anfängliche Verfahrgeschwindigkeit
v_{max}	Bearbeitungsgeschwindigkeit
$X(k)$	Spektralfunktion (Fouriertransformierte)
x, y, z	Raumkoordinaten
x_0, y_0, z_0	Räumliche Korrekturparameter für die Annäherung der Referenzstruktur an die Messdaten
z_{Kegel}	Höhendaten des Referenzkegels
z_{Linse}	Höhendaten der Referenzlinse
CaF_2	Chemisches Symbol für Kalziumfluorid
F_2	Chemisches Symbol für das Fluormolekül

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

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 der Datentransfer via klassischem Kupferkabel ist hinsichtlich der Übertragungsgeschwindigkeit begrenzt und wird umso störanfälliger, 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 meist senkrecht zu den dotierten Wellenleiterbahnen ausgerichtet sind, muss eine Umlenkung der Signale im Wafer erfolgen. Die Herstellung der dafür benötigten mikrooptischen Spiegelflächen war bereits Gegenstand einer Vorarbeit [Syr19]. Es konnte gezeigt werden, dass die verwendete Fluorlasermikrostrukturierung auf Basis der Maskenprojektion die Fertigung optischer Elemente mit Strukturgrößen im Mikrometerbereich ermöglicht. Zur Fokussierung der optischen Strahlung bspw. von einem Sender auf der Waferoberfläche in die wellenleitenden Strukturen oder aus der Waferebene in eine Glasfaser werden zusätzlich noch Mikrolinsen benötigt. In dieser Arbeit wird daher ein Verfahren zur Herstellung von rotationssymmetrischen Mikrooptiken vorgestellt.

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 Volumengeometrien verstanden, die eine Auflösung im Mikrometerbereich und Ausdehnungen im Bereich weniger 100 μm 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] und Di et al. [DLD09] genutzten lithografischen Verfahren wird die Problematik des gestuften Abtrags durch Resistinselarrays umgangen. Der Photoresist wird nach dem Aufbringen aufgeschmolzen und formt sich durch die wirkende Oberflächenspannung zu hemisphärischen Strukturen um. Danach folgt ein gleichmäßiges physikalisches Ätzen. Eine detaillierte Prozessbeschreibung ist in Hwu [Hwu09] zu finden. Nach Hwu können so hemisphärische Mikrooptiken mit einem Durchmesser bis minimal 50 μm hergestellt werden. Strukturen mit abweichender Geometrie wie bspw. kegelförmig sind mit diesem Verfahren nicht herstellbar. Weiterhin befinden sich die Strukturen auf der Substratoberfläche.

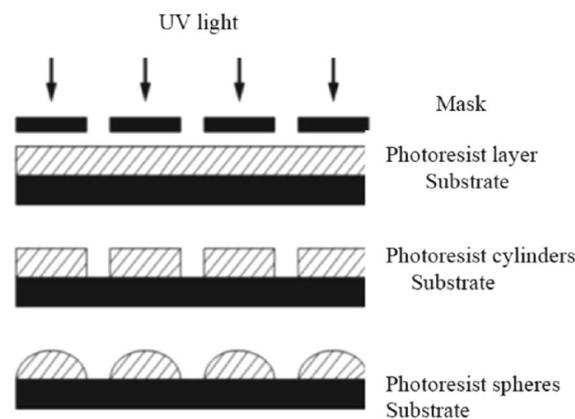


Figure 4 Fabrication process of microlens array based on the thermal reflow method

Abbildung 1.1: Resistinselarrays nach Di et al. [DLD09]

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. Eine Prozessbeschreibung befindet sich in [Her13]. Diesem Verfahren sind nur durch den Einsatz der Laseranlage und 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 von Bogucki et al. [BZG20] gezeigt wird. Die zur Verfügung stehenden Materialien beschränken sich auf Photoresistwerkstoffe.

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 erfordert weitaus höhere Prozesstemperaturen. Worsch et al. [WRES09] zeigen auf, dass der Prozess im Vakuum unter isothermen Bedingungen (z.B. 820°C für Borosilikatglas) durchführbar ist. Erreichbar sind laterale Strukturabmessungen bis minimal $10\ \mu\text{m}$ bei einer Strukturtiefe von $2\ \text{mm}$ [WRES09]. 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.

Für Polymerwerkstoffe kann das bspw. von Moore et al. [MGL16] beschriebene Heißprä-
geverfahren eingesetzt werden. Dabei werden zuerst Löcher mit einem Durchmesser von
mehreren $100\ \mu\text{m}$ in das Abformwerkzeug aus Silizium durch reaktives Ionentiefätzen ein-
gebracht. Diese Form wird nun zusammen mit dem Polymersubstrat von zwei Heizplatten
auf die Glasübergangstemperatur erwärmt und zusammengepresst, sodass das Polymer-
substrat zähflüssig wird und in die Löcher im Abformwerkzeug fließt. Die Abbildung 1.2
zeigt eine schematische Darstellung dieses Prozesses.

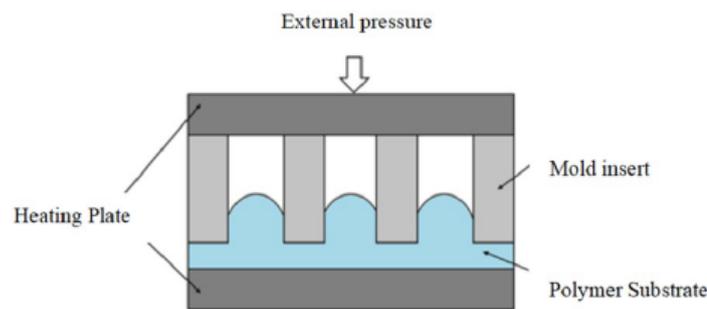


Abbildung 1.2: Heißprägen von Polymerwerkstoffen [YLL18]

Mechanische Verfahren

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

Die Ultrapräzisionszerspanung hingegen arbeitet mit Dreh- und Fräswerkzeugen aus mono-
kristallinem Diamant. Somit können Freiformflächen erzeugt werden [Nau14]. Bedingt durch
den Prozess können entweder rotationssymmetrische (Ultrapräzisionsdrehen) oder verrun-
dete Geometrien (Ultrapräzisionsfräsen) hergestellt werden. Für die erforderliche Präzision
werden erhöhte Anforderungen an die Maschinen gestellt, da diese besonders sensibel
auf äußere Einflüsse wie Vibrationen oder Temperaturschwankungen reagieren. Hatefi et
al. [HAEH20] beschreiben, dass eine optimale Korrektur zwar möglich ist, allerdings erhöht
dies die Produktionskosten deutlich. Ideal sind R_a Rauheiten von wenigen Nanometern
erreichbar. Arrays aus Mikrostrukturen können nur über komplexe Fünffachssysteme herge-
stellt werden.

Additive Verfahren

Für die Herstellung von Mikrooptiken aus Polymerwerkstoffen eignen sich besonders additive Fertigungsverfahren, da diese die Herstellung von nahezu beliebig geformten dreidimensionalen Geometrien ermöglichen. Auf Basis der Zwei-Photonen-Polymerisation können so Strukturen mit einer Auflösung von weniger als einem Mikrometer hergestellt werden. Ein Anwendungsbeispiel für u.A. Freiform-Prismenarrays mit einer R_q Rauheit unter 100 nm findet sich in Bückmann et al. [BSTK14]. Zu den additiven Fertigungsverfahren zählt auch das bspw. von Kim et al. [KBFB11] beschriebene *inkjet printing*. Dabei wird ein geeigneter Polymerwerkstoff (Sol-Gel) aus einer Glaskapillare auf ein vorstrukturiertes Glassubstrat getropft und anschließend mittels UV-Bestrahlung ausgehärtet. Die Durchmesser der so entstandenen Polymerlinsen liegen im Bereich von etwa 50 μm .

Laserverfahren

Ein derzeit optimales Verfahren zur direkten Strukturierung von technischen Gläsern bieten die Excimerlaser, speziell der Fluorlaser. Dessen hohe Photonenenergie von $E_{\text{Phot}} = 7,9 \text{ eV}$ ermöglicht die Bearbeitung von Dielektrika. Hierbei wird das Maskenprojektionsverfahren genutzt, da Excimerlaser generell eine schlechte Strahlqualität im Rohstrahl aufweisen [EE15]. 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. Von Dahotre und Harimkar [DH08] 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 bspw. 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.

Ein Verfahrensbeispiel für die Fluorlasermikrostrukturierung wird von Fricke-Begemann et al. [FBIM06] vorgestellt. Hierbei werden rotationssymmetrische Mikrofresnellinsen mit Durchmessern im Bereich von $600\ \mu\text{m}$ hergestellt, indem das Substrat während der Strukturierung rotiert wird. Diese Rotation erschwert jedoch die Herstellung von Mikrolinsenarrays, da hierfür jeweils der Bearbeitungsbereich auf den Mittelpunkt der Drehachse verschoben werden muss.

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Mikrooptiken ist das *laser wet etching*. Dabei wird mittels Femtosekundenlaser ein Punkttarray in einen Siliziumwafer strukturiert. Danach wird die Substratoberfläche nasschemisch geätzt, sodass ein Array gleichgeformter Mikrostrukturen entsteht. Anwendungsbeispiele finden sich in Meng et al. [MCY15] und Du et al. [DYC12]. Die von Meng vorgestellten konkaven Mikrolinsen haben Durchmesser im Bereich von $60\ \mu\text{m}$, eine Tiefe von ca. $15\ \mu\text{m}$ und R_a Rauheitswerte von ca. $50\ \text{nm}$. Die Herstellung von Mikrolinsen mit unterschiedlichen Krümmungsradien auf dem gleichen Wafer ist mit diesem Prozess jedoch nicht möglich.

Ein Versuchsaufbau, der dem in der vorliegenden Arbeit ähnelt, wird bereits von Yoder [Yod89] beschrieben. In dieser Patentschrift wird ein Verfahren zur Anpassung der Hornhautkrümmung mittels sequentieller Maskenprojektion vorgestellt.

1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

In dieser Arbeit sollen mikrooptische Bauelemente mittels sequentiell Maskenprojektionsverfahren hergestellt werden. Dafür wird eine Maskenwechsellvorrichtung in die verwendete Fluorlaseranlage integriert und die Positionsgenauigkeit der einzelnen Masken überprüft und korrigiert. Nachfolgend soll eine Berechnungsmethode entwickelt werden um rotationssymmetrische Mikrostrukturen mit definierter Geometrie herstellen zu können. In einer Parameterstudie soll weiterhin der Einfluss der Laserpulsfluenz, der verwendeten Maskensequenz und der Laserpulsanzahl pro Maskenposition auf die Mikrostruktur und deren Oberflächenrauheit untersucht werden und die Berechnungsmethode anhand der ermittelten Abhängigkeiten optimiert werden. Danach werden Mikrolinsen mit definiertem Krümmungsradius, bestmöglicher Formgenauigkeit und Oberflächenqualität hergestellt, ausgewertet und mittels Power-Spectral-Density-Funktion analysiert. Abschließend soll der Prozess hinsichtlich der Bearbeitungszeit pro Mikrostruktur optimiert werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Laseranlage

Die verwendete Laseranlage ist aus einem Fluorlaser, einem Strahlengang mit Gas- und Vakuumsystem, einer Bearbeitungskammer mit Achspositioniersystem und diversen Peripheriegeräten wie Schalt- und Steuereinheit aufgebaut. Die Daten der folgenden Beschreibung sind dem Technikhandbuch der Fluorlaseranlage [AG05] entnommen, sofern nicht anders vermerkt.

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 gepulste Gasentladung angeregt wird. Der Laser emittiert elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 157 \text{ nm}$. Dies entspricht einer Photonenenergie von $E_{\text{Phot}} = 7,9 \text{ eV}$. Die Pulswiederholfrequenz kann zwischen 1 Hz und 200 Hz variiert werden. Die maximale Pulsenergie beträgt $E_{\text{Puls}} = 30 \text{ mJ}$ bei einer Pulsdauer von $\tau = 25 \text{ ns}$. Der Laser kann in drei unterschiedliche Betriebsmodi versetzt werden. Der High Voltage Constant Mode (HV-Modus) 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 (constant energy, no gas replacement) kompensiert werden, indem die Hochspannung nachgeregelt wird. Weiterhin ist der EGY PGR-Modus wählbar (constant energy with partial gas replacement). Hierbei wird die Pulsenergie über ein Nachregeln der Entladungsspannung mit partiellem Gasaustausch im Resonator auf einem einstellbaren Wert konstant gehalten.



Abbildung 2.1: Fluorlaser

Strahlführung und -formung

Die Excimerlaser weisen allgemein eine schlechte Strahlqualität im Rohstrahl auf [EE15], was eine Strahlformung für die Verwendung des Maskenprojektionsverfahrens unabdingbar macht. Auf deren relevante Komponenten der verwendeten Anlage wird nachfolgend eingegangen.

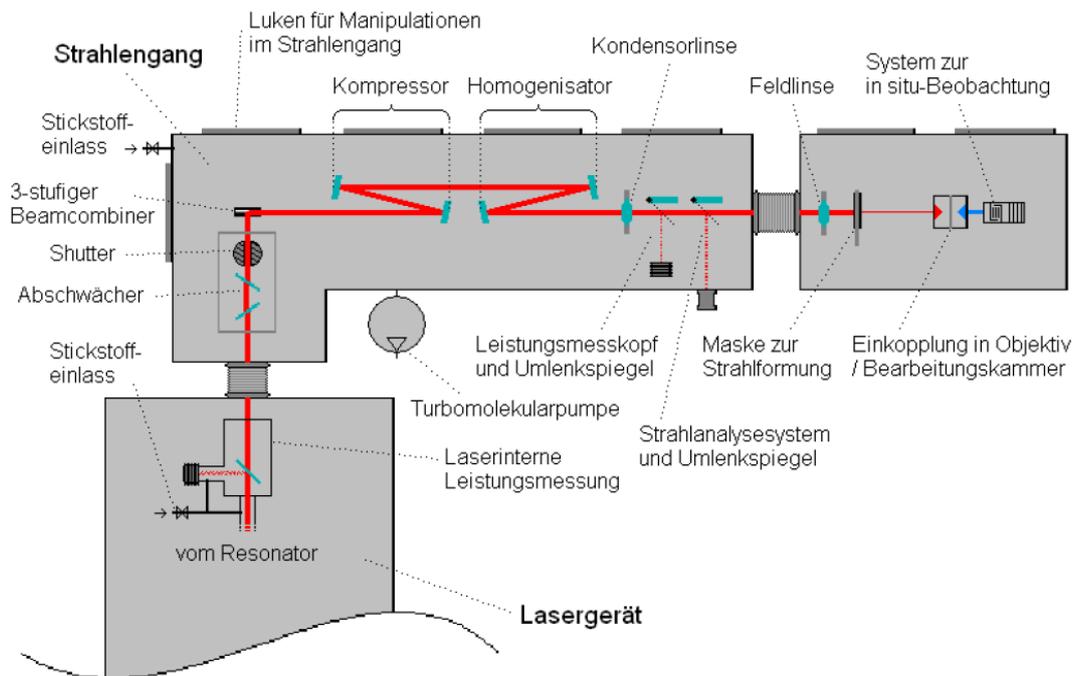


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Strahlformung und -führung [Ber09]

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 (CaF_2)-Platten synchron zueinander verdreht (siehe Abbildung 2.3). Da der Reflexionsgrad von Kalziumfluorid abhängig vom Einfallswinkel ist, kann über eine Winkeländerung der Platten die Laserleistung angepasst werden. Die zweite Kalziumfluoridplatte dient der Korrektur des Strahlversatzes, der durch die erste Platte verursacht wird.

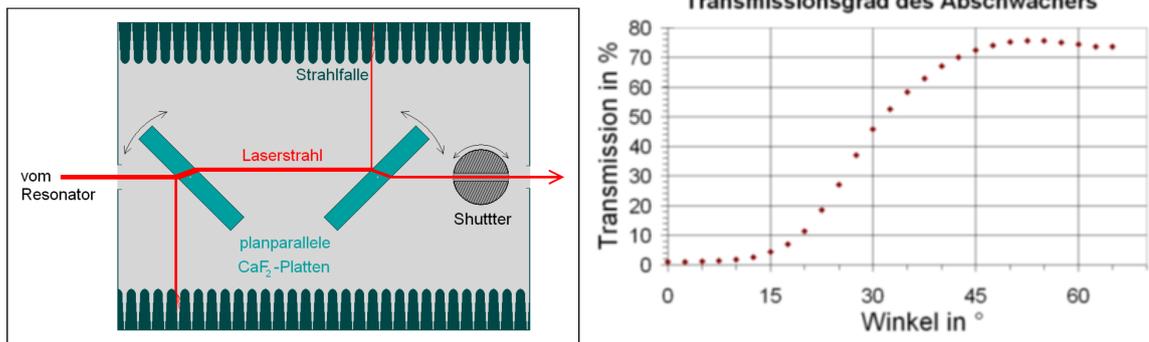


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau (links) und Transmissionsgrad (rechts) des Abschwächers [Häh06, Ber09]

Hähnel [Häh06] gibt den maximalen Transmissionsgrad des Abschwächers mit 75,6% bei 55° und den minimalen mit 1% bei 0° Abschwächerstellung an (siehe Abbildung 2.3). Zu beachten ist, dass es sich bei der Winkelvorgabe nicht um den tatsächlichen Einfallswinkel, sondern um einen softwareseitigen Wert handelt. Nach dem Abschwächer trifft der Laserstrahl auf den Beamcombiner, der aus zwei Treppenspiegeln mit jeweils drei Spiegelsegmenten der Größe 15 mm x 15 mm besteht. Der Laserstrahl wird beim Durchgang durch den Beamcombiner in drei Teilstrahlen zerlegt, die dann um 90° verdreht wieder zusammengesetzt werden (siehe Abbildung 2.4). 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 zusammen mit dem Beamcombiner die Divergenz auf 1 mrad x 1 mrad an.

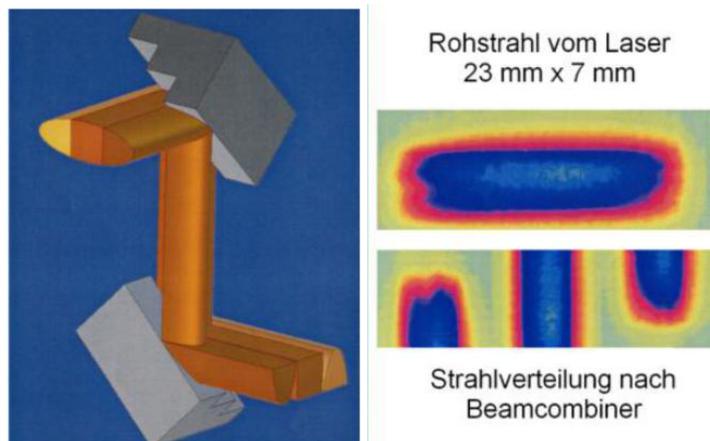


Abbildung 2.4: Funktionsweise des Beamcombiners (links) und Laserstrahlprofil vor und nach dem Beamcombiner (rechts) [AG05]

Der Homogenisator besteht aus zwei Mikrospiegelarrays 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, homogen ausgeleuchteter Fleck erzeugt. Diese Position ist die Maskenebene. 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. $0,5\ \mu\text{m}$ und die Schärfentiefe nach Hähnel [Häh06] mit ca. $20\ \mu\text{m}$ angegeben.

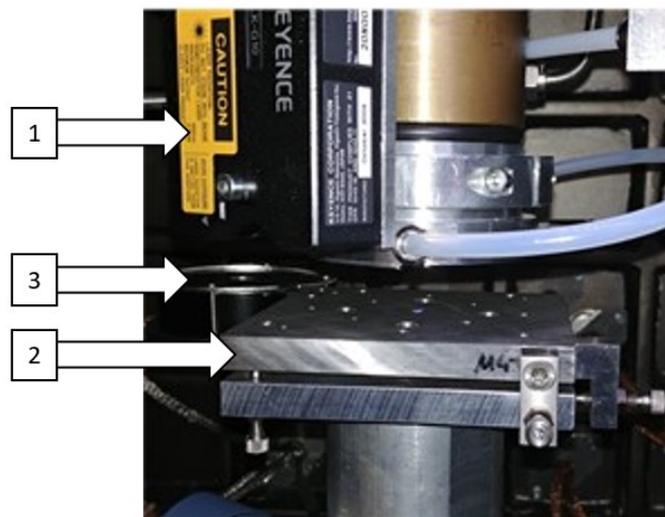


Abbildung 2.5: Objektiv mit Schutzgasdüse, Triangulationssensor (1), Leistungsmesskopf (3) und Bearbeitungstisch (2)

Direkt am Objektiv ist eine Crossjet-Düse 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 (1) befestigt, um den Objektstisch (2) auszurichten (siehe Abbildung 2.5). Der Leistungsmesskopf (3) ist am Objektstisch befestigt.

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 ($<5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$), 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 Abstand vom Objektiv bis zum Bearbeitungstisch gering ist. Das Werkstück wird über ein Achssystem bestehend aus drei Linearachsen (x -, y - und z -Achse) positioniert. Die Parameter der Positionierachsen sind in der folgenden Tabelle angeführt.

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

Tabelle 2.1: Parameter des Achspositioniersystems [AG05]

2.2 Lasermikrostrukturierung: Maskenprojektionsverfahren

Die Mikrostrukturierung mittels Laserstrahlung kann in zwei Verfahren eingeteilt werden, wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Wird ein Laser mit einer sehr guten Strahlqualität (Gaußstrahl) verwendet, kann das Substrat direkt schreibend bearbeitet werden. Die 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 werden zumeist mittels Maskenprojektionsverfahren eingesetzt werden. Dazu wird eine beliebig geformte Blende in den Strahlengang eingebracht, die homogen ausgeleuchtet werden muss [HG09]. Diese Transmissionsmaske wird dann durch das verwendete Objektiv verkleinert auf dem Werkstück abgebildet. Wird im bestrahlten Bereich die materialspezifische Laserpulsschwellfluenz 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.

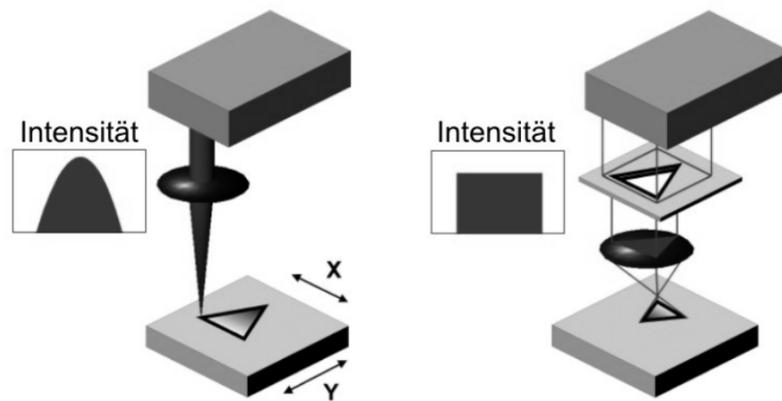


Abbildung 2.6: Abtrag mittels Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück (links) oder Maskenprojektion mit homogener Bestrahlung (rechts) [HG09]

3 Material und Methoden

3.1 Borosilikatglas D263T

Das farblose amorphe Borosilikatglas D263T der Firma Schott AG ist aufgrund seiner Zusammensetzung chemisch besonders stabil [Sch21]. Es wird unter anderem für liquid crystal displays (LCD), touch control panels, Solarzellen und Mikrooptiken mit hoher Laserersterschwelle eingesetzt [IOF19]. Abbildung 3.1 zeigt den Transmissionsgrad des Werkstoffs in Abhängigkeit von der eingestrahltten Wellenlänge. Aus der Abbildung geht hervor, dass das Material für Wellenlängen kleiner als $\lambda = 300$ nm nicht mehr transparent ist und mit einem Fluorlaser bearbeitet werden kann. Die Substratfläche beträgt 20 mm x 30 mm bei einer Dicke von 0,5 mm. Weitere chemische und physikalische Eigenschaften sind dem Produktdatenblatt [Sch21] zu entnehmen.

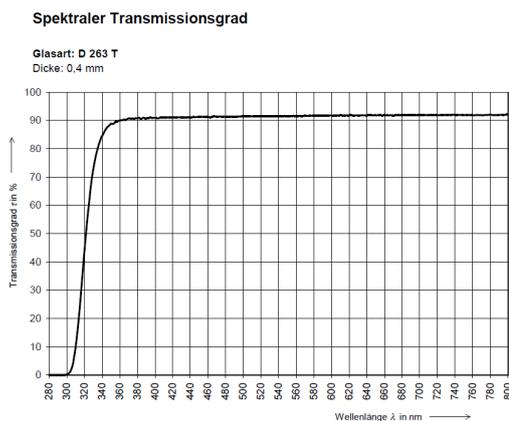


Abbildung 3.1: Spektraler Transmissionsgrad von D263T [Sch21]

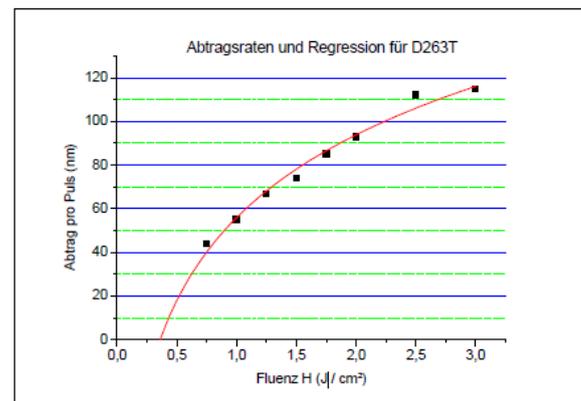


Abb. 6.13: Abtragsrate pro Puls in D263T bei 200 Hz.

Abbildung 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 Pulswiederholfrequenz von 200 Hz in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Laserpulschwellfluenz wird mit $H_S = 0,36 \text{ J}/\text{cm}^2$ und der Absorptionskoeffizient mit $\alpha = 18,3 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ angegeben.

3.2 Maskenherstellung

Als Masken sollen mit Tantal beschichtete Kalziumfluoridsubstrate verwendet werden. Die Tantalschichten werden mittels Laserpulsabscheidung (englisch: *pulsed laser deposition*, PLD) erzeugt. Zuerst muss getestet werden, ob die Fluorlaserstrahlung die Beschichtungen in Form von bspw. Abplatzungen verändert. Es werden fünf Testbeschichtungen mit Schichtdicken von 25 nm, 50 nm, 75 nm, 100 nm und 150 nm (siehe Abbildung 3.3) hergestellt und nacheinander in der Maskenebene positioniert. Bei maximaler Laserleistung werden die Testbeschichtungen mit einer steigenden Anzahl an Laserpulsen bestrahlt. Nach jedem Laserpulszug wird die durch die Beschichtung transmittierte Laserleistung gemessen. Vor dem Versuch waren alle Testschichten optisch dicht, d.h. es wurde keine Laserleistung transmittiert. Die Tantalschichten werden jeweils mit insgesamt 1,0 Millionen Laserpulsen bestrahlt. Dabei kann keine Vergrößerung der transmittierten Laserleistung gemessen werden. Auch bei der nachfolgenden Untersuchung der Testbeschichtung mit einem konfokalen Mikroskop kann keine Veränderung festgestellt werden. Demnach wird unabhängig von ihrer Dicke die Tantalbeschichtung nicht durch die Laserstrahlung verändert. Da für die Versuche in der Auswertung insgesamt deutlich geringere Laserpulsanzahlen pro Maske genutzt werden sind die Tantalschichten ausreichend haltbar.



Abbildung 3.3: Tantal-Testbeschichtungen mit unterschiedlicher Dicke

Die verwendeten Kalziumfluoridsubstrate haben jeweils einen Durchmesser von 5 mm und wurden für die Beschichtung zentrisch mit Lochblenden versehen, sodass kreisförmige Schichten entstehen. Als Substratmaske wird eine Tantalfolie verwendet, in die die entsprechenden Löcher mit einem Ultrakurzpulslaser geschnitten werden. Die Substratmaske ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Der Durchmesser der Löcher steigt dabei für jedes Substrat um etwa $53\ \mu\text{m}$, was einer Vergrößerung des Strukturdurchmessers in der Abbildungsebene um etwa $2\ \mu\text{m}$ entspricht. Die kleinste Maske erzeugt in der Abbildungsebene eine Kreis-

struktur mit etwa $2\ \mu\text{m}$ Durchmesser (roter Kreis in Abbildung 3.7) und die größte Maske eine Kreisstruktur mit etwa $100\ \mu\text{m}$ Durchmesser. Es werden demnach 50 Masken gefertigt. Die mit einem optischen Durchlichtmikroskop vermessenen Durchmesser jeder Maske sind der Tabelle B.1 zu entnehmen. Die jeweiligen Schichtdicken liegen im Bereich von $100\ \text{nm}$.

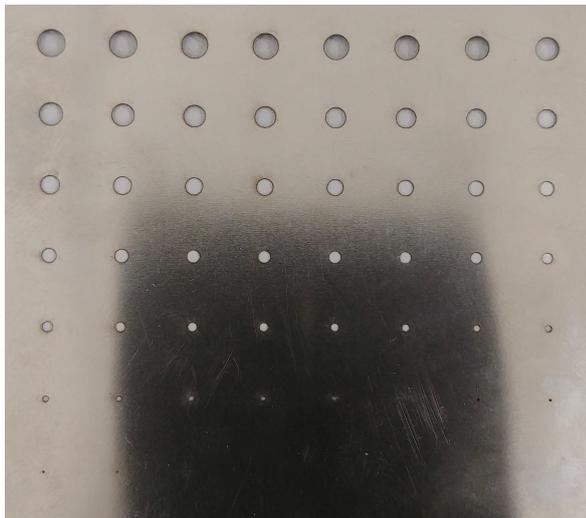


Abbildung 3.4: Substratmaske

Die Abbildung 3.5 zeigt eine Durchlichtmikroskopaufnahme der Maske mit $D = 90\ \mu\text{m}$. Es ist zu erkennen, dass die Tantalsschicht nicht komplett geschlossen ist. Stattdessen sind vereinzelt Löcher vorhanden. Da diese für die verschiedenen Masken nicht am gleichen Ort liegen ist kein messbarer Einfluss der Löcher auf die Struktur zu erwarten. Weiterhin liegt der Durchmesser der Löcher unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabs bei maximal $1\ \mu\text{m}$ und damit im Bereich der Auflösungsgrenze.

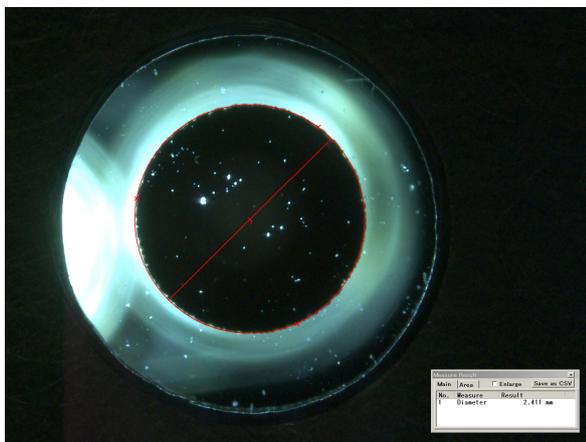


Abbildung 3.5: Durchlichtmikroskopaufnahme der Maske mit $D = 90\ \mu\text{m}$

3.3 Versuchsaufbau

Der nachfolgend beschriebene Versuchsaufbau wird so im Strahlengang positioniert, dass sich die einzelnen Masken in der Maskenebene befinden (vgl. Abbildung 2.2). Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.6 gezeigt und besteht aus einer Linearachse (1), einem Schrittmotor (2) mit Getriebe (3), einem Hall-Sensor (4) und dem Maskenrad (5). Die Linearachse wird benötigt, um das Maskenrad auf die Strahlhöhe zu justieren. Der Schrittmotor hat eine Auflösung von 4000 Inkrementen pro 360° und zusammen mit dem 33:1 Getriebe ergibt sich somit eine minimal mögliche Winkeländerung bei der Bewegung des Maskenrads von ca. $0,0027^\circ$. Der Hall-Sensor ermöglicht eine Referenzierung der Drehbewegung (*homing*).

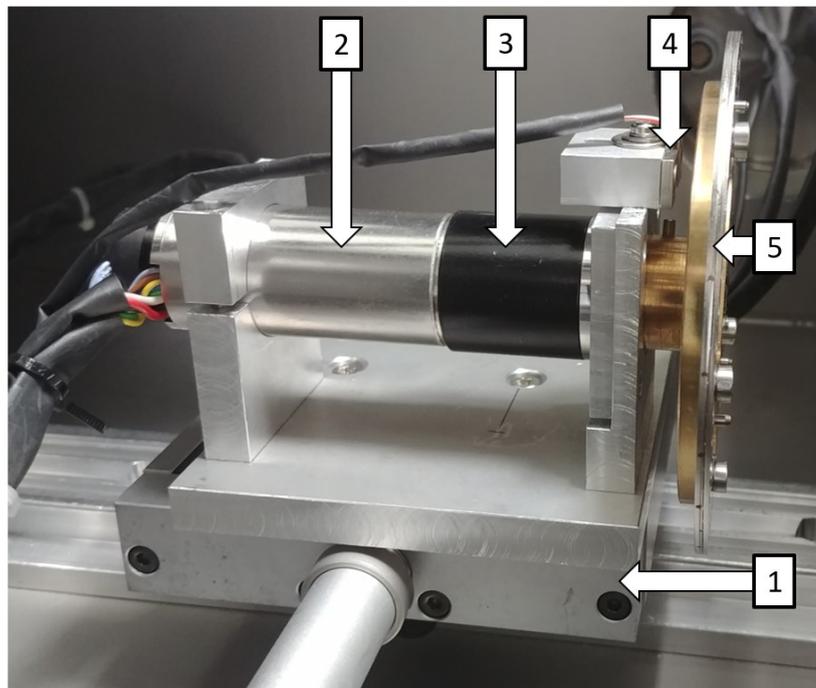


Abbildung 3.6: Versuchsaufbau

In dem Maskenrad sind die beschichteten Substrate gehalten, die sich im Abstand von 50 mm zur Drehachse befinden. Die Halterung ist aus drei lasergeschnittenen Blechen zusammengesetzt, wobei die Bohrungen für die Substrate in den Deckblechen jeweils 4 mm und im Zwischenblech jeweils 5 mm (Substratdurchmesser) betragen. Wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, sind die Substrate sortiert nach größer werdendem Schichtdurchmesser in den Halter eingelegt. Die Winkeldifferenz zwischen den Mittelpunkten zweier aufeinanderfolgender Masken beträgt $360^\circ/50 = 7,2^\circ$.



Abbildung 3.7: Maskenrad mit kreisförmig beschichteten Substraten (roter Kreis: kleinste Maske; gelbe Kreise: Positionsstifte; Pfeil: Drehrichtung während der Bearbeitung)

Für die Formgenauigkeit der rotationssymmetrischen Mikrooptiken, die in Kapitel 4 strukturiert werden sollen, ist es entscheidend, dass die Abträge der einzelnen Masken möglichst konzentrisch sind. Dies muss bereits bei der Fertigung des Maskenrads berücksichtigt werden. Die Bohrung im Maskenrad (Messingbauteil), die die Motorwelle aufnimmt, wird daher mit der kurzen Welle, an der der Maskenhalter (Edelstahlbauteil) anliegt, in einer Spannung gefertigt (siehe Abbildung 3.7). Dabei wird sowohl die Bohrung als auch die Welle jeweils auf ein Maß gefertigt, bei dem die entsprechenden Fügepartner, deren Maße unveränderlich sind, mit Druck aber noch von Hand zusammengesetzt werden können. So soll das Spiel minimiert werden. Weiterhin sind an dem Maskenrad drei Positionsstifte angebracht, um eine eventuelle Rotationsbewegung des Maskenhalters zu unterbinden.

Die Justage der Masken auf die Strahlposition erfolgt zuerst grob visuell, dann mittels eines Justagelasers und nach Integration des Versuchsaufbaus in die Laseranlage über die Abträge der einzelnen Masken.

3.4 Optimierung der Positionsgenauigkeit der Masken

Werden die einzelnen Abträge nun verglichen, so kann festgestellt werden, dass trotz der dafür ausgelegten Fertigung des Maskenrads nicht alle Kreisstrukturen exakt konzentrisch zueinander liegen. Dies wird in Abbildung 3.8 deutlich. Für die dargestellte Struktur wurde jede Maske beginnend mit der kleinsten mit fünf Laserpulsen belichtet. Währenddessen erfolgte keine Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem zu bearbeitenden Substrat. Demnach sollte idealerweise eine Kegelstruktur entstehen. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Kegelspitze nicht im Zentrum der Struktur liegt, sondern zu diesem in negativer x -Richtung verschoben ist. Dieser Fehler kann die folgenden Ursachen haben: ein fehlerhafter Rundlauf bedingt durch das Maskenrad und/oder Abweichungen der Konzentrizität der Projektionsmasken durch ungenauen Sitz der Maskensubstrate im Maskenhalter bzw. ungenaue Positionierung der Lochblenden auf den Maskensubstraten vor der Beschichtung.

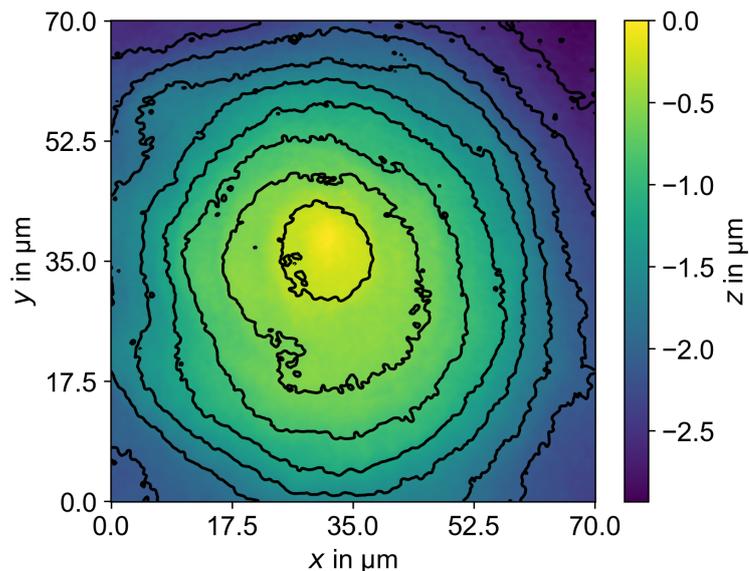


Abbildung 3.8: Teststruktur ohne Korrektur

Unabhängig von der Fehlerursache kann diese Abweichung durch eine relative Verschiebung der Strukturen zueinander in der Abbildungsebene korrigiert werden. Dafür wird der Abtrag einer Maske als Referenz ausgewählt und die Abträge aller anderen Masken auf diesen ausgerichtet. Demnach muss die Abweichung eines jeden Abtrags zum Referenzabtrag gemessen werden. Es werden zwei Messreihen aufgenommen. In der ersten Messreihe wird jeweils untereinander mit jeder Maske das Substrat strukturiert. Im Abstand von $200\ \mu\text{m}$ wird daneben eine Reihe von Abträgen mit der Referenzmaske strukturiert. Nun kann jeweils die Abweichung der Abtragsmittelpunkte in x - und y -Richtung vermessen wer-

den. Dabei wird von der Abweichung in x -Richtung jeweils der Messreihenabstand subtrahiert. Diese Messung ist beispielhaft in Abbildung 3.9 dargestellt.

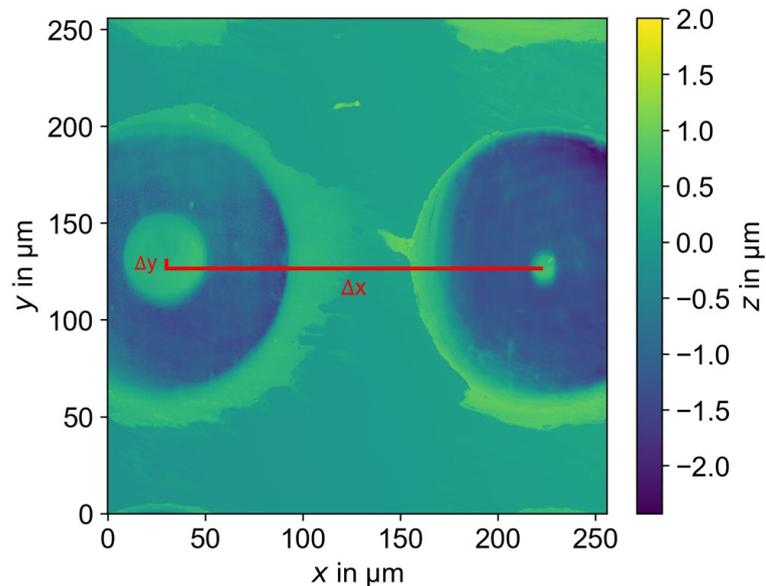


Abbildung 3.9: Vermessung der Abweichung der Abtragsmittelpunkte (rechter Abtrag: Referenzmaske, linker Abtrag: zu korrigierende Maske mit $D = 46 \mu\text{m}$)

Mit der nun bekannten Abweichung der Abtragsmittelpunkte für jede Maske kann eine Korrekturbewegung des Bearbeitungstischs erfolgen. Für die Korrektur der in Abbildung 3.9 dargestellten Maske mit dem Durchmesser $D = 46 \mu\text{m}$ ergibt sich eine Abweichung in y -Richtung von $+6,5 \mu\text{m}$ und in x -Richtung von $+6 \mu\text{m}$. Damit die Abträge konzentrisch sind, muss demnach vor der Strukturierung mit dieser Maske der Bearbeitungstisch um $-6,5 \mu\text{m}$ in y -Richtung und um $-6 \mu\text{m}$ in x -Richtung verschoben werden.

3.5 Berechnung geeigneter Prozessparameter

Soll eine definierte Struktur hergestellt werden, so müssen die geeigneten Prozessparameter vorher berechnet werden. Die Strukturierung kann über die Maskensequenz und die Abtragtiefe pro Maske gesteuert werden. Die verwendete Maskensequenz wird dabei von der Zielgeometrie bestimmt, d.h. es werden nicht für jede Zielgeometrie alle Masken benötigt werden. Die Abtragtiefe kann über die Laserpulsfluenz bzw. die Laserleistung gesteuert werden. Die Laserleistung kann jedoch nicht direkt vorgegeben werden kann, sondern nur mittels einer Änderung des Abschwächerwinkels und gleichzeitiger Leistungsmessung in der Bearbeitungskammer variiert werden (siehe Kapitel 2). Vor jeder neuen Abtragsposition muss die Strukturierung daher unterbrochen werden. Da dies nicht praktikabel ist, wird vor der Strukturierung eine geringe Laserpulsfluenz im Bereich von $1 \text{ J}/\text{cm}^2$

eingestellt und die Abtragstiefe über die Anzahl der eingebrachten Laserpulse gesteuert. Demnach ist zu beachten, dass die Struktur prinzipiell diskretisiert ist: in lateraler Dimension durch die zur Verfügung stehenden Masken und in vertikaler Dimension durch die Anzahl der eingebrachten Laserpulse (siehe Abbildung 4.13).

Für die Berechnung der Abtragstiefe werden die folgenden idealisierten Annahmen getroffen: die Abtragsflanken sind exakt senkrecht und das Abtragsfeld wird mit homogener Intensitätsverteilung im Laserstrahl und somit gleichmäßiger Tiefe strukturiert. Die Abtragstiefe pro Laserpuls Δz für jede verwendete Laserpulsfluenz kann aus dem Lambert-Beer'schen Gesetz mit den Daten aus Kapitel 3.1 nach Formel 3.1 berechnet werden. Für die Berechnungen in diesem Kapitel wird nachfolgend eine Laserpulsfluenz von $H = 1 \text{ J/cm}^2$ angenommen. Der Abtrag pro Laserpuls entspricht dabei etwa $\Delta z = 55 \text{ nm}$.

$$\Delta z = \frac{\ln \frac{H}{H_S}}{\alpha} \quad (3.1)$$

Im einfachen Fall eines Kegels als Zielgeometrie kann die Abtragstiefe aus dem Basiswinkel ϕ und aus der Differenz der Radien zweier aufeinanderfolgender Masken von $\Delta D/2 \approx 1 \mu\text{m}$ berechnet werden. Da jedoch, wie bereits erwähnt, die möglichen Abtragstiefen diskret sind, wird die für einen Basiswinkel benötigte Abtragstiefe zumeist nicht exakt eingestellt werden können. Dadurch kommt es für jede laterale Abtragsposition zu einem Fehler, der sich mit fortschreitender Strukturierung aufsummiert und in einer Basiswinkelabweichung resultiert.

Somit wird eine genauere Berechnungsmethode benötigt. Da es sich um eine rotationsymmetrische Struktur handelt, kann die dreidimensionale Zielgeometrie als eine zweidimensionale Konturlinie dargestellt werden. Dabei genügt es, die Kontur vom Strukturmittelpunkt bei $r = 0 \mu\text{m}$ bis maximal zum Radius der größten Maske $r_{\text{max}} = D/2 \approx 50 \mu\text{m}$ zu betrachten. Als idealisierte Kontur für den Kegel wird eine Geradengleichung der Form $z = \arctan \phi_{\text{Soll}} \cdot r + n$ angenommen, wobei ϕ_{Soll} der Sollbasiswinkel des Kegels ist und n jeweils so angepasst wird, dass die Kontur bei $z = 0 \mu\text{m}$ beginnt. Um den Fehler der zuvor beschriebenen Methode zu verhindern, wird nun ein Soll-Ist-Vergleich verwendet. Dabei wird zuerst die kontinuierliche Sollkontur nach der gegebenen Formel mit einer Genauigkeit von $0,1 \mu\text{m}$ berechnet. Die errechnete (Ist-)Kontur ergibt sich jeweils aus der Anzahl der Laserpulse pro lateraler Abtragsposition. Nun wird beginnend mit der zweitkleinsten Maske die Differenz der z -Werte von Istkontur zu Sollkontur an der vorherigen lateralen Abtragsposition berechnet. Dieser Differenzwert wird durch den Abtrag pro Laserpuls geteilt und das Ergebnis aufgerundet, um die optimale Laserpulsanzahl für die aktuelle Abtragsposition zu erhalten. Durch den Soll-Ist-Vergleich der Differenzwertbildung können sich

eventuelle Fehler nicht aufsummieren sondern werden gegebenenfalls bei der Berechnung der Laserpulsanzahl für die nächstgrößere Maske kompensiert. Das Ergebnis einer beispielhaften Konturberechnung für eine Kegelform mit einem Basiswinkel von $\phi_{\text{soll}} = 10^\circ$ ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

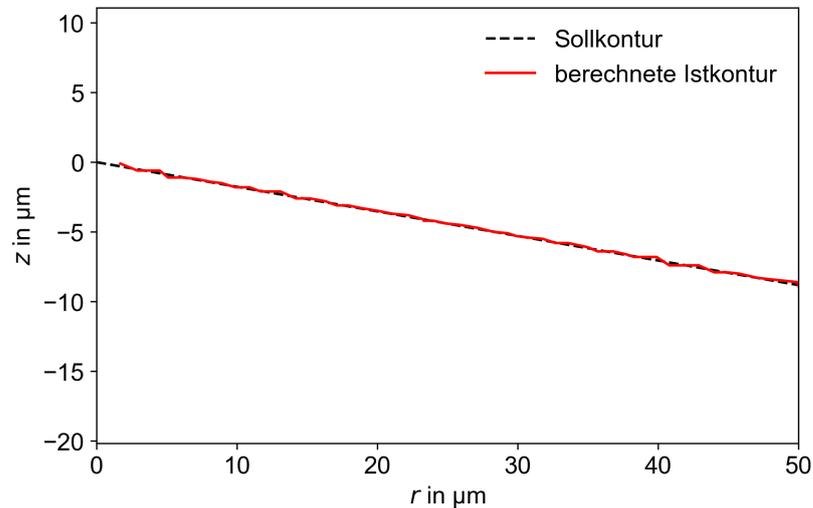


Abbildung 3.10: Kontur einer kegelförmigen Zielgeometrie mit $\phi_{\text{soll}} = 10^\circ$ und berechnete Abtragskontur

Falls allerdings bei dieser Berechnungsmethode der z -Wert der Istkontur kleiner als der z -Wert der Sollkontur wird, so wird die Abtragtiefe der nächstgrößeren Maske zu 0 berechnet und die wiederum nächste Abtragtiefe wird somit zu groß, wodurch ein stufenförmiges Profil entsteht. Dieser Fehler ist in Abbildung 3.10 bei $r \approx 35 \mu\text{m}$ zu sehen, kann allerdings aufgrund des geringen Basiswinkels der Zielgeometrie hier vernachlässigt werden. Mit größer werdendem Basiswinkel wird auch die Stufenform ausgeprägter. Eine Korrektur kann erfolgen, indem nach Abtragspositionen gesucht wird, bei denen die Laserpulsanzahl über einem geometrieabhängigen Schwellwert liegt. Nun wird diese Laserpulsanzahl um einen Korrekturwert verringert und die Laserpulsanzahl der vorherigen und nachfolgenden Abtragsposition jeweils um die Hälfte dieses Korrekturwertes erhöht. Wird der Schwellwert bspw. auf 15 Laserpulse gesetzt, so wird die Laserpulsanzahl an den entsprechenden Abtragspositionen um 10 verringert und an den jeweils vorherigen und nachfolgenden Abtragspositionen um 5 erhöht. Somit bleibt die Gesamtzahl der Laserpulse für die Strukturierung konstant und die Stufen in der Istkontur werden geglättet. Diese Korrektur kann dann mit verringertem Schwellwert erneut ausgeführt werden, bis die optimierte Istkontur keine Stufen mehr aufweist. Das Ergebnis nach der Korrektur einer kegelförmigen Zielgeometrie mit $\phi_{\text{soll}} = 20^\circ$ ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Dabei wurde der Schwellwert zuerst auf 15 und danach auf 10 Laserpulse (dabei Verringerung der Laserpulsanzahl an

der schwellwertüberschreitenden Abtragsposition um 6 und Erhöhung an der vorherigen sowie nachfolgenden Abtragsposition um 3 Laserpulse) gesetzt. Weiterhin wird die Strukturierungstiefe auf $10\ \mu\text{m}$ begrenzt, um im Bereich der Schärfentiefe zu bleiben. Andernfalls wäre eine Fokuspachführung notwendig. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen von der Zielgeometrie deutlich verringert werden konnten. Diese berechnete und gegebenenfalls optimierte Laserpulsanzahl pro Maske wird nun zusammen mit der in Kapitel 3.4 beschriebenen Korrektur der Position der Abtragsmittelpunkte in das CNC-Programm zur Laseransteuerung implementiert.

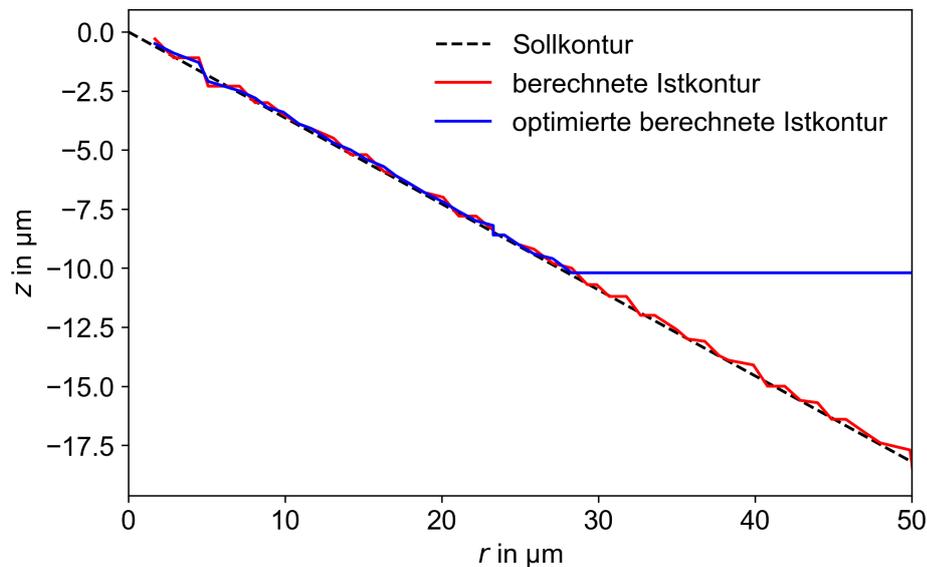


Abbildung 3.11: Kontur einer kegelförmigen Zielgeometrie mit $\phi_{\text{soll}} = 20^\circ$ und optimierte berechnete Abtragskontur

Für die Herstellung von Linsengeometrien wird eine Kontur der Form $z = \sqrt{R_{\text{soll}}^2 - r^2} + n$ berechnet, wobei R_{soll} für den zu erreichenden Radius der Linsenstruktur steht. Die Vorgehensweise zur Berechnung geeigneter Prozessparameter ist dabei identisch.

3.6 Überprüfung der Formgenauigkeit

Die Mikrostrukturen werden mit einem Laserscanningmikroskop vermessen. Die Analyse der Mikroskoprohdaten (x - und y -Koordinaten mit jeweiligem z -Höhenwert) sowie auch die dafür benötigte Datenaufbereitung erfolgt in der Open-Source-Entwicklungsumgebung *Spyder* und der Programmiersprache *Python*.

Um die Formgenauigkeit der gesamten Struktur zu überprüfen werden jeweils die dreidimensionalen Messdaten analysiert. Dafür wird der Datensatz mit z -Höhenwerten zuerst so entkippt und positioniert, dass die Substratoberfläche auf $z = 0 \mu\text{m}$ liegt. Danach wird der für die Auswertung relevante Bereich der Mikrostruktur selektiert. Das Ergebnis ist beispielhaft in Abbildung 3.12 dargestellt.

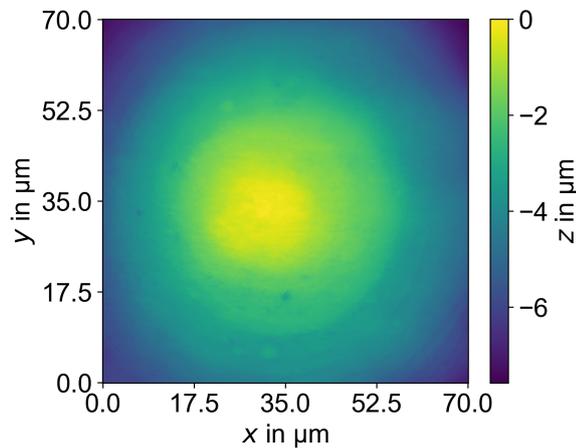


Abbildung 3.12: Für die Auswertung selektierter Bereich der Mikrostruktur

Die Formgenauigkeit wird hinsichtlich der Abweichung von einer rotationssymmetrischen Referenzstruktur untersucht. Diese wird jeweils über geometrische Formeln berechnet. Für den Referenzkegel gilt:

$$r^2 = (x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 \quad (3.2)$$

$$m = \frac{r}{\sin(90^\circ - \phi_{\text{ist}})} \quad (3.3)$$

$$z_{\text{Kegel}} = \sqrt{m^2 - r^2} + z_0 \quad (3.4)$$

Dabei steht m für die Mantellinie des Kegels und z_{Kegel} für die Höhe. x_0 , y_0 und z_0 sind Korrekturparameter, die benötigt werden, um den Mittelpunkt der Referenzstruktur räumlich auf die Messdaten auszurichten. Das Argument in der Sinusfunktion in Formel 3.3 bezieht sich auf den halben Öffnungswinkel der Kegelspitze und wird daher für die Berücksichtigung

des Basiswinkels umgerechnet. Für die Referenzlinsengeometrie gilt:

$$z_{\text{Linse}} = \sqrt{R_{\text{Ist}}^2 - r^2} + z_0 \quad (3.5)$$

Die entsprechende Referenzstruktur wird nun an die Messdaten dreidimensional angenähert. Der variable Parameter ist dabei der Istbasiswinkel ϕ_{Ist} für die Kegelstruktur bzw. der Istradius R_{Ist} für die Linsestruktur sowie die räumlichen Korrekturparameter. Nach erfolgter Approximation der Messdaten kann anhand dieser Parameter auch ein Vergleich zum jeweiligen Sollparameter erfolgen. In Abbildung 3.13 sind die genannten Referenzstrukturen beispielhaft dargestellt.

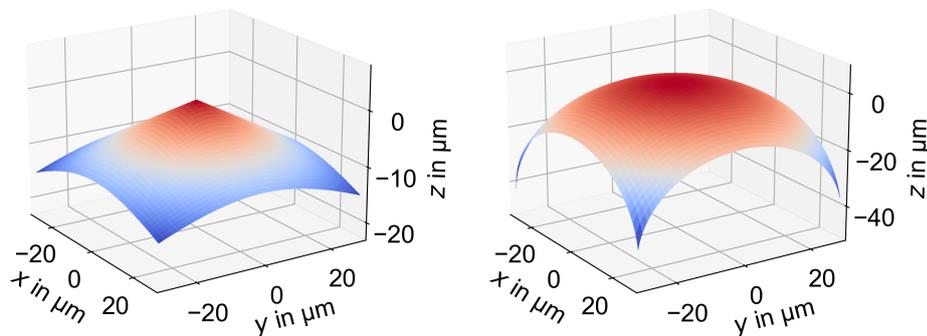


Abbildung 3.13: Referenzstrukturen: Kegel (links) und Linse (rechts)

Die Formabweichung kann nun untersucht werden, indem von den Messdaten die jeweils angenäherte Referenzstruktur subtrahiert wird. Für die Beispielstruktur ist dies in Abbildung 3.14 dargestellt.

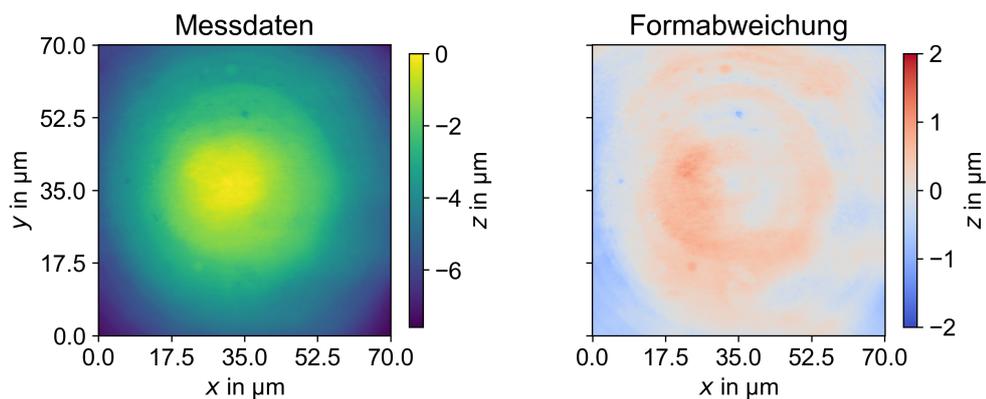
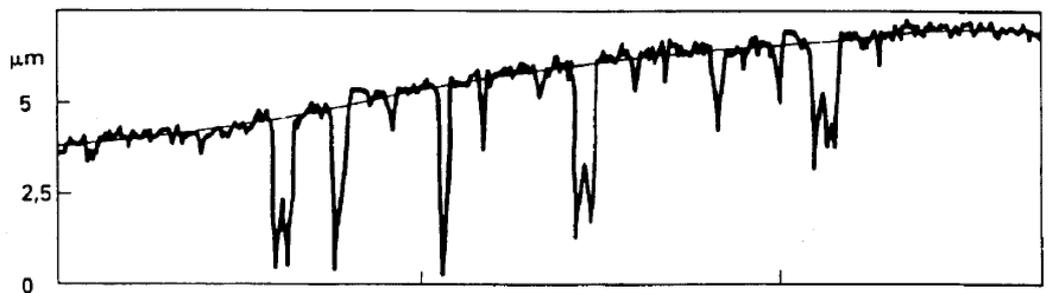


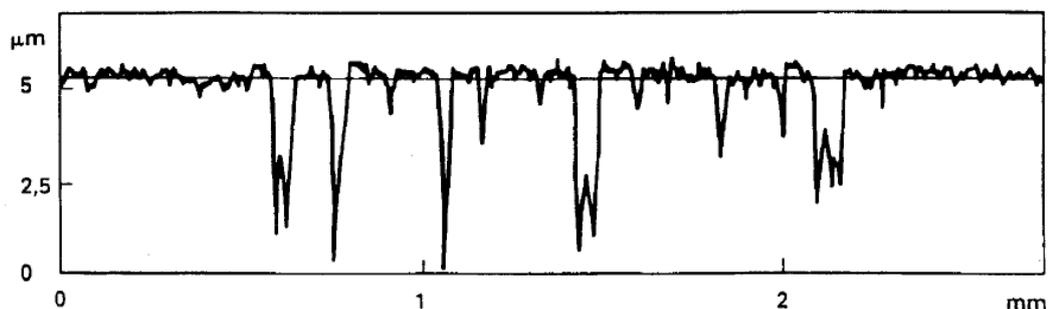
Abbildung 3.14: Vermessene Teststruktur (links) und Formabweichung (rechts) mit $\phi_{\text{Ist}} = 7,7^\circ$

3.7 Rauheitsanalyse

Einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Einsetzbarkeit der mikrooptischen Bauelemente liefert die Oberflächenrauheit. Wird die Oberflächenrauheit bezogen auf die Wellenlänge der einfallenden Strahlung zu groß, so nimmt die Streuung an der Grenzfläche zu, d.h. die Strahlungsverluste nehmen zu. Da sich die Berechnungsvorschriften der Rauheitsparameter in DIN EN ISO 25178 [DIN12] auf planare Profile bzw. Flächen beziehen, muss eine sogenannte Formentfernung (F-Operator) vorgenommen werden. Eine erste Formentfernung findet bereits beim Entkippen der Messdatenwolke statt, wobei eine geneigte Ebene subtrahiert wird. Die Vorgehensweise für das Entfernen komplexerer und unbekannter Formen ist in DIN 13565-1 [DIN98] beschrieben. Dabei wird das zu untersuchende Profil zweifach gefiltert, um eine Referenzmittellinie zu erhalten, die dann von dem Profil subtrahiert wird. Ein Beispiel dieser Berechnung ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Die Rauheitsberechnung bezieht sich auf das nun planare Profil.



c) Lage der Referenzlinie im Primärprofil



d) Rauheitsprofil entsprechend dieser Norm

Abbildung 3.15: Filtermethode zur Formentfernung nach DIN EN ISO 13565-1 [DIN98]

Da bei jeder auszuwertenden Struktur in dieser Arbeit die zugrundeliegende Form bzw. Sollgeometrie bekannt ist, kann von der Vorgehensweise nach DIN abgewichen werden. Stattdessen wird die in Kapitel 3.6 beschriebene Formabweichung als Grundlage der Rauheitsberechnung genutzt, da das Entfernen der angenäherten Referenzstruktur prinzipiell

identisch mit dem Vorgehen nach DIN ist. Die quadratisch gemittelte Oberflächenrauheit wird nun wiederum nach DIN EN ISO 25178 [DIN12] berechnet:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l \cdot b} \int_0^b \int_0^l z^2(x,y) dx dy} \quad (3.6)$$

wobei l für die Länge und b für die Breite des Messfeldes steht.

3.8 Auswertung mittels PSD-Funktion

In einer Vorarbeit [Syr21] wurde mit dem Ziel der Prozessoptimierung ein Auswertungsalgorithmus auf Basis der Power-Spectral-Density-(PSD)-Funktion entwickelt, der auch in dieser Arbeit genutzt und nachfolgend kurz vorgestellt werden soll. Dafür werden testweise zwei simulierte Profilschnitte analysiert.

Nach der Vermessung einer Oberfläche liegen die Höheninformation als (orts-)diskrete, nichtperiodische Signale $f(x)$ vor. Soll dieses Signal analysiert werden, so kann die diskrete Fouriertransformation (DFT) angewandt werden, die die Höhendaten in Ortsfrequenzen zerlegt und mit den entsprechenden Amplituden darstellt. Dieses Spektrum beschreibt die Topografie der vermessenen Oberfläche exakt und kann deswegen auch zur Optimierung des Herstellungsprozesses genutzt werden. Dafür wird das erhaltene Spektrum auf Ortsfrequenzen untersucht, deren Amplitude als lokales Maximum (*Peak*) erscheint. Entspricht nun ein Prozessparameter dieser Ortsfrequenz, so beeinflusst er die Mikrostruktur negativ und ist ein erster Ansatzpunkt für eine Prozessoptimierung. Eine ausführliche Herleitung der DFT aus der Fourierreihe einer harmonischen Schwingung sowie theoretische Betrachtungen zu der genutzten Von-Hann-Wichtungsfunktion befinden sich ebenfalls in der Vorarbeit [Syr21].

Das Signal $f(x)$ ist im Intervall $[0, T]$ an N_{Mess} Stellen abgetastet:

$$\{f(x_n)\}_{0 \leq n \leq N_{\text{Mess}}-1} = f(x_0), f(x_1) \dots f(x_{N_{\text{Mess}}-1}) \quad (3.7)$$

Für diese Folge von diskreten Messwerten ergibt sich die Spektralfunktion bzw. Fouriertransformierte $X(k)$ zu

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N_{\text{Mess}}-1} f[x_n] e^{-j2\pi kn/N_{\text{Mess}}} \quad (3.8)$$

mit der Anzahl der Messwerte N_{Mess} , $k = 0, 1, 2, \dots, N_{\text{Mess}}-1$ und $X(k)$ als k -tem spektralen

Anteil. Die Ursache für genau N spektrale Anteile liegt in der Periodizität der Exponentialfunktion $e^{-j2\pi kn/N_{\text{Mess}}}$ [Wer08]. Dieses diskrete Spektrum kann dann wieder in diskrete Messwerte rücktransformiert werden (iDFT):

$$f(x_n) = \frac{1}{N_{\text{Mess}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{Mess}}-1} X(k) e^{-j2\pi kn/N_{\text{Mess}}} \quad (3.9)$$

Das Signal wird mit der Frequenz $k_a = N_{\text{Mess}}/T$ abgetastet, was der lateralen Auflösung des verwendeten Messgerätes entspricht. Es genügt für die vollständige Bestimmung des Signals das Spektrum bis zur Signalfrequenz $k_{\text{max}} < k_a/2$ anzugeben, wie im Abtasttheorem von Shannon beschrieben. Die Darstellung der PSD-Funktion wird demnach von der gegebenen Abtastfrequenz k_a beeinflusst. Damit der Test des Auswertungsalgorithmus unter möglichst realistischen Bedingungen erfolgt, wird die Abtastfrequenz entsprechend der lateralen Auflösung des in der Auswertung verwendeten Laserscanningmikroskops von 125 nm gewählt:

$$k_{\text{max}} = \frac{k_a}{2} = \frac{1}{0,125 \cdot 2} \mu\text{m}^{-1} = 4 \mu\text{m}^{-1} \quad (3.10)$$

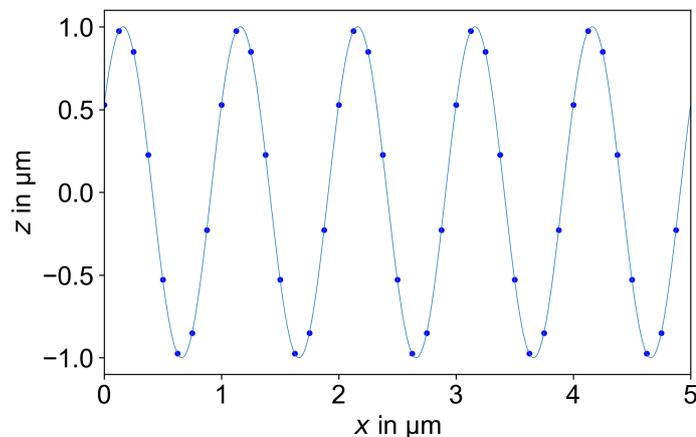


Abbildung 3.16: Abgetastetes Profil als ortsdiskrete harmonische Schwingung mit zufälliger Phase, $A = 1 \mu\text{m}$ und $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$

In Abbildung 3.16 ist das Profil einer abgetasteten Oberfläche dargestellt, wobei die dünne blaue Linie nur der besseren Anschaulichkeit dienen soll. Dieses Profil hat die Form einer harmonischen Schwingung mit der Schwingungsamplitude $A = 1 \mu\text{m}$ und der Ortsfrequenz $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$. Dabei werden wie beschrieben pro Periode $1/0,125 = 8$ Messpunkte aufgenommen. Werden diese nach Gleichung (3.8) fouriertransformiert ergibt sich das folgende diskrete Spektrum:

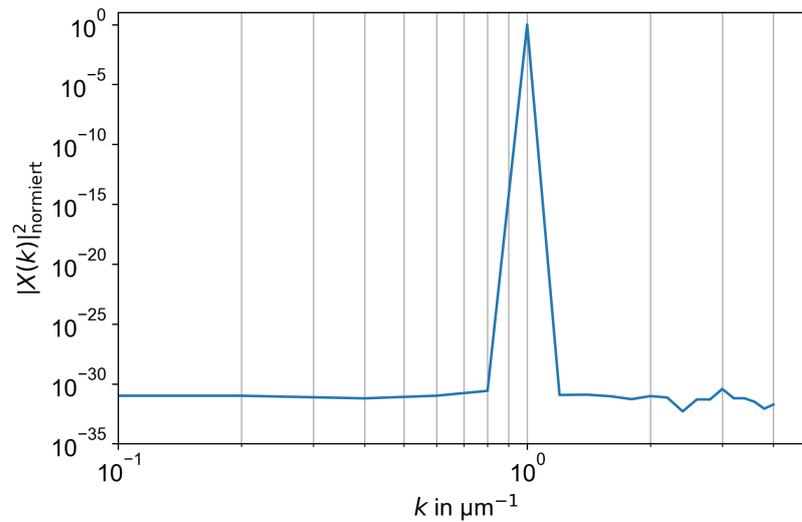


Abbildung 3.17: Normiertes Betragsquadrat der Fouriertransformierten einer ortsdiskreten harmonischen Schwingung mit zufälliger Phase, $A = 1 \mu\text{m}$ und $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$ in der doppelt logarithmischen Darstellung (PSD-Funktion)

In Abbildung 3.17 ist zu erkennen, dass in dem fouriertransformierten Profil nur ein Peak vorhanden ist, der die Schwingung mit der Ortsfrequenz $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$ repräsentiert. Damit ist prinzipiell die Korrektheit des Auswertungsalgorithmus gezeigt.

Für die spätere Auswertung mikrostrukturierter nichtplanarer Geometrien ist es weiterhin von Interesse, ob der Auswertungsalgorithmus auch für diese Fälle zuverlässig funktioniert. Dafür wird der Querschnitt einer realitätsnahen, mikrostrukturierten Linsenoberfläche simuliert, der aus einem Halbkreis mit dem Radius $R_{\text{Kreis}} = 50 \mu\text{m}$ und der Überlagerung von vier harmonischen Schwingungen besteht. Deren Ortsfrequenzen und Amplituden der jeweils i -ten Schwingung werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$A_i = \frac{0,1}{\sqrt{i}} \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (3.11)$$

$$k_i = 0,2 \cdot i^2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \quad (3.12)$$

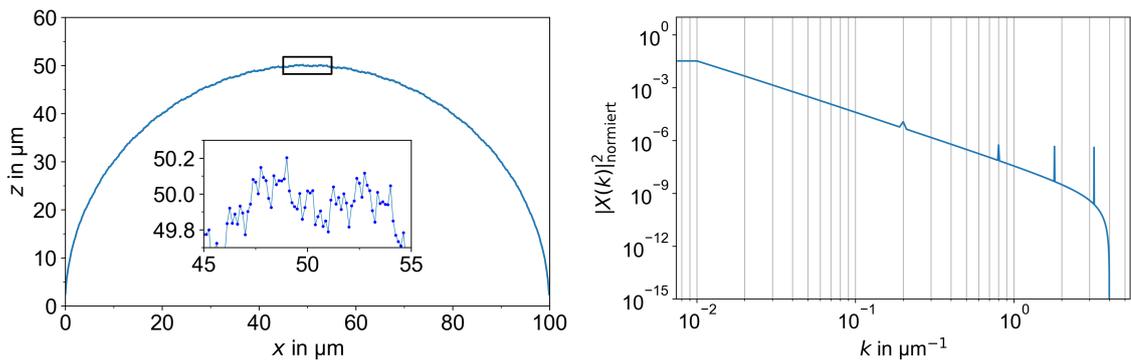


Abbildung 3.18: Realitätsnahes Linsenprofil, bestehend aus einem mit harmonischen Schwingungen überlagerten Halbkreis (links) und zugehörige PSD-Funktion (rechts)

In Abbildung 3.18 ist das Profil der Linse (links) und die normierte PSD-Funktion des Linsenprofils (rechts) dargestellt. Da im Profil vier diskrete Schwingungen enthalten sind, wird deutlich, dass alle Ortsfrequenzen, die nicht durch Formel (3.12) mit $i = 1, 2, 3, 4$ beschrieben werden, aus der Transformation des Halbkreises resultieren. Diese zusätzlichen Frequenzen erschweren die Analyse der PSD-Funktion hinsichtlich charakteristischer Peaks, da sie diese überdecken können. Für die jeweilige Auswertung einer solchen nichtplanaren Geometrie sollten daher Wichtungsfunktionen wie bspw. die Von-Hann-Wichtungsfunktion genutzt werden. Nachfolgend soll der Einfluss dieser untersucht werden.

Die Von-Hann-Wichtungsfunktion wird nach folgender Formel berechnet [Smi11]:

$$H(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N_{\text{Mess}} - 1} \right) \right] \quad \text{mit } n = 0, \dots, N_{\text{Mess}} \quad (3.13)$$

Die Berechnung erfolgt demnach mittels einer Kosinusfunktion. N_{Mess} in dieser Formel bezieht sich auf die Anzahl der Datenpunkte in einem Profilschnitt. Die Von-Hann-Wichtungsfunktion ist in Abbildung 3.19 dargestellt.

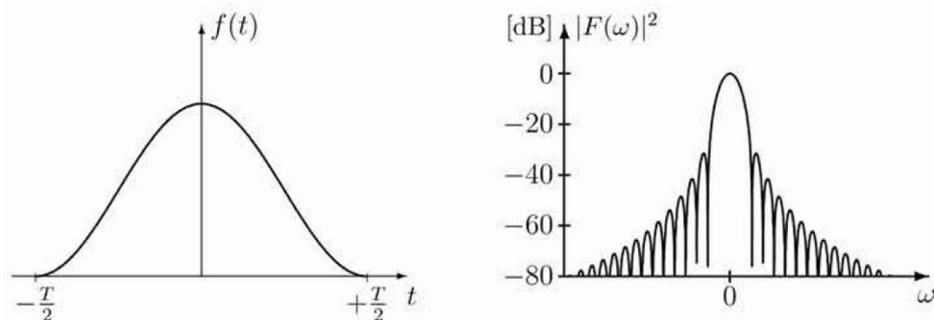


Abbildung 3.19: Von-Hann-Wichtungsfunktion (links) mit dem Betragsquadrat der Fouriertransformierten (rechts) [But09]

In Abbildung 3.20 ist die PSD-Funktion des mit der Von-Hann-Funktion gewichteten Linsenprofils (links) und die entsprechenden spektralen Peaks (rechts) dargestellt. Verglichen mit der PSD-Funktion aus Abbildung 3.18 wird deutlich, dass die Von-Hann-Wichtungsfunktion die Analyse auf charakteristische Ortsfrequenzen erleichtert. Durch die Dämpfung der Nebenmaxima, die in diesem Beispiel aus der Transformation des Halbkreises resultieren, vergrößert sich die relative Amplitude der Hauptmaxima. Bei der Interpretation der in Abbildung 3.20 rechts dargestellten Verhältnisse der Peakhöhen ist zu beachten, dass die Amplituden der diskreten Schwingungen mit denen des Halbkreises überlagert sind. Prinzipiell ist das Verhältnis der Peakhöhen ebenfalls relevant für eine angestrebte Prozessoptimierung, da höhere Peaks einen größeren Einfluss der entsprechenden Ortsfrequenz auf die Mikrostruktur bedeuten. Demnach ist auch gezeigt, dass die Oberflächenschwingungen, die bspw. durch den Herstellungsprozess in eine nichtplanare Struktur eingebracht werden, prinzipiell auswertbar sind.

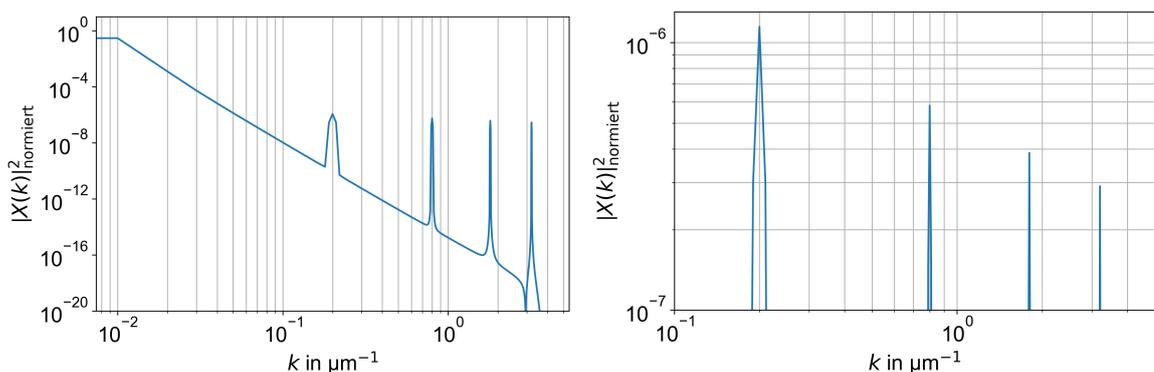


Abbildung 3.20: Normierte PSD-Funktion (links) und Vergrößerung der spektralen Peaks (rechts) eines mit der Von-Hann-Funktion gewichteten, realitätsnahen Linsenprofils

Die Messdaten können nun so aufbereitet werden, dass eventuell auftretende charakteristische Ortsfrequenzen detektierbar sind. Der Algorithmus verarbeitet die Messdaten in Form von Profilschnitten, somit ist die Ausrichtung der Datenmatrix um die z -Achse entscheidend für die Analyse. Da die Struktur rotationssymmetrisch ist, wird für die Berechnung der PSD-Funktionen die Messdatenwolke um ihren Mittelpunkt gedreht um eventuelle Richtungsabhängigkeiten zu untersuchen. Dabei wird für jeden Analysewinkel ein Profilschnitt analog dem in Abbildung 3.21 rot eingezeichneten betrachtet. Für die Ausrichtung wird eine Rotationsmatrix verwendet. Damit die Achseneinteilung gleich bleiben kann, wird die Messdatenwolke entsprechend „zugeschnitten“. Durch die Drehung entstehen Bereiche innerhalb des Darstellungsfensters, für die keine Messdaten existieren. Eine Fouriertransformation ist allerdings nur möglich, wenn alle Elemente einer Messreihe definiert sind. Die Messdatenwolke wird daher vor der Multiplikation mit der Von-Hann-Wichtungsfunktion in die neuen Bereiche erweitert, indem sie um ihre Ränder gespiegelt wird (vgl. Abbildung 3.21).

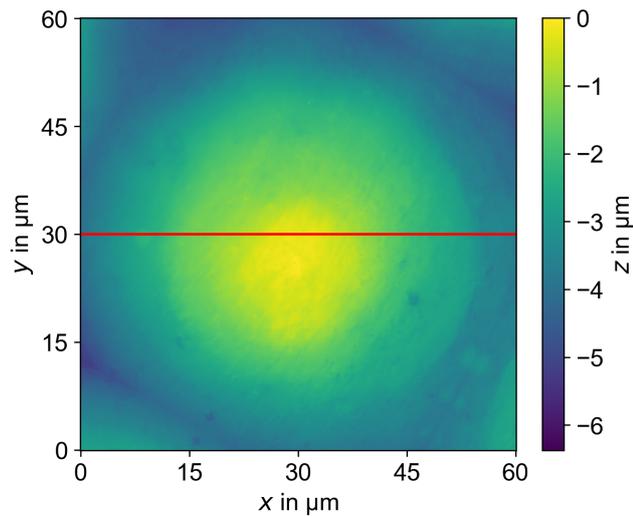


Abbildung 3.21: Übersicht der um 60° gedrehten Beispielstruktur (rot: Position des zu untersuchenden Profilschnitts)

Nach der Berechnung der PSD-Funktion kann mit dieser weiterhin die Rauheit der untersuchten Struktur angegeben werden. Aus der zweidimensionalen PSD-Funktion (abhängig von x - und y -Raumkoordinaten) berechnet sich die quadratische Flächenrauheit S_q nach Alcock et al. [ALOD10] zu:

$$S_q = \sqrt{\sum \text{PSD}^{2D}} \quad (3.14)$$

Da der Auswertungsalgorithmus die nur eindimensionale Höhendaten (nur abhängig von einer Raumkoordinate) fouriertransformiert und dann mittelt, wird die Rauheit mit dem R_q Wert angegeben. Dieser berechnet sich analog zu Formel 3.14 aus den berechneten eindimensionalen PSD-Funktionen.

$$R_q = \sqrt{\sum \text{PSD}^{1D}} \quad (3.15)$$

Dabei ist zu beachten, dass die realen und ungewichteten Oberflächen fouriertransformiert werden. Die Rauheit der Beispielstruktur beträgt nach dieser Formel $R_q = 210$ nm. Für einen Vergleichswert wird die Berechnung nach Formel 3.16 aus der DIN 4287 genutzt [DIN10], wobei l die Profilschnittlänge beschreibt:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx} \quad (3.16)$$

In beiden Formeln wird keine Grenzwellenlänge λ_c berücksichtigt, somit tragen alle enthaltenen Oberflächenwellen zum Rauheitsprofil bei. Nach DIN berechnet sich die quadratische Linienrauheit zu $R_q = 209$ nm. Die Differenz der R_q Werte resultiert aus dem unter-

schiedlichen Einfluss von Messfehlern auf die Berechnungen. Prinzipiell bestätigen die Werte die mathematische Korrektheit der Berechnungsalgorithmen. Aus der PSD-Funktion kann die Rauheit auch oberflächenwellenlängenaufgelöst berechnet werden. Dafür wird in Formel 3.15 die Summation über die Werte der PSD-Funktion erst ab der entsprechenden Ortsfrequenz begonnen. Dabei ist zu beachten, dass die Ortsfrequenzen, über die die PSD-Funktion dargestellt ist, von der Gesamtzahl an Messwerten N_{Mess} und deren räumlichen Abstand zueinander abhängen, was dem lateralen Auflösungsvermögen des verwendeten Mikroskops entspricht. Sie sind weiterhin diskret. Für die Beispielstruktur ist die Rauheit in Abhängigkeit von der Oberflächenwellenlänge bzw. von der Grenzwellenlänge λ_c in Abbildung 3.22 dargestellt.

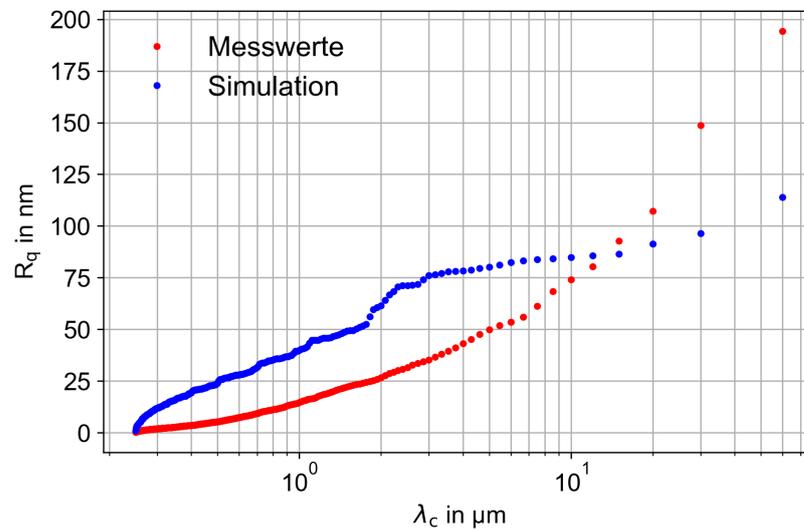


Abbildung 3.22: Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit der Teststruktur

3.9 Simulation der Mikrostrukturierung

Die Mikrostrukturierung wird simuliert, um die exakten Ortsfrequenzen der charakteristischen Peaks zu bestimmen, die aus den Prozessparametern resultieren. Weiterhin soll so der theoretische Einfluss der Maskengeometrien auf die Strukturrauheit untersucht werden sowie die berechneten Prozessparameter überprüft werden. Dafür werden die gleichen idealisierten Annahmen getroffen, wie bereits schon für die Prozessparameterberechnung: die Abtragsflanken sind exakt senkrecht und das Abtragsfeld wird mit gleichmäßiger Tiefe strukturiert.

Das zu bearbeitende Substrat wird als Matrix angelegt und alle Matrixelemente mit '0' vorgelegt. Die Matrixgröße und -Auflösung entspricht dabei den realen Messdaten. Nun wird für jede verwendete Maske ebenfalls eine Matrix berechnet, die die jeweilige Abtragsform beschreibt. Ausgehend vom Mittelpunkt der dreidimensionalen Matrix werden die Matrixelemente im Bereich des Maskenradius mit '0' belegt und alle anderen Elemente mit '-1'. Eine Maskenmatrix ist beispielhaft in Abbildung 3.23 links dargestellt.

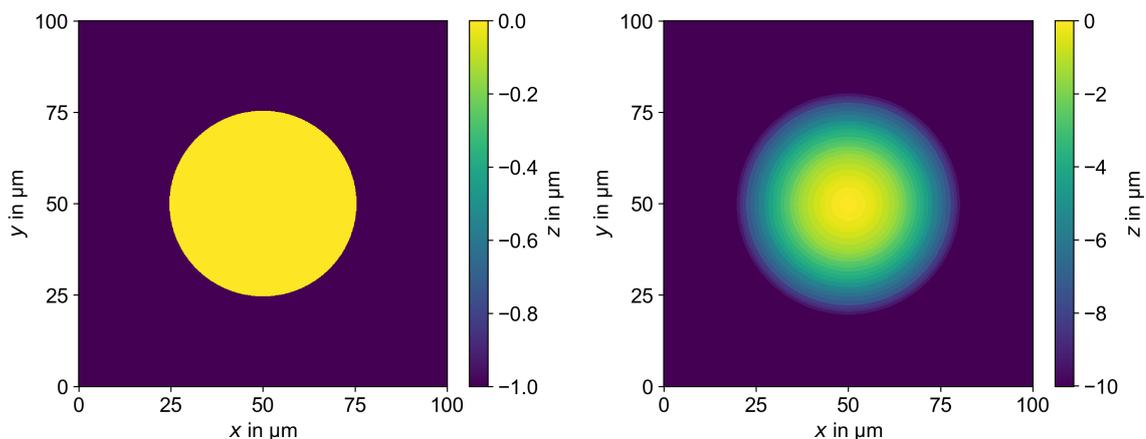


Abbildung 3.23: Links: Maskenmatrix für $D = 50,8 \mu\text{m}$ (Maskennummer: 26)

Rechts: simulierte Beispielsstruktur mit $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ mit $H = 1 \text{ J}/\text{cm}^2$

Die einzelnen Maskenmatrizen der verwendeten Maskensequenz werden nun nacheinander von der Substratmatrix abgezogen. Dafür wird die jeweilige Maskenmatrix mit dem Produkt aus dem Abtrag pro Puls (vgl. Abbildung 3.2) und der nach Kapitel 3.5 berechneten Laserpulsanzahl pro Maske multipliziert. Eine beispielhaft berechnete Struktur ist in Abbildung 3.23 rechts dargestellt. Diese „bearbeitete“ Substratmatrix kann nun in gleicher Weise wie die realen Messdaten vom PSD-Auswertungsprogramm analysiert werden (vgl. Abbildung 3.22, Datenreihe „Simulation“).

4 Ergebnisse und Diskussion

Alle Messwerte, die in diesem Kapitel als Datenpunkte in den Diagrammen dargestellt sind, befinden sich in den entsprechenden Tabellen im Anhang B als Zahlenwerte. Für alle Messungen und Aufnahmen wird ein Laserscanningmikroskop verwendet.

4.1 Test des Versuchsaufbaus

Mit dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Versuchsaufbau wird nachfolgend eine Kegelstruktur hergestellt, indem pro Maske jeweils ein Laserpuls ausgelöst wird. Diese Struktur dient als Ausgangspunkt für die in Kapitel 3.4 beschriebene Korrektur der Abtragsmittelpunkte. In der Abbildung 4.1 ist links die Kegelstruktur ohne Korrektur und rechts mit Korrektur dargestellt. Die eingezeichneten Höhenlinien verdeutlichen die Abtragsabweichungen.

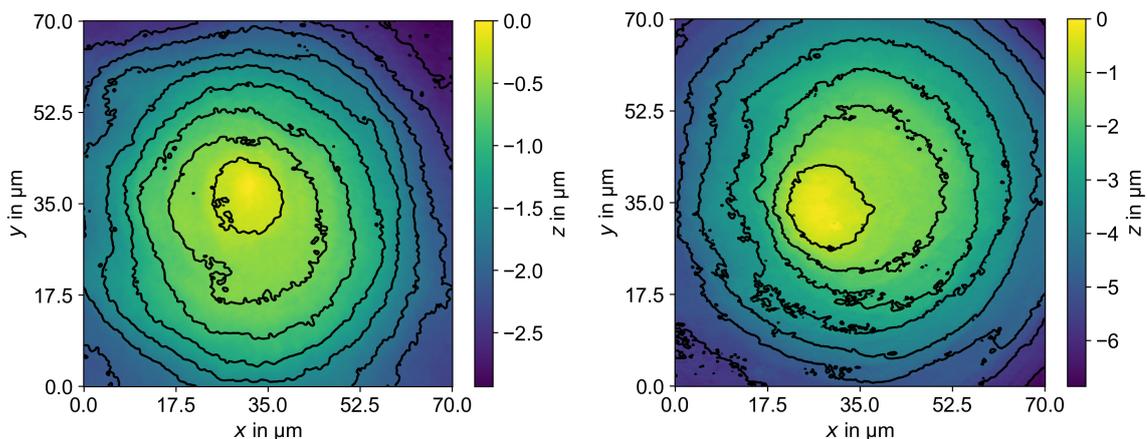


Abbildung 4.1: Kegelstrukturen mit eingezeichneten Höhenlinien (links: ohne Korrektur, rechts: mit Korrektur)

Es ist zu erkennen, dass die Korrektur die Struktur wie erwartet beeinflusst. Jedoch besteht immer noch eine Abweichung der Abtragsmittelpunkte. Diese wird quantisiert, indem die Absolutwerte der Abweichung in x - und y -Richtung für jeden Abtrag aufsummiert werden ($\sum |\Delta x|$ und $\sum |\Delta y|$). Als Referenz wird die Maske mit $D = 2 \mu\text{m}$ genutzt, da bei dem kleinsten Abtragsdurchmesser der Mittelpunkt am genauesten bestimmt werden kann. Ohne Korrekturen betragen die Abweichungen $\sum |\Delta x| = 354 \mu\text{m}$ und $\sum |\Delta y| = 185 \mu\text{m}$. Nach der Korrektur werden zum Vergleich erneut die Abweichungen vermessen: $\sum |\Delta x| = 223 \mu\text{m}$ und $\sum |\Delta y| = 52 \mu\text{m}$. Die Abweichungen konnten verringert werden, bestehen jedoch noch immer. Aus diesem Grund wird nun in einer zweiten Iteration die Abweichung der korrigierten

Abtragsmittelpunkte vermessen und eine neue Korrektur berechnet. Die resultierende Struktur ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

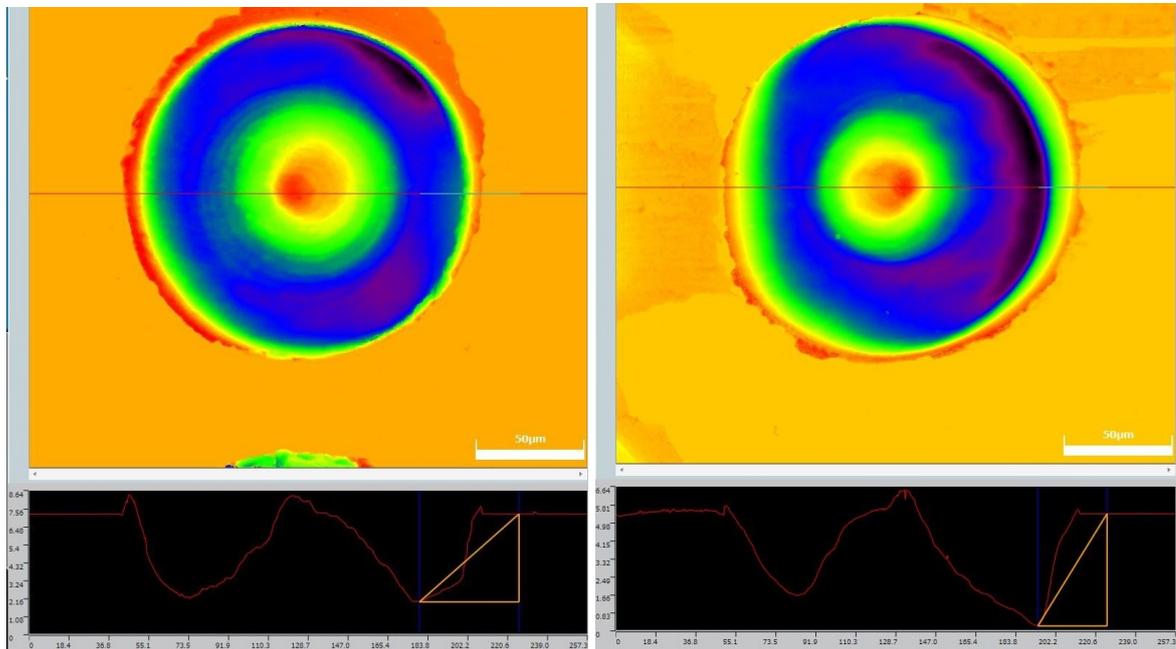


Abbildung 4.2: Kegelstrukturen mit einer Strukturierungstiefe von jeweils etwa $5\ \mu\text{m}$ (links: nach erster Korrektur, rechts: nach zweiter Korrektur)

Es ist wiederum eine Veränderung der Struktur zu erkennen, jedoch ist das Ergebnis noch immer nicht rotationssymmetrisch. Die Abweichungen betragen nun $\sum |\Delta x| = 421\ \mu\text{m}$ und $\sum |\Delta y| = 157\ \mu\text{m}$ und sind demnach wieder größer geworden. Dies deutet darauf hin, dass sich das optische Abbildungssystem zwischen den Strukturierungen verändert hat. Da die Objektweite, die Bildweite und das Linsensystem identisch sind, kann die Ursache für die Abweichung nur in der Maskenebene und damit in der Bewegung des Maskenrads liegen. Die Winkeländerung zwischen zwei Masken beträgt immer genau $7,2^\circ$ und kann daher ebenfalls als Fehlerursache ausgeschlossen werden. Somit kann nur der Startpunkt der Maskenradbewegung verschieden sein. Zur Referenzierung der Maskenradposition wird wie beschrieben ein Hall-Sensor verwendet, der eine von der magnetischen Flussdichte abhängige Hall-Spannung liefert. Diese Messmethode könnte für den vorliegenden Anwendungsfall zu ungenau sein. Aus diesem Grund wird nachfolgend ein Homing-Sensor auf der Basis eines optischen Messsystems getestet.

4.2 Test des optischen Sensors

Der optische Sensor (1) (vgl. Abbildung 4.3) besteht aus einer Infrarot-Photodiode und einem Phototransistor. Die von der Photodiode emittierte Strahlung wird bei Erreichen der Referenzposition von einer Aluminiumzunge (2) auf den Phototransistor reflektiert. In diesem fließt nun ein Photostrom, der verstärkt wird und als Homing-Signal an die Achssteuerung der Laseranlage geleitet wird.

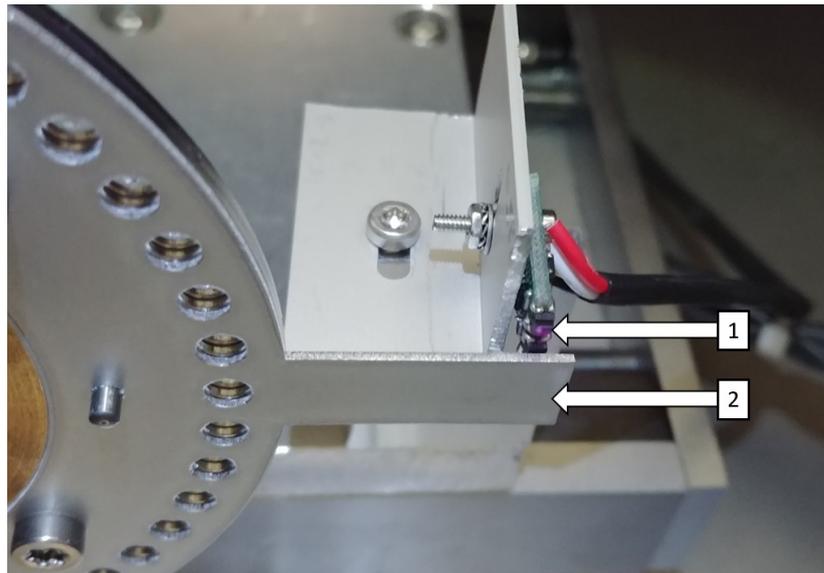


Abbildung 4.3: Optischer Sensor

Mit dieser Messmethode wird nun erneut die Korrektur der Abtragsmittelpunkte getestet. Wieder ausgehend von der Strukturierung ohne Korrekturen werden drei Iterationen durchgeführt. Nach der ersten Korrektur betragen die Abweichungen nun $\sum |\Delta x| = 59 \mu\text{m}$ und $\sum |\Delta y| = 61 \mu\text{m}$, nach der zweiten Korrektur $\sum |\Delta x| = 38 \mu\text{m}$ und $\sum |\Delta y| = 25 \mu\text{m}$ und nach der dritten Korrektur $\sum |\Delta x| = 11 \mu\text{m}$ und $\sum |\Delta y| = 2 \mu\text{m}$. Kleinere Werte sind aufgrund der gegebenen Messunsicherheit nicht zu erwarten. Demnach kann die Struktur mit der vorgestellten Methode verbessert werden. Das Strukturierungsergebnis ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

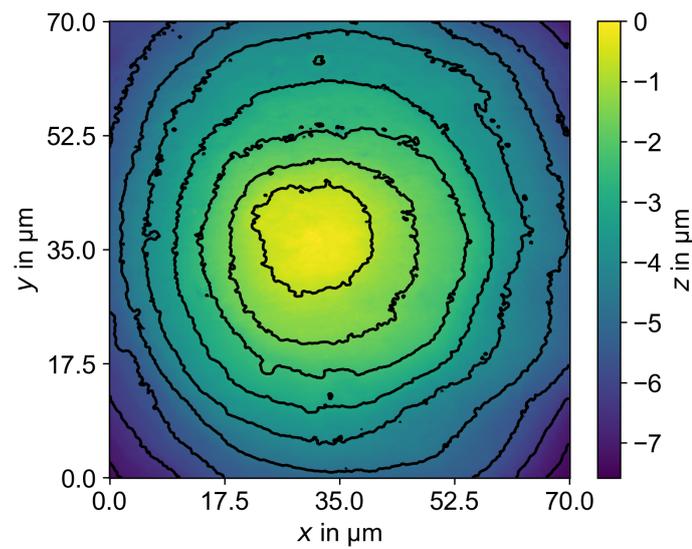


Abbildung 4.4: Korrigierte Kegelstruktur mit eingezeichneten Höhenlinien

Der optische Homing-Sensor wird aufgrund der nun erfolgreichen Korrektur für alle weiteren Versuche genutzt.

4.3 Parameterstudie

Für die nachfolgende Untersuchung werden jeweils drei Strukturen des gleichen Parametersatzes hergestellt und in den Diagrammen dargestellt. Dabei ist jeweils eine Kegelstruktur die Zielgeometrie.

Einfluss der Laserpulsfluenz

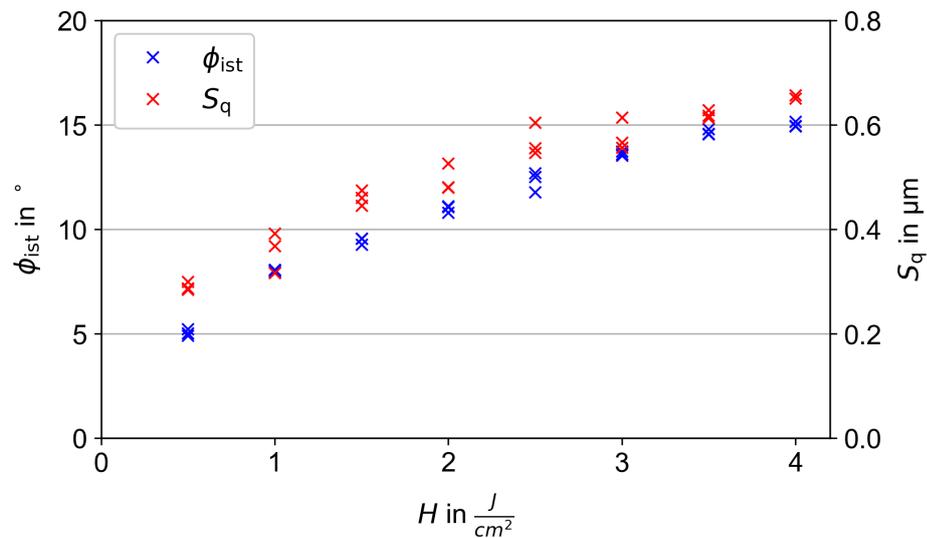


Abbildung 4.5: Einfluss der Laserpulsfluenz auf den Basiswinkel und die Rauheit der Kegelstruktur

In Abbildung 4.5 ist der Einfluss der Laserpulsfluenz auf den gemessenen Basiswinkel ϕ_{ist} und die Oberflächenrauheit S_q dargestellt. Für die Messreihe wurde jeweils jede Maske mit zwei Laserpulsen bestrahlt. Es ist zu erkennen, dass ϕ_{ist} und S_q mit größer werdender Laserpulsfluenz ebenfalls ansteigen. Der Verlauf der Messreihen entspricht dabei dem in Abbildung 3.2, was darauf hindeutet, dass sowohl ϕ_{ist} als auch S_q mit der Abtragstiefe pro Laserpuls korrelieren. Für kleinere S_q -Werte sollten also geringe Laserpulsfluenzen genutzt werden. Die Abtragstiefe pro Maskenposition kann dann wie in Kapitel 3.5 beschrieben über die Laserpulsanzahl eingestellt werden. Der Einfluss dieses Parameters wird nachfolgend untersucht.

Einfluss der Laserpulsanzahl

Für diese Untersuchung werden wiederum jeweils alle Masken verwendet. Als Laserpulsfluenz wird $H = 1 \text{ J/cm}^2$ gewählt, damit die Rauheiten auch bei großen Laserpulsanzahlen pro Abtragsposition gering bleiben.

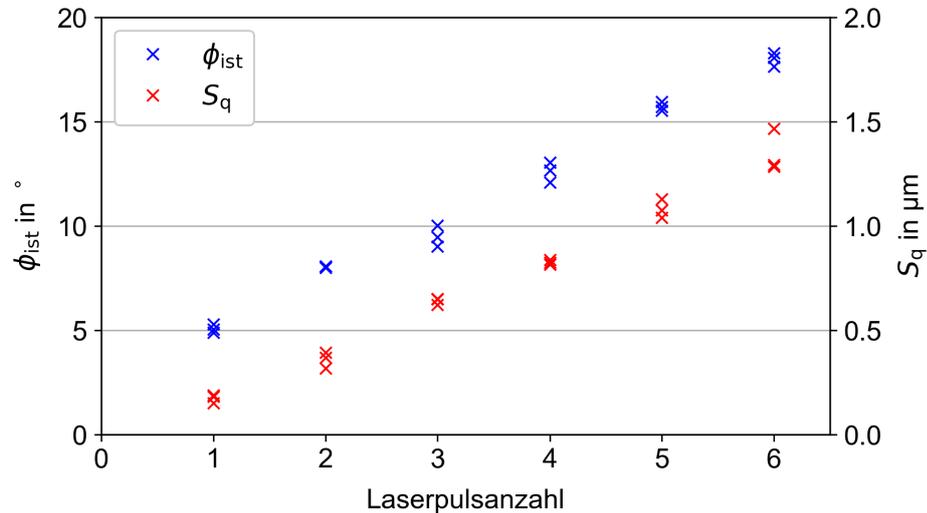


Abbildung 4.6: Einfluss der Laserpulsanzahl auf den Basiswinkel und die Rauheit der Kegelstruktur

In Abbildung 4.6 ist der Einfluss der Laserpulsanzahl pro Abtragsposition auf den gemessenen Basiswinkel ϕ_{ist} und die Oberflächenrauheit S_q dargestellt. Wie zu erwarten vergrößern sich auch hier ϕ_{ist} und S_q mit steigender Laserpulsanzahl. Die Differenz der Messgrößen für zwei benachbarte Laserpulsanzahlen ist dabei nahezu konstant mit $\Delta\phi_{\text{ist}} \approx 2,5^\circ$ und $\Delta S_q = 0,2 \mu\text{m}$. Demnach muss für die Berechnung der Prozessparameter nach Kapitel 3.5 kein Einfluss von je nach Abtragsposition variierenden Laserpulsanzahlen berücksichtigt werden. Dies wird bspw. für eine Linsengeometrie benötigt.

Einfluss der Maskensequenz

Der dritte Prozessparameter ist die Maskensequenz. Diese ergibt sich aus der genutzten Laserpulsfluenz und der Zielgeometrie. Für die Untersuchung wird $H = 1 \text{ J/cm}^2$ eingestellt und die jeweils verwendeten Masken mit zwei Laserpulsen bestrahlt. Der Einfluss der Maskensequenz auf den gemessenen Basiswinkel ϕ_{ist} und die Oberflächenrauheit S_q ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Maskensequenz „2“ bedeutet dabei, dass jede zweite Maske verwendet wird, bei Maskensequenz „3“ jede dritte usw. Es ist zu erkennen, dass ϕ_{ist} und S_q tendenziell geringer werden, je mehr Masken ausgelassen werden. Das Auslassen von Masken wird besonders bei Linsengeometrien im Bereich von $r = 0 \mu\text{m}$ benötigt, da dort je nach Zielradius die Strukturen sehr flach sind. Anhand von Abbildung 4.7 wird nun deutlich, dass diese geplante Vorgehensweise zielführend ist und eingesetzt werden kann.

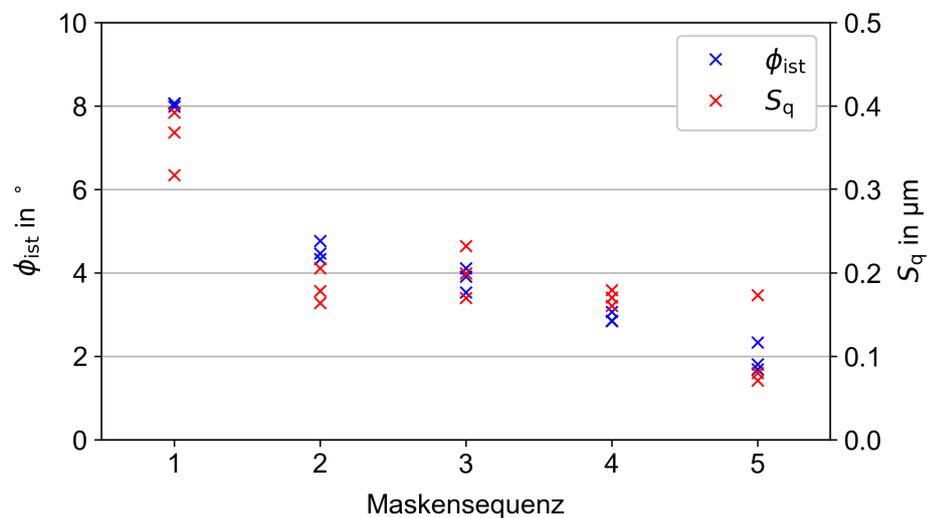


Abbildung 4.7: Einfluss der Maskensequenz auf den Basiswinkel und die Rauheit der Kegelstruktur

4.4 Test der berechneten Prozessparameter

Das in Kapitel 3.5 beschriebene Programm zur Berechnung der für eine Zielgeometrie benötigten Prozessparameter soll nachfolgend getestet werden. Dafür werden zuerst Kegelstrukturen mit den Basiswinkeln ϕ_{soll} von 5° , $7,5^\circ$ und 10° berechnet und entsprechend strukturiert.

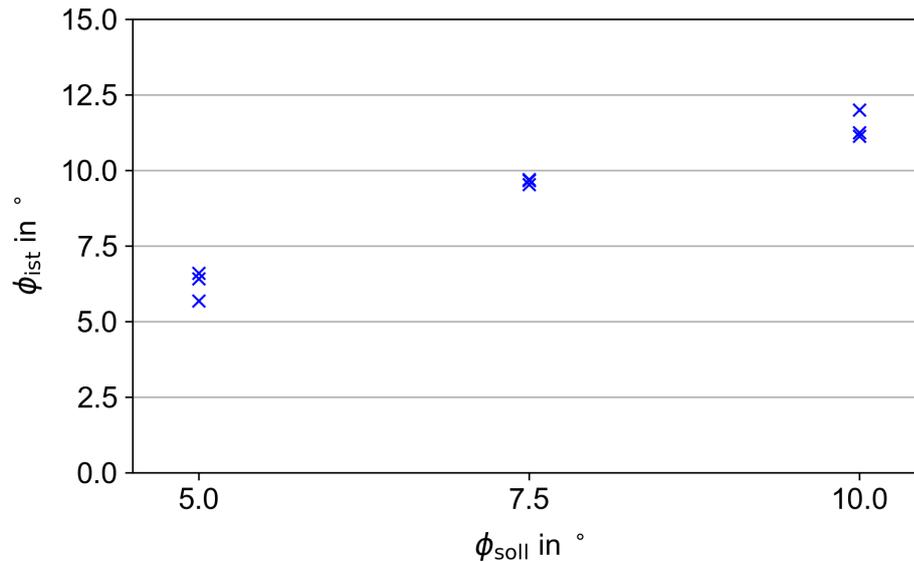


Abbildung 4.8: Parametertest mit Kegelstrukturen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse dieses ersten Parametertests. Mit steigendem Sollbasiswinkel nimmt auch der real gemessene Basiswinkel zu. Jedoch sind alle gemessenen Winkel größer als die vorgegebenen Werte: für $\phi_{\text{soll}} = 5^\circ$ liegen diese im Bereich von $+0,7^\circ$ bis $+1,7^\circ$, für $\phi_{\text{soll}} = 7,5^\circ$ im Bereich von $+2,0^\circ$ bis $+2,2^\circ$ und für $\phi_{\text{soll}} = 10^\circ$ im Bereich von $+1,1^\circ$ bis $+2,0^\circ$. Demnach kann der Basiswinkel bisher nicht exakt vorgegeben werden, jedoch sind die Abweichungen von jedem Sollbasiswinkel nahezu gleich. Dies deutet auf einen systematischen Fehler hin, der nun anhand von Linsengeometrien über einen größeren Parameterbereich genauer untersucht werden soll. Dazu werden die Laserpulsanzahlen für 11 Radien von $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ bis $R_{\text{soll}} = 250 \mu\text{m}$ bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ berechnet und entsprechend strukturiert. Für diese Laserpulsfluenz wird die Abtragstiefe nach Abbildung 3.2 mit $\Delta z = 55 \text{ nm}$ pro Laserpuls angenommen.

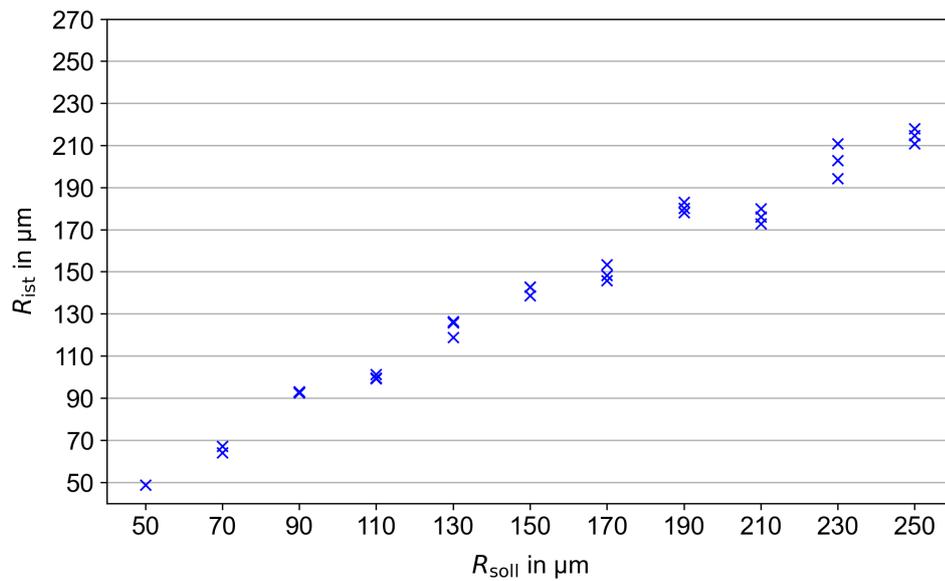


Abbildung 4.9: Parametertests mit Linsenstrukturen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ ($\Delta z = 55 \text{ nm}$)

In Abbildung 4.9 sind die gemessenen Radien R_{Ist} für jeden Sollradius R_{Soll} dargestellt. Es ist zu erkennen, dass R_{Ist} mit steigendem R_{Soll} tendenziell größer wird. Dabei werden jedoch auch die Abweichungen vom Sollradius größer. Eine Ausnahme bilden nur die Strukturen mit $R_{\text{Soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $R_{\text{Soll}} = 70 \mu\text{m}$. Diese Strukturen weisen allerdings Ausplatzungen auf, durch die das Annähern der Referenzgeometrie ggf. fehlerhaft wird, weswegen nur drei von sechs Datenpunkten dargestellt sind. Für alle Strukturen mit $R_{\text{Soll}} > 90 \mu\text{m}$ gilt: $R_{\text{Soll}} > R_{\text{Ist}}$.

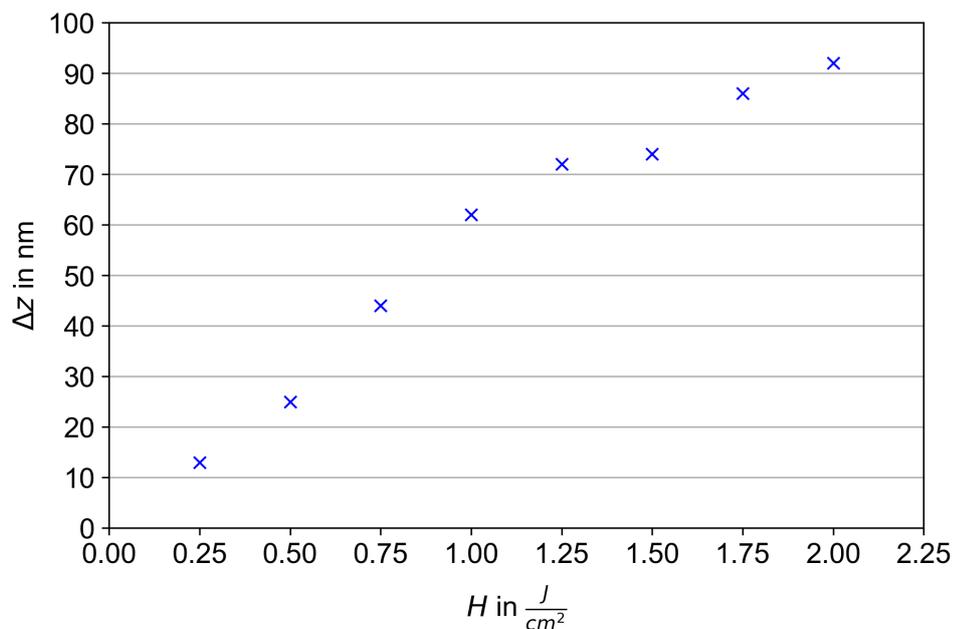


Abbildung 4.10: Gemessener Laserpulsabtrag Δz bei $f_P = 200 \text{ Hz}$ in D263T

Eine Ursache dafür, dass die Radien kleiner als erwartet sind, kann eine als zu klein angenommene Abtragtiefe pro Laserpuls Δz sein. Ist Δz bei gleicher Laserpulsanzahl größer, so wird die Strukturierungstiefe ebenfalls größer und dies resultiert in kleineren Radien, was auch die Vergrößerung des Kegelbasiswinkels im vorherigen Parametertest erklären könnte. Demnach muss nachfolgend die Abtragsrate pro Laserpuls für verschiedene Laserpulsfluenszen erneut vermessen werden. Bei jeder Laserpulsfluensz werden 50 Laserpulse ausgelöst und die so entstandenen Abträge hinsichtlich ihrer maximalen Tiefe vermessen. Dieser Wert wird durch 50 geteilt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Nun kann der Parametertest erneut durchgeführt werden. Damit die Ergebnisse verglichen werden können wird erneut $H = 1 \text{ J/cm}^2$ eingestellt. Die Abtragtiefe pro Laserpuls wird nun mit $\Delta z = 63 \text{ nm}$ angenommen. In Abbildung 4.11 sind die gemessenen Radien der Linsestrukturen für die unterschiedlichen Δz -Werte dargestellt.

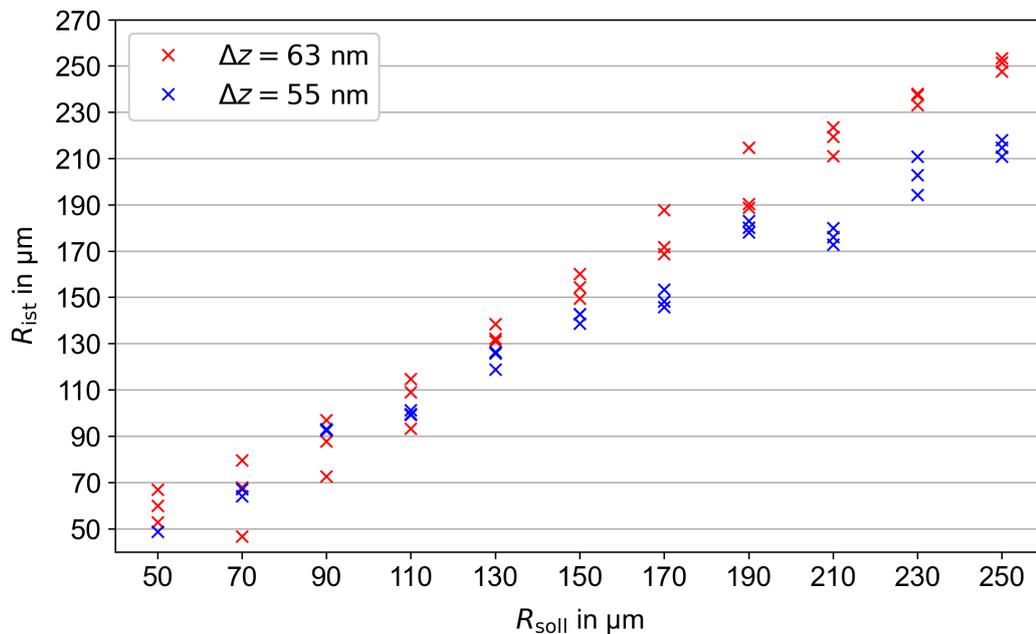


Abbildung 4.11: Vergleich der Linsestrukturen mit unterschiedlichen Laserpulsabträgen Δz bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Die Radien der Strukturen, für deren Parameterberechnung $\Delta z = 63 \text{ nm}$ angenommen wurde, weisen geringere Abweichungen von R_{soll} auf. Demnach hat wie erwartet der Abtrag pro Laserpuls für die eingestellte Laserpulsfluensz einen großen Einfluss auf die Formabweichung der Struktur und muss entsprechend genau bekannt sein. Die noch vorhandene Abweichung der gemessenen Radien vom jeweiligen Sollradius kann eine Folge der Parameterberechnung sein. Dies soll nachfolgend untersucht werden.

4.5 Auswertung der simulierten Strukturen

Damit eine durch die Berechnungsmethode verursachte Abweichung erkannt werden kann, wird die Strukturierung mit den errechneten Prozessparametern simuliert (vgl. Kapitel 3.9). Dem Simulationsprogramm wird dafür die Laserpulsfluenz bzw. der Abtrag pro Laserpuls, die verwendete Maskensequenz sowie die Anzahl der Laserpulse pro Abtragsposition übergeben. Die so berechnete dreidimensionale Struktur kann nun wie die Mikroskopmessdaten hinsichtlich Radius, Oberflächenrauheit und Formabweichung ausgewertet werden.

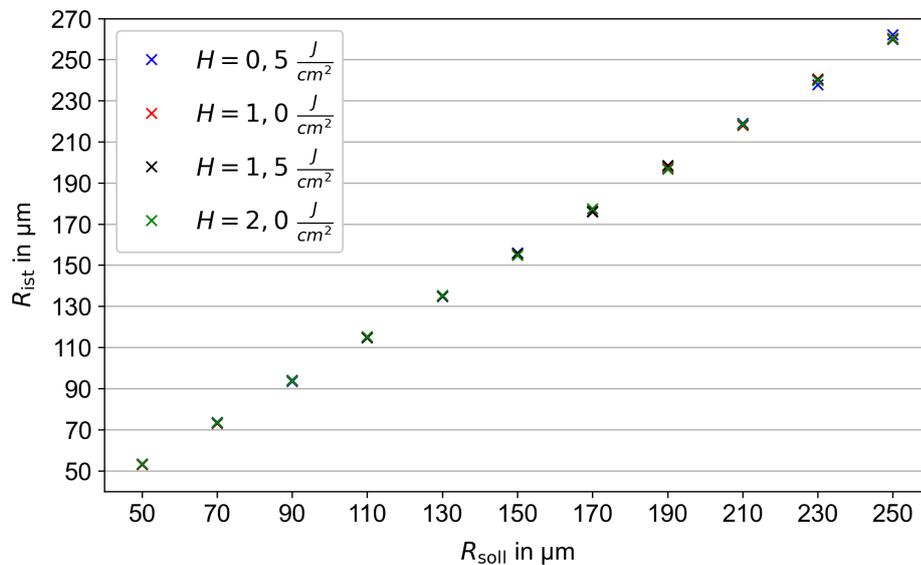


Abbildung 4.12: Vergleich der berechneten Radien der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Sollradien und Laserpulsfluenzen

In Abbildung 4.12 ist der Radius der simulierten Strukturen für die Sollradien und Laserpulsfluenzen dargestellt, die in auch für die reale Strukturierung verwendet werden sollen. Wie erwartet nimmt der gemessene Radius der simulierten Strukturen mit R_{soll} zu. Dabei fällt jedoch auf, dass alle Radien etwa 4 % bei $R_{\text{soll}} = 250 \mu\text{m}$ bis 6 % bei $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ zu groß sind. Diese Abweichung ist eine Folge der Berechnungsmethode und der Diskretisierung in z - und r -Richtung. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, wird für die Berechnung der Laserpulsanzahlen pro Abtragsposition die Differenz zwischen Soll- und Ist-Geometrie berechnet, durch den Abtrag pro Laserpuls geteilt und das Ergebnis auf ganze Zahlen aufgerundet. Die Abtragstiefe wird demnach für jeden Maskenradius berechnet und ist bis zum nächstgrößeren Maskenradius konstant (vgl. Abbildung 4.13). Die idealisierte Abtragskontur ist dadurch zumeist größer als die Zielkontur und die Annäherung einer Kreisgleichung führt zu einem größeren Radius. Dies erklärt die Abweichungen in Abbildung 4.11. Im Rahmen einer Prozessoptimierung sollte daher auch der Einfluss anderer Berechnungsmethoden untersucht werden.

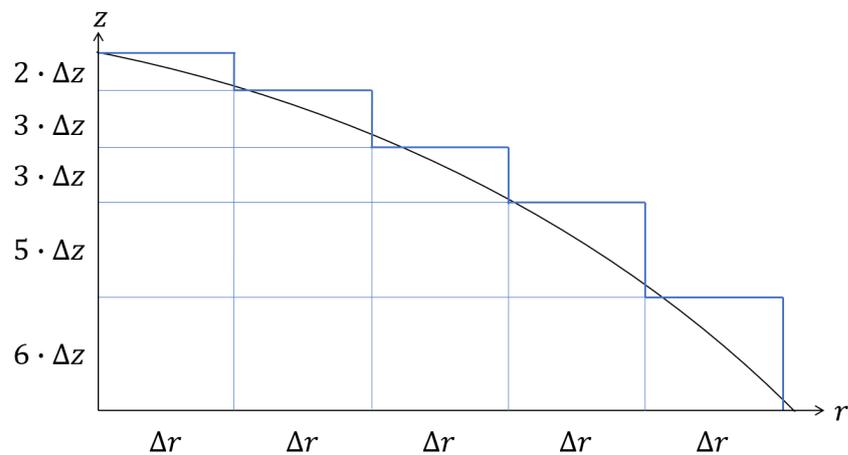


Abbildung 4.13: Diskretisierung der Simulation in z - und r -Richtung (schwarz: Zielgeometrie, blau: idealisierte Abtragskontur)

Die diskreten Abtragsstufen in den simulierten Strukturen sind auch in der nach Kapitel 3.6 berechneten Formabweichung zu erkennen. Dabei ist die Struktur jeweils am inneren Rand eines Kreistrings bzw. einer Abtragsposition zu tief und am äußeren Rand zu hoch, wie in Abbildung 4.14 für beispielhafte Struktur gezeigt.

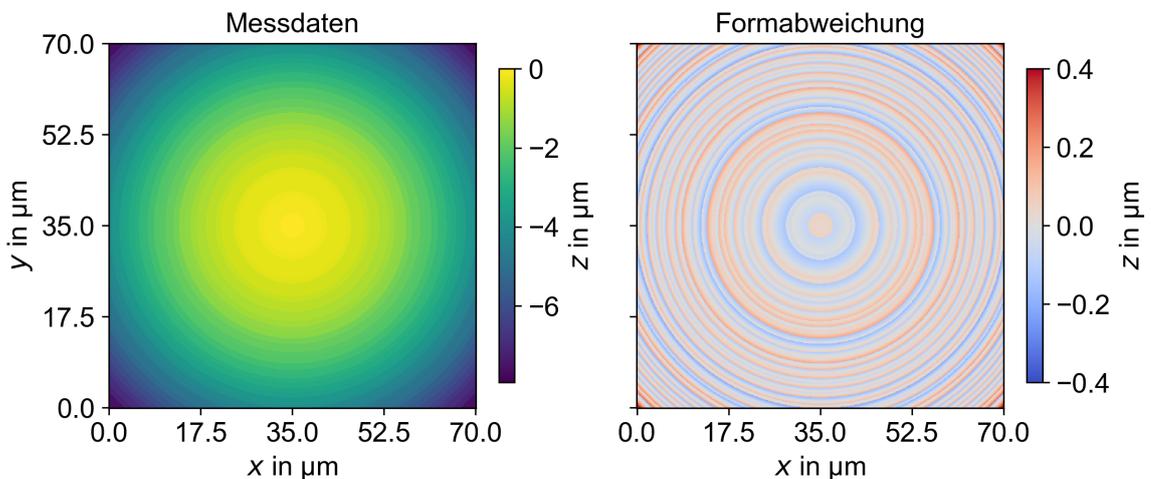


Abbildung 4.14: Formabweichung einer simulierten Linienstruktur ($R_{\text{soll}} = 150 \mu\text{m}$, $H = 1 \text{ J}/\text{cm}^2$)

Durch die Auswertung der simulierten Strukturen kann weiterhin die Oberflächenrauheit berechnet werden, die sich allein durch den idealisierten Prozess ergibt. Dieser Wert entspricht einem theoretischen Rauheitsminimum. Für die verwendeten Parametersätze ist die Oberflächenrauheit in Abbildung 4.15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die durch den Prozess gegebene Rauheit allgemein für $R_{\text{soll}} \leq 130 \mu\text{m}$ größer als für $R_{\text{soll}} > 130 \mu\text{m}$ ist. Weiterhin gilt, dass theoretisch mit kleineren Laserpulsfluenzen geringere S_q -Werte erreicht werden können, wie bereits anhand von Abbildung 4.5 für die realen Strukturen festgestellt werden konnte. Der Grund dafür liegt in der geringeren Abtragstiefe pro Laserpuls. Mit ei-

ner kleineren Auflösung in z -Richtung kann der Zielgeometrie in geringerem Abstand gefolgt werden. Aus der Untersuchung der simulierten Strukturen lässt sich ableiten, dass Oberflächenrauheitswerte deutlich unter 100 nm wahrscheinlich nicht erreicht werden können.

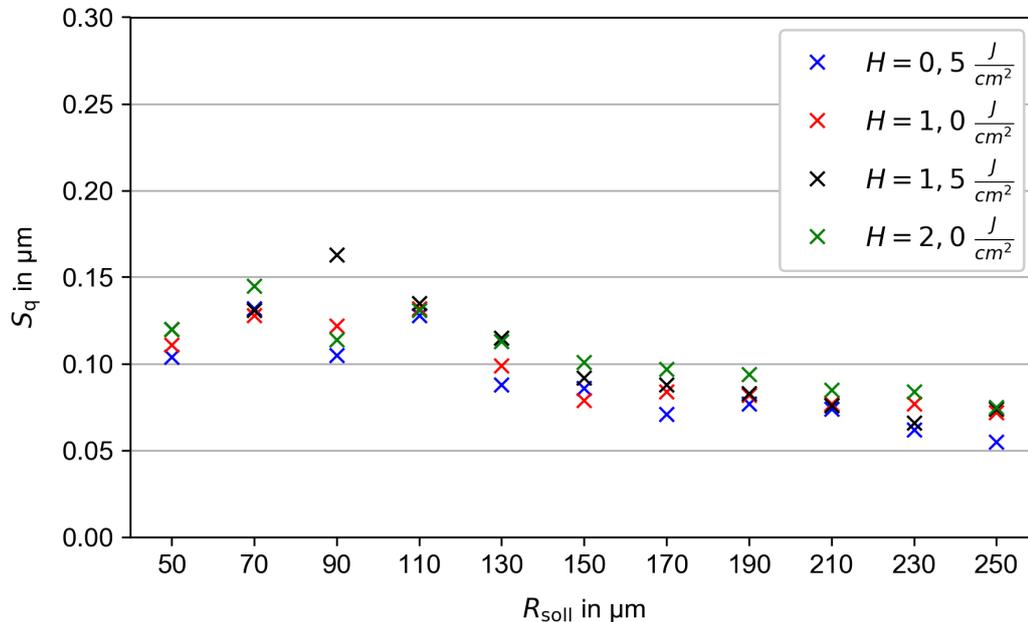


Abbildung 4.15: Vergleich der Oberflächenrauheit der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen

4.6 Herstellung von Mikrolinsen mit definierten Radien

Nun werden die Zielstrukturen mit den bereits in der Simulation untersuchten Laserpulsfluenzen von $0,5 \text{ J/cm}^2$, $1,0 \text{ J/cm}^2$, $1,5 \text{ J/cm}^2$ und $2,0 \text{ J/cm}^2$ sowie den jeweils berechneten Prozessparametern hergestellt. In Abbildung 4.16 sind die gemessenen Radien dargestellt. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zur Simulation bei den realen Strukturen die Laserpulsfluenz einen Einfluss auf den Linsenradius hat. Die Radien der mit $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ hergestellten Strukturen weichen dabei am geringsten vom jeweiligen Sollradius ab, wobei aus jedem Parametersatz eine Struktur nahezu exakt den Sollradius aufweist. Die Abweichung der Krümmungsradien der jeweils anderen Strukturen beträgt etwa +5 %. Die gemessenen Werte befinden sich im Anhang in Tabelle B.11 und eine beispielhafte Mikrolinse ist in Abbildung A.1 dargestellt. Für die weiteren Laserpulsfluenzen ergeben sich zum Teil deutlich geringere Radien. Auffällig ist dabei, dass die Abweichung des gemessenen Radius vom jeweiligen Sollradius für eine Laserpulsfluenz etwa konstant ist. Für $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ gilt:

$$\frac{R_{\text{ist}}}{R_{\text{soll}}} = \frac{190 \mu\text{m}}{250 \mu\text{m}} \cong \frac{140 \mu\text{m}}{190 \mu\text{m}} \cong \frac{130 \mu\text{m}}{170 \mu\text{m}} \cong \frac{100 \mu\text{m}}{130 \mu\text{m}} \cong \frac{70 \mu\text{m}}{90 \mu\text{m}} \cong 0,75$$

Für $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$ beträgt das Verhältnis der Radien ca. 0,88 und für $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ ca. 0,84. Diese Abweichungen deuten auf den gleichen systematischen Fehler hin, der bereits in Kapitel 4.4 festgestellt wurde. Trotz einer erneuten Messung der Abtragstiefe pro Laserpuls ist diese noch immer nicht korrekt.

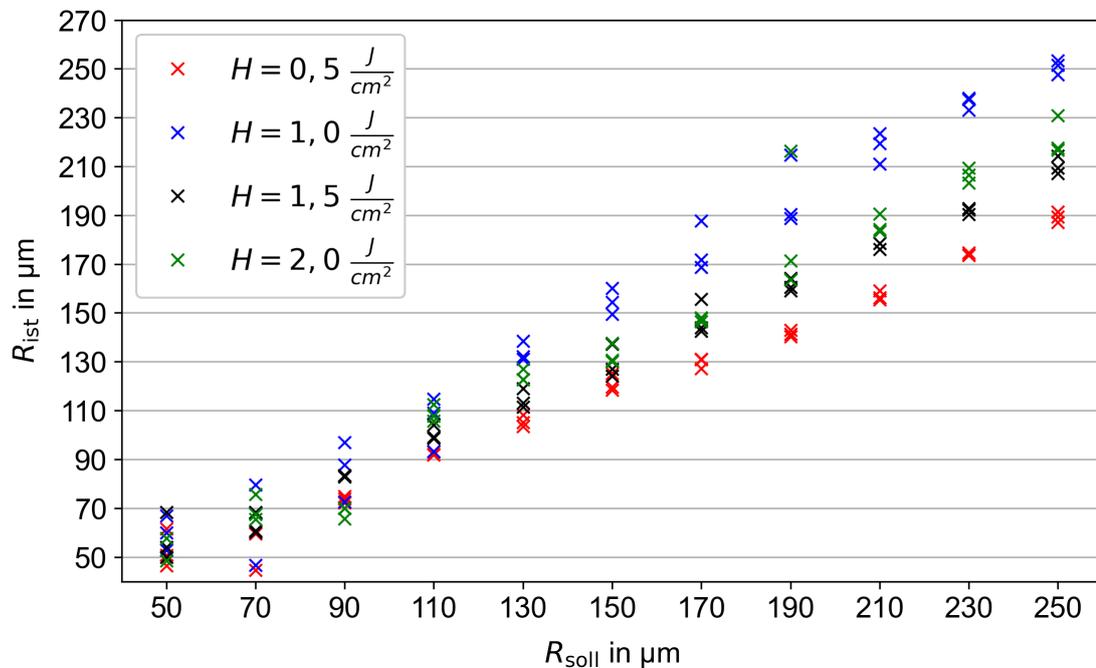


Abbildung 4.16: Vergleich der gemessenen Radien der Linienstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenszen

Die Ursache für die fehlerhafte Messung kann eine inhomogene Strukturierungstiefe im Abtragsfeld sein. In diesem Fall wäre die Abtragstiefe pro Laserpuls nur ein Mittelwert und die reale Abtragstiefe kann je nach Ort im Abtrag variieren was wiederum zu lokalen Abweichungen des Linsenradius führt. Dies soll nachfolgend untersucht werden. Dazu wird die kleinste Maske mit 50 Laserpulsen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ bestrahlt. Theoretisch sollte die Abtragstiefe somit $50 \cdot 63 \text{ nm} = 3150 \text{ nm}$ betragen. Das Abtragsfeld ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Es ist jedoch zu erkennen, die Tiefe der Struktur stark vom Betrachtungsort abhängt. Während der Strukturteil mit $y > 80 \mu\text{m}$ nur ca. $2 \mu\text{m}$ tief ist, können im Bereich mit $y < 40 \mu\text{m}$ Tiefen von mehr als $3 \mu\text{m}$ gemessen werden. Die Abweichung vom angenommenen Abtrag pro Laserpulse beträgt demnach lokal bis zu 30 %.

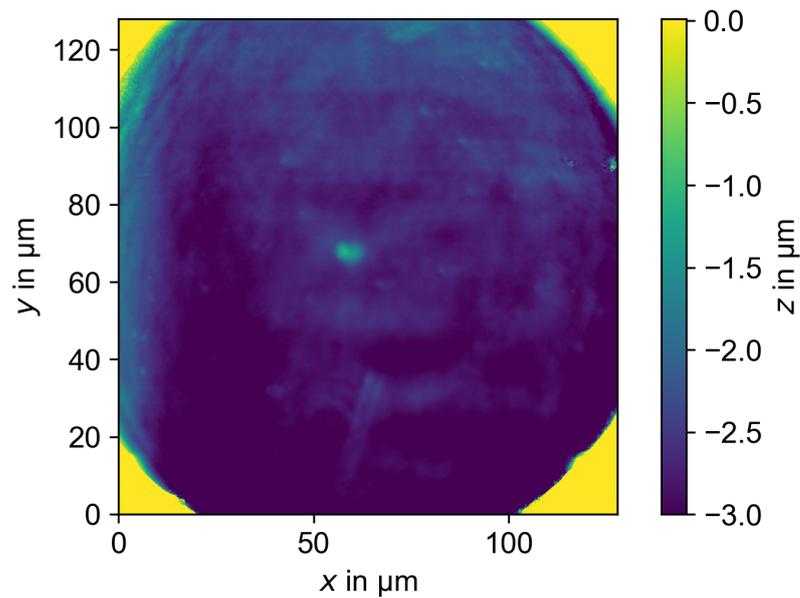


Abbildung 4.17: Abtrag mit 50 Laserpulsen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Da die reale Struktur eine Überlagerung der idealen Struktur, auf der die Berechnung der Prozessparameter basiert, und dieser Abtragscharakteristik ist, sollte die Inhomogenität auch bei der Berechnung der Linsenradien sichtbar werden. Dafür wird die in Kapitel 3.8 beschriebene Drehung der Messdatenwolke genutzt (siehe auch Abbildung 3.21) und einzelne Profilschnitte analysiert. Für die Analyse des Linsenradius wird eine Kreisgleichung an den Profilschnitt angenähert. Die Kreisgleichung entspricht dabei der Linsengleichung aus Formel 3.5, wenn r^2 mit x^2 ersetzt wird. Der jeweilige Profilschnitt befindet sich bei der y -Koordinate des Linsenmittelpunkts, unter Beachtung des vorher ermittelten Korrekturparameters y_0 , und ist parallel zur x -Achse. Für jeden Analysewinkel θ wird ein Profilschnitt berechnet. Die so berechneten Radien sind in Abbildung 4.18 für drei reale Strukturen dargestellt. Wie erwartet ist erkennbar, dass der ermittelte Linsenradius abhängig vom Analysewinkel ist. Dabei verringert sich der Radius von $\theta = 0^\circ$ bis etwa 50° , bleibt bis etwa 130° gleich und nimmt vergrößert sich dann wieder. Die so ermittelten Radien sind allgemein größer als die Radien der dreidimensional angenäherten Referenzstrukturen, da bei dieser Auswertungsmethode die Oberflächenverunreinigungen das Ergebnis stärker beeinflussen. Die Inhomogenität in der Abtragtiefe pro Laserpuls wirkt sich demnach direkt auf die Formgenauigkeit der strukturierten Mikrolinsen aus. Je homogener das Abtragsfeld ist, desto geringere Formabweichungen sind zu erwarten.

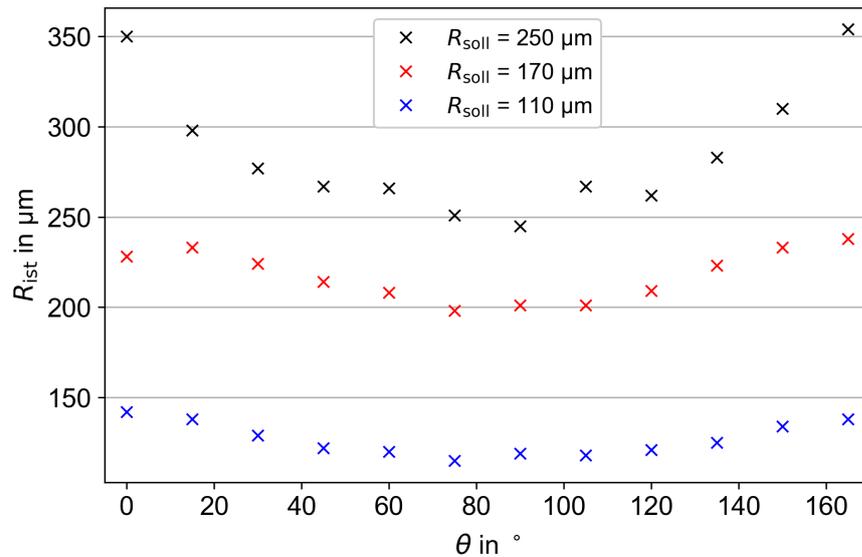


Abbildung 4.18: Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien ($H = 1 \text{ J/cm}^2$)

Der Einfluss der Abtragsinhomogenität kann auch in der Prozesssimulation berücksichtigt werden. Dafür wird erneut ein Abtrag mit 50 Laserpulsen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ hergestellt, vermessen, alle z -Werte in der Messdatenwolken durch 50 geteilt und zuletzt die Datenwolke derart verschoben, dass die z -Werte im Mittel bei $z = 0 \mu\text{m}$ liegen. Diese Matrix wird nun jeweils mit der binären Maskenmatrix (vgl. Abbildung 3.23, links) und der berechneten Laserpulanzahl pro Maske multipliziert und als zusätzlicher Term von der Substratmatrix abgezogen. Ein Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 4.19 für die Mikrolinse mit den Parametern $R_{\text{soll}} = 250 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$ dargestellt.

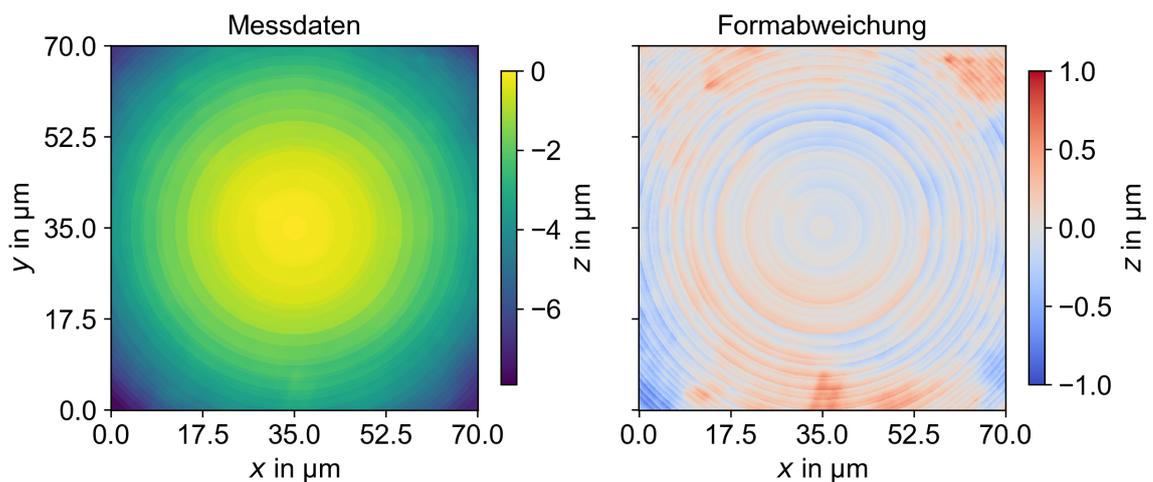


Abbildung 4.19: Überlagerung einer simulierten Linsestruktur mit dem realen Abtragsfeld ($R_{\text{soll}} = 250 \mu\text{m}$, $H = 1 \text{ J/cm}^2$)

Für diese simulierten Strukturen können nun ebenfalls Profilschnitte bei unterschiedlichen Analysewinkeln θ berechnet und der Kreisradius untersucht werden. Wie in Abbildung 4.20 dargestellt ist, nimmt der gemessene Radius bis ca. $\theta = 50^\circ$ ab, bleibt dann bis ca. $\theta = 130^\circ$ gleich und nimmt danach wieder zu. Dies stimmt mit den in Abbildung 4.18 erkennbaren Tendenzen für die realen Strukturen überein. Somit bestätigt auch die Simulation, dass eine Inhomogenität im Abtragsfeld die Formabweichungen der Struktur direkt beeinflusst. Weiterhin kann nun bereits anhand des Abtragsfeldes abgeschätzt werden, wie die Intensitätsverteilung im Laserstrahl die Form der Mikrostrukturen beeinflusst. Diese Information ist bspw. während oder nach einer Neujustage der optischen Elemente im Strahlengang hilfreich.

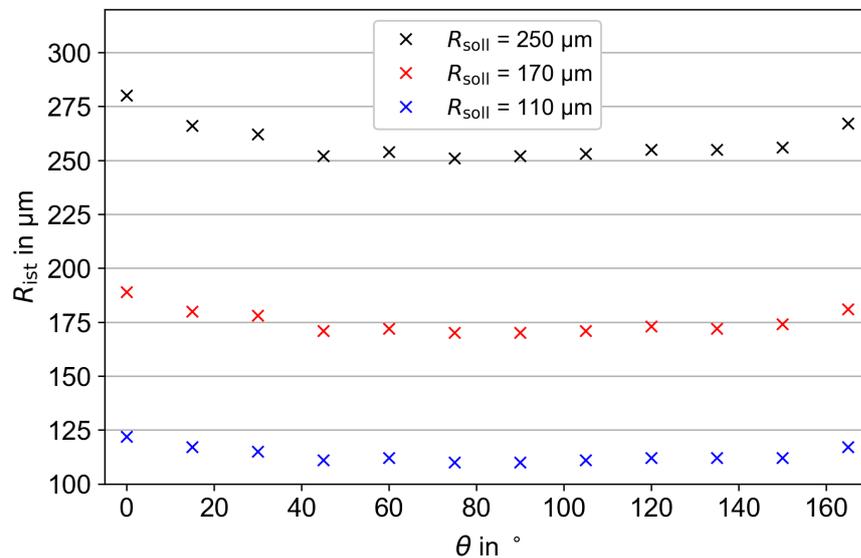


Abbildung 4.20: Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien von simulierten Strukturen unter Berücksichtigung des realen Abtragsfeldes ($H = 1 \text{ J/cm}^2$)

Für den S_q Wert einer Mikrostruktur wird die entsprechend Kapitel 3.7 zuerst die Formabweichung berechnet, indem die dreidimensional angenäherte Referenzstruktur von den Messdaten abgezogen wird. Die resultierenden Höhendaten werden in Formel 3.6 eingesetzt. Demnach wirken sich die lokalen Formabweichungen auch auf die Oberflächenrauheit aus. Falls aufgrund der Abtragsinhomogenität ein Bereich der Linse tiefer als erwartet strukturiert wird, so bleibt dieser auch nach Abzug der Referenzstruktur erhalten und wird dem Rauheitsprofil zugeordnet. Dieser Zusammenhang muss für die Auswertung der in Abbildung 4.21 für alle Strukturen dargestellten Oberflächenrauheit beachtet werden und wird daher in Kapitel 4.7 nochmals genauer untersucht. Tendenziell stimmt der Verlauf der real gemessenen Oberflächenrauheit mit den simulierten Werten aus Abbildung 4.15 überein. S_q nimmt mit größer werdendem R_{soll} für alle Laserpulsfluenzen ab. Die minimalen Oberflächenrauheiten liegen bei 250 nm und werden zumeist mit $H = 1 \text{ J/cm}^2$ erreicht. Mit die-

ser Laserpulsfluenz können demnach die Zielradien am genauesten und mit der geringsten Rauheit erreicht werden. Bezogen auf die für die Datenübertragung häufig genutzte Wellenlänge, bspw. von Eriksson et al. [EHPR19], von 1310 nm liegt die Rauheit im Bereich von etwa $\lambda/5$. Wie anhand der Auswertung der simulierten Strukturen erwartet, werden Rauheitswerte unter 100 nm nicht erreicht. Jedoch wird bei den simulierten Strukturen die real auftretende Formabweichung nicht berücksichtigt. Die Verringerung der Inhomogenität der Intensitätsverteilung im Laserstrahl sollte Gegenstand späterer Untersuchungen sein.

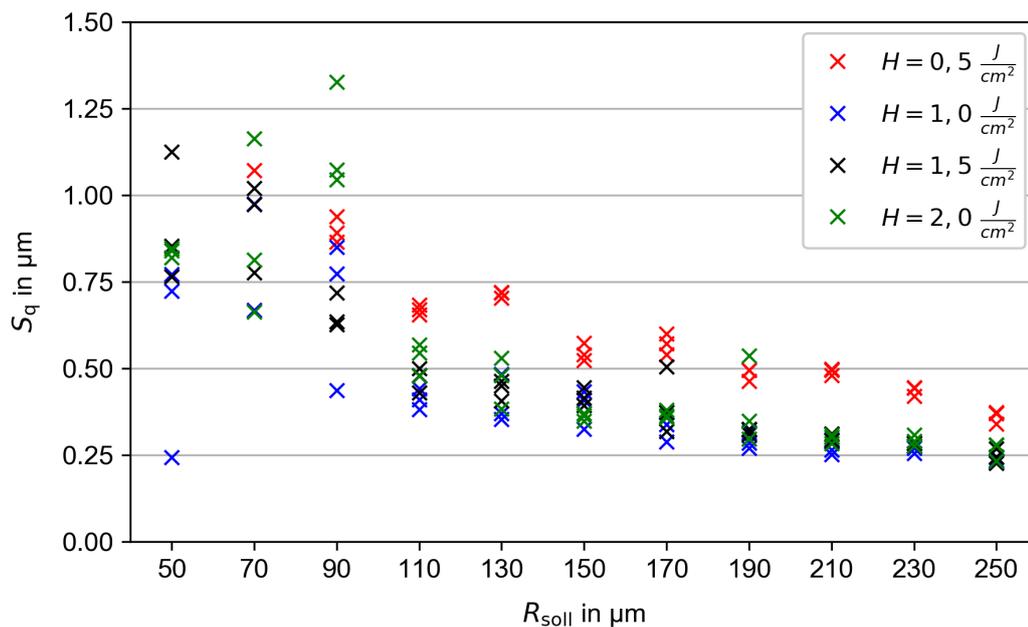


Abbildung 4.21: Vergleich der Oberflächenrauheit der realen Linienstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen

Weiterhin ist anzunehmen, dass der aus der Abtragsinhomogenität resultierende Formfehler deutlich größer als der eventuellen Fehler bei der Parameterberechnung ist. Auf den in Kapitel 4.5 erwähnten Vergleich unterschiedlicher Berechnungsmethoden wird daher verzichtet.

4.7 Auswertung mittels PSD-Funktion

Nachfolgend werden die mit $H = 1 \text{ J/cm}^2$ strukturierten Mikrolinsen mit der PSD-Funktion analysiert, um Informationen und Ansatzpunkte für eine Prozessoptimierung abzuleiten. Eine Beschreibung des genutzten Auswertungsalgorithmus befindet sich in Kapitel 3.8. Es wird jeweils ein Profilschnitt fouriertransformiert. Um eine Aussage über die gesamte Struktur treffen zu können, werden die Profilschnitte für verschiedene Analysewinkel berechnet, fouriertransformiert und danach gemittelt (vgl. Abbildung 3.21). Die PSD-Funktionen der jeweils fehlenden Sollradien befinden sich im Anhang in Abbildung A.2, A.3 und A.4. Zuerst werden die simulierten Strukturen ausgewertet und hinsichtlich theoretischer auftretender Peaks untersucht, um die Analyse der realen Strukturen zu erleichtern. In Abbildung 4.22 sind links die PSD-Funktionen der Struktur mit $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ für verschiedene Analysewinkel dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die einzelnen PSD-Funktionen nahezu identisch sind. Dies war für die Simulation aufgrund des dafür idealisierten Prozesses zu erwarten. Die vorhandenen Unterschiede sind ein Resultat der Formabweichungen der Masken (vgl. Abbildung 3.5). Das Ergebnis der Mittelung dieser PSD-Funktionen ist in Abbildung 4.22 rechts dargestellt. Es sind keine deutlichen Peaks erkennbar. Theoretisch sollte sich bei $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$ ein Peak befinden, da diese Ortsfrequenz der Differenz der Maskenradien entspricht. Bei $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$ ist jedoch nur ein Doppelpack erkennbar, der weniger als eine Größenordnung höher als die umgebenden Peaks ist. Nachfolgend soll deshalb untersucht werden, ob bei anderen Sollradien deutliche Peaks in den PSD-Funktionen auftreten.

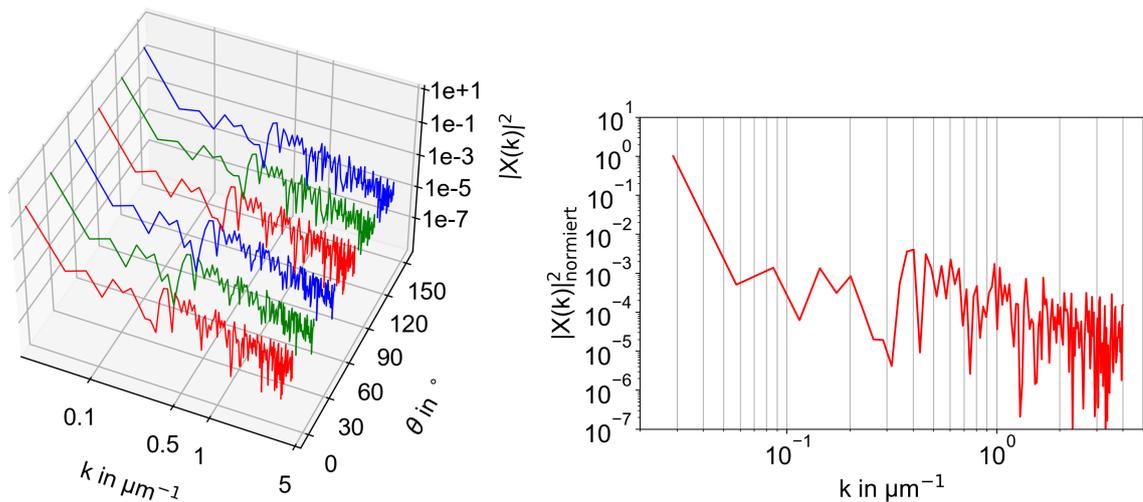


Abbildung 4.22: PSD-Funktionen der simulierten Struktur mit den verwendeten Masken für $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$ (links: für verschiedene Analysewinkel θ , rechts: über θ gemittelt)

In Abbildung 4.23 sind die PSD-Funktionen der simulierten Strukturen für die Sollradien $50\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$, $170\ \mu\text{m}$, $210\ \mu\text{m}$ und $250\ \mu\text{m}$ dargestellt. Wie schon für $R_{\text{Soll}} = 50\ \mu\text{m}$ gilt auch für die anderen Sollradien, dass keine eindeutigen Peaks detektiert werden können. Dies ist demnach auch für die nachfolgende Auswertung der realen Strukturen zu erwarten.

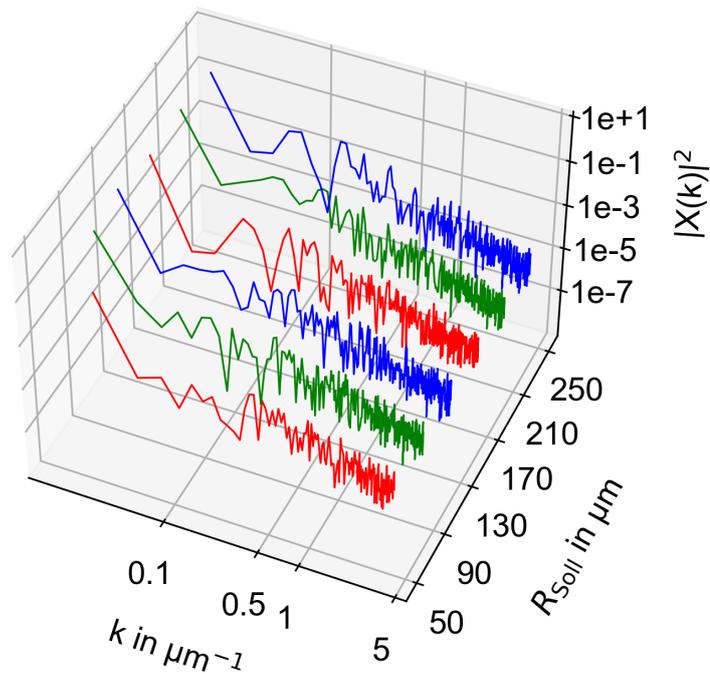


Abbildung 4.23: PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit den verwendeten Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1\ \text{J}/\text{cm}^2$

Die festgestellte Inhomogenität des Abtragsfeldes wirkt sich auch auf die PSD-Funktionen bei verschiedenen Analysewinkeln aus, wie in Abbildung 4.24 links zu erkennen. Das Resultat der Mittelung über θ ist in Abbildung 4.24 rechts dargestellt. Wie erwartet ist bei $k = 1\ \mu\text{m}^{-1}$ kein Peak erkennbar. Stattdessen liegt dieser bei ca. $k = 0,33\ \mu\text{m}^{-1}$, was einer Oberflächenwelle mit der dreifachen Wellenlänge von $k = 1\ \mu\text{m}^{-1}$ entspricht. Demnach kann für $R_{\text{Soll}} = 50\ \mu\text{m}$ ein geringer Einfluss der Maskensequenz auf die PSD-Funktion festgestellt werden.

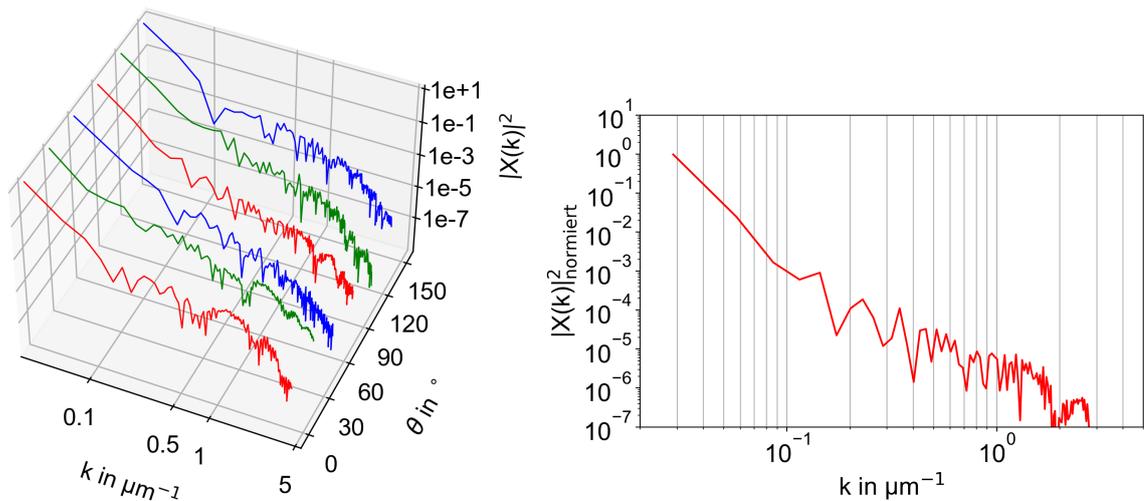


Abbildung 4.24: PSD-Funktionen der realen Struktur für $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$ (links: für verschiedene Analysewinkel θ , rechts: über θ gemittelt)

Für jeden Parametersatz wurden drei Strukturen hergestellt. Diese einzelnen über den Analysewinkel θ gemittelten Strukturen eines Parametersatzes werden daher ebenfalls gemittelt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist für die Sollradien $50 \mu\text{m}$, $90 \mu\text{m}$, $130 \mu\text{m}$, $170 \mu\text{m}$, $210 \mu\text{m}$ und $250 \mu\text{m}$ in Abbildung 4.25 dargestellt. Erneut können keine deutlichen Peaks detektiert werden. Demnach kann allgemein kein Einfluss der Prozessparameter auf die realen Strukturen festgestellt werden.

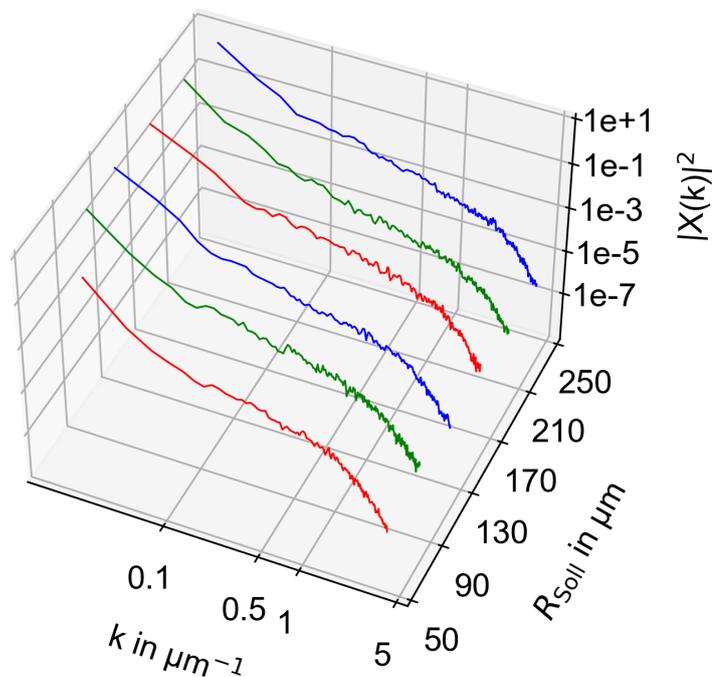


Abbildung 4.25: PSD-Funktionen der realen Strukturen für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$, jeweils über alle Strukturen eines Parametersatzes gemittelt

In der bereits erwähnten Vorarbeit [Syr21] wurden fluorlasermikrostrukturierte Fresnelzylinderlinsen untersucht. Für die Herstellung dieser Optiken wird ebenfalls das Maskenprojektionsverfahren mit einer einzelnen Maske im Strahlengang genutzt. Nach jedem ausgelösten Laserpuls verfährt ein Achspositionierungssystem das zu bearbeitende Substrat um eine definierte Strecke. Dabei gilt: je kleiner der Verfahrweg zwischen den Laserpulsen, desto tiefer wird die Struktur und umso kleiner wird der Krümmungsradius der einzelnen Fresnelzonen. Während der Strukturierung ist der Verfahrweg jeweils gleich, was zu einem deutlichen Peak in der entsprechenden PSD-Funktion führt. Im Ausblick auf weiterführende Untersuchungen wurde formuliert, dass eine Änderung des Verfahrweges im Bereich von $\pm 0,1\%$ die Höhe der Peaks verringern könnte. In der vorliegenden Arbeit weichen nahezu alle gemessenen Maskenradien aufgrund von Fertigungstoleranzen vom jeweiligen Sollradius ab (siehe Tabelle B.1). Dadurch wird die These aus der Vorarbeit untersucht, auch wenn das an dieser Stelle unbeabsichtigt war. Diese Abweichungen vom Sollradius könnten ein Grund für das Fehlen von deutlichen Peaks in der PSD-Funktion sein. Deshalb wird nachfolgend der Einfluss der Maskenradien auf die PSD-Funktion anhand von simulierten Strukturen betrachtet. Anstatt der tatsächlich verwendeten Masken wird die Berechnung nun mit einem Maskensatz mit ideal geformten Masken durchgeführt. Die Differenz der Radien zweier aufeinanderfolgender Masken beträgt jeweils genau $1\ \mu\text{m}$. In Abbildung 4.26 sind im linken Teilbild die PSD-Funktionen einer mit $R_{\text{soll}} = 50\ \mu\text{m}$ simulierten Struktur für verschiedene Analysewinkel θ dargestellt. Die einzelnen PSD-Funktionen sind identisch. Im rechten Teilbild ist die über θ gemittelte PSD-Funktion dargestellt. Verglichen mit der PSD-Funktion in Abbildung 4.22 fällt nun auf, dass der Doppelpeak bei $k = 1\ \mu\text{m}^{-1}$ um etwa eine Größenordnung höher geworden ist. Weiterhin sind nun Peaks bei $2\ \mu\text{m}^{-1}$, $3\ \mu\text{m}^{-1}$ und $4\ \mu\text{m}^{-1}$ zu erkennen. Diese Ortsfrequenzen entsprechen den Oberschwingungen von $k = 1\ \mu\text{m}^{-1}$.

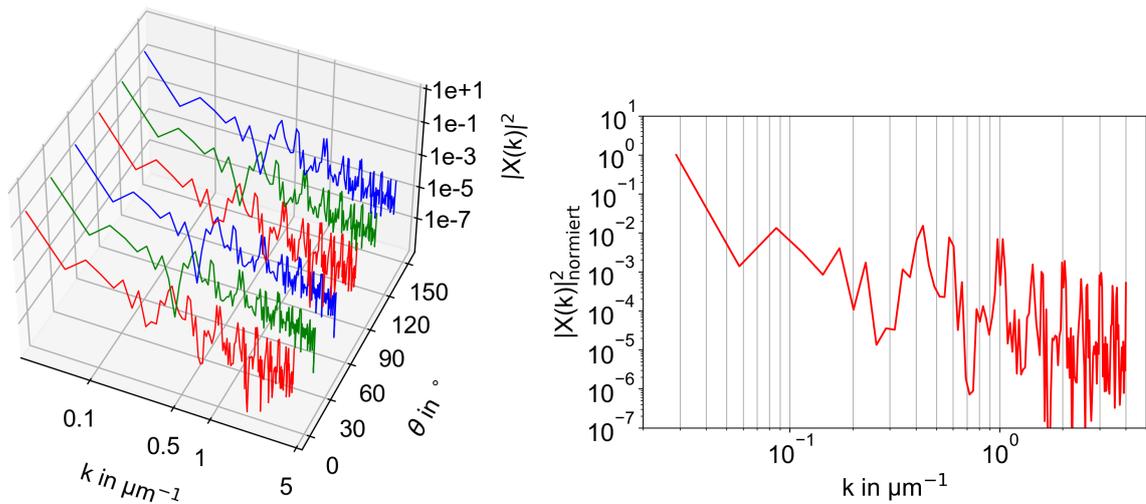


Abbildung 4.26: PSD-Funktionen der simulierten Struktur mit idealen Masken für $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$ (links: für verschiedene Analysewinkel θ , rechts: über θ gemittelt)

Bei diesen Ortsfrequenzen sind auch in den PSD-Funktionen der Strukturen mit größeren Sollradien Peaks zu erkennen, wie in Abbildung 4.27 dargestellt ist. Die Masken haben somit prinzipiell einen Einfluss auf die Strukturen. Die Abweichungen der Maskenradien vom jeweiligen Sollradius verringern jedoch die Höhe der entsprechenden Peaks in der PSD-Funktion. Die Auswertung der mit dem idealen Maskensatz simulierten Strukturen bestätigt somit die These aus der Vorarbeit.

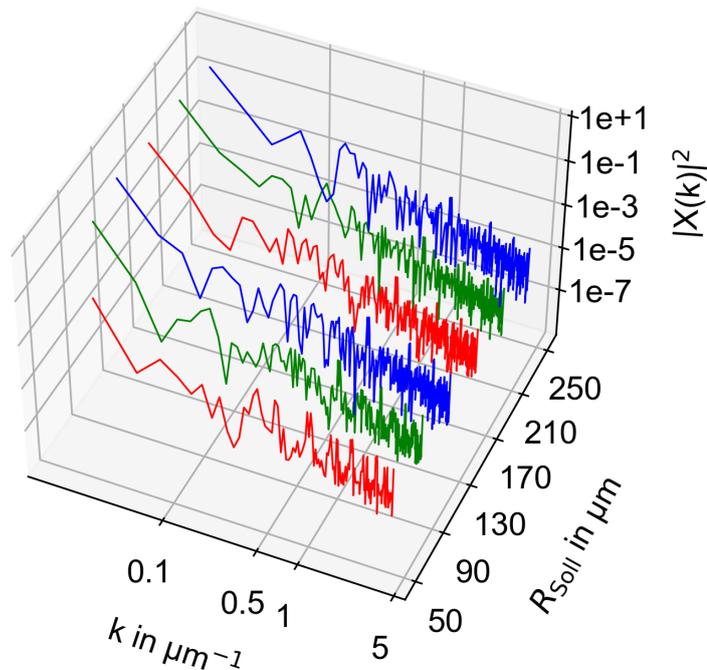


Abbildung 4.27: PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit idealen Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Wie in Kapitel 3.8 beschrieben kann basierend auf der PSD-Funktion auch die Rauheit der Struktur oberflächenwellenlängenaufgelöst analysiert werden (vgl. Abbildung 3.22). In Abbildung 4.28 ist das Ergebnis der Berechnung für die Struktur mit den Parametern $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$ dargestellt. Weiterhin ist zum Vergleich die Rauheit für eine mit den gleichen Parametern simulierte Struktur mit dem idealen Maskensatz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die in Abbildung 4.26 detektierbaren Oberschwingungen von $k = 1 \mu\text{m}^{-1}$ auch die Strukturrauheit beeinflussen. Dies wird durch die Sprünge im Rauheitswert bei den Grenzwellenlängen $\lambda_c = 1 \mu\text{m}$, $\lambda_c = 0,5 \mu\text{m}$ ($k = 2 \mu\text{m}^{-1}$) und $\lambda_c = 0,33 \mu\text{m}$ ($k = 3 \mu\text{m}^{-1}$) deutlich. Für den Rauheitswert der gemessenen Struktur sind keine Sprünge erkennbar. Die Maskensequenz ist demnach aufgrund der bereits vorhandenen Abweichungen der Maskenradien kein geeigneter Ansatzpunkt für eine Prozessoptimierung. Weiterhin fällt auf, dass die R_q Rauheit der gemessenen Struktur bis etwa $\lambda_c = 1 \mu\text{m}$ kleiner als 10 nm und bis etwa $\lambda_c = 10 \mu\text{m}$ kleiner als 40 nm ist. Dies gilt auch für die Strukturen mit den Sollradien 150 μm und 250 μm (vgl. Abbildungen A.5 und A.6). Bezogen auf die Design-Wellenlänge von 1310 nm liegt die Rauheit demnach im Bereich von etwa $\lambda/130$ bzw. etwa $\lambda/33$. Somit ist bestätigt, dass die Oberflächenwellen mit großen Wellenlängen, d.h. die Formabweichungen innerhalb der Struktur, die Rauheitswerte vergrößern und einen deutlich größeren Einfluss als die Prozessparameter haben. Zur Optimierung der Strukturen sollte daher zuerst die Homogenität der Intensitätsverteilung im Laserstrahl verbessert werden.

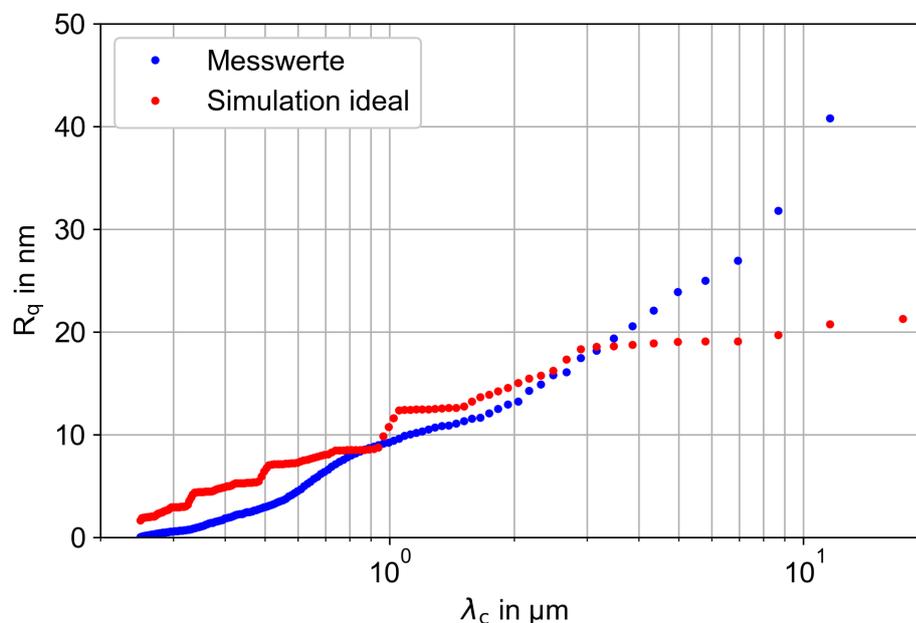


Abbildung 4.28: Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit für $R_{\text{soll}} = 50 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J/cm}^2$

4.8 Verringerung der Prozessdauer

Ein weiterer Ansatzpunkt für eine Prozessoptimierung ist die Bearbeitungsdauer pro Mikrostruktur. Für die Strukturierung wurde bisher jede Maskenposition nacheinander mit $5^\circ/\text{s}$ angefahren, dann auf die Korrekturbewegung des Bearbeitungstischs gewartet und zuletzt der Laserpuls(-zug) ausgelöst. Damit sollte die bestmögliche Konzentrität der Abträge in der Abbildungsebene erreicht werden. Die Strukturierung einer Mikrolinse dauert so allerdings etwa 80 s. Ohne den Stopp bei jeder Maskenposition und mit einer kontinuierlichen Drehbewegung könnte die Bearbeitungszeit reduziert werden. Für diese positionssynchrone Bearbeitung muss jedoch die Position der Drehachse zu jeder Zeit bekannt sein. Da in der Drehachse kein Sensor zur Positionsüberwachung (PSO, *position synchronized output*) verbaut ist, wird zuerst getestet, ob diese Aufgabe mittels eines CNC-Programms erfüllt werden kann. Das Ziel dabei ist, das Programm möglichst kurz zu fassen, um eine schnelle Abarbeitung zu gewährleisten. Dafür wird eine *while*-Schleife verwendet. Die Abbruchbedingung ist dabei das Erreichen der letzten Maskenposition. Der Programmablauf, der innerhalb der Schleife abgearbeitet wird, ist als Schema in Abbildung 4.29 dargestellt.



Abbildung 4.29: Programmübersicht: Positionsüberwachung während der gleichförmigen Bewegung der Drehachse

Jeweils zu Beginn der Schleife wird die aktuelle Position der Drehachse abgefragt und mit der nächsten zu erreichenden Maskenposition verglichen. Da die Achsposition mit vier Nachkommastellen ausgegeben wird, ist ein exaktes Erreichen der vorgegebenen Maskenposition unwahrscheinlich. Stattdessen soll ein Intervall von $\pm 0,03^\circ$ um die Zielposition erreicht werden. Dies entspricht bei dem Maskenkreisradius von 50 mm einer Abweichung in der Abbildungsebene von ca. $\pm 1 \mu\text{m}$. Nun kann das PSO-Programm mit verschiedenen Verfahrgeschwindigkeiten der Drehachse getestet werden. Wie in der Abbruchbedingung formuliert, wurden dann alle Maskenpositionen erfolgreich gefunden, wenn das Programm nach der ersten kompletten Achsumdrehung stoppt. Es kann festgestellt werden, dass dies bis zu einer Verfahrgeschwindigkeit von etwa $100^\circ/\text{s}$ gegeben ist, was einer Pulswiederholfrequenz von ca. 14 Hz entspricht. Um höhere Drehzahlen zu erreichen, muss das Zielwinkelintervall vergrößert werden. Jedoch werden mit größeren zulässigen Abweichungen der Abtragsmittelpunkte die Korrekturbewegungen des Bearbeitungstisch wirkungslos. Mit dem PSO-Programm sind geringere Prozesszeiten als 3,6 s somit nicht möglich.

Daher wird nun als Alternative zur Messung der Achsposition eine Berechnungsmethode auf Basis kinematischer Gleichungen getestet. Die Achsbewegung kann in zwei Phasen eingeteilt werden: zuerst die gleichmäßige Beschleunigung auf die vorgegebene Bearbeitungsgeschwindigkeit und nachfolgend eine gleichförmige Bewegung bis zum Prozessende. Entscheidend für die Laseransteuerung ist dabei die Zeit, die vom Beginn der Drehbewegung bis zum Erreichen der ersten Maskenposition vergeht. Nach dieser Zeit sollen 50 Pulse mit fester Pulswiederholfrequenz f_P ausgelöst werden. Somit ist auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{\max} vorgegeben. Diese wird so eingestellt, dass in der Zeit zwischen zwei Laserpulsen genau $7,2^\circ$ verfahren werden:

$$v_{\max} = \frac{f_P \cdot 360^\circ}{50} \quad (4.1)$$

Für die erste Phase kann die Dauer mittels des Geschwindigkeits-Zeit-Gesetzes berechnet werden:

$$v_{\max} = a \cdot t_1 + v_0 \quad (4.2)$$

Dabei entspricht a der Beschleunigung und t_1 der Zeit für die erste Bewegungsphase. Die Bewegung startet aus der Ruhelage, d.h. die Anfangsgeschwindigkeit v_0 ist $0^\circ/\text{s}$. Bei Erreichen der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{\max} wird $a = 0^\circ/\text{s}^2$ und die gleichförmige Bewegung beginnt. Für diese berechnet sich die vergangene Zeit nach

$$t_2 = \frac{s_2}{v_{\max}} \quad (4.3)$$

wobei s_2 für die zurückgelegte Strecke in der zweiten Bewegungsphase steht. Da die noch bis zur ersten Maskenposition zurückzulegende Strecke abhängig von a und v_{\max} ist, muss die bereits in der ersten Bewegungsphase gefahrene Strecke s_1 mittels des Weg-Zeit-Gesetzes berechnet und von s_{Start} subtrahiert werden, um s_2 zu erhalten.

$$s_2 = s_{\text{Start}} - s_1 = s_{\text{Start}} - \frac{a}{2} \cdot t_1^2 \quad (4.4)$$

s_{Start} entspricht dabei der Strecke von der Referenzierungsposition der Drehachse bis zur ersten Maskenposition bei $276,25^\circ$. Die für s_{Start} benötigte Zeit berechnet sich nach:

$$t_{\text{gesamt}} = t_1 + t_2 = \frac{v_{\max}}{a} + \frac{s_2}{v_{\max}} = \frac{v_{\max}}{a} + \frac{s_{\text{Start}} - \frac{v_{\max}^2}{2 \cdot a}}{v_{\max}} \quad (4.5)$$

Unabhängig von der Pulswiederholfrequenz wird die Beschleunigung auf $a = 300 \text{ }^\circ/\text{s}$ festgelegt. Für $f_P > 56 \text{ Hz}$ wird somit die erste Maskenposition zeitlich vor v_{\max} erreicht. Daher muss eine zusätzliche Umdrehung verfahren werden. Dies ist beispielhaft für $f_P = 60 \text{ Hz}$ in Abbildung 4.30 dargestellt. Der Schnittpunkt der schwarz gestrichelten Linien markiert das erstmalige Erreichen von $276,25^\circ$ bei $t = 1,35 \text{ s}$. Bei $t = 1,44 \text{ s}$ gilt $v = v_{\max}$ (schwarze Linie). Die Strukturierung beginnt $2,19 \text{ s}$ nach Programmstart bei $s = (276,25+360)^\circ$ und endet bei $t = 3,03 \text{ s}$ und $s = (276,25+2\cdot360)^\circ$. Mit einer Pulswiederholfrequenz von 60 Hz beträgt die Strukturierungsdauer demnach etwa $0,84 \text{ s}$.

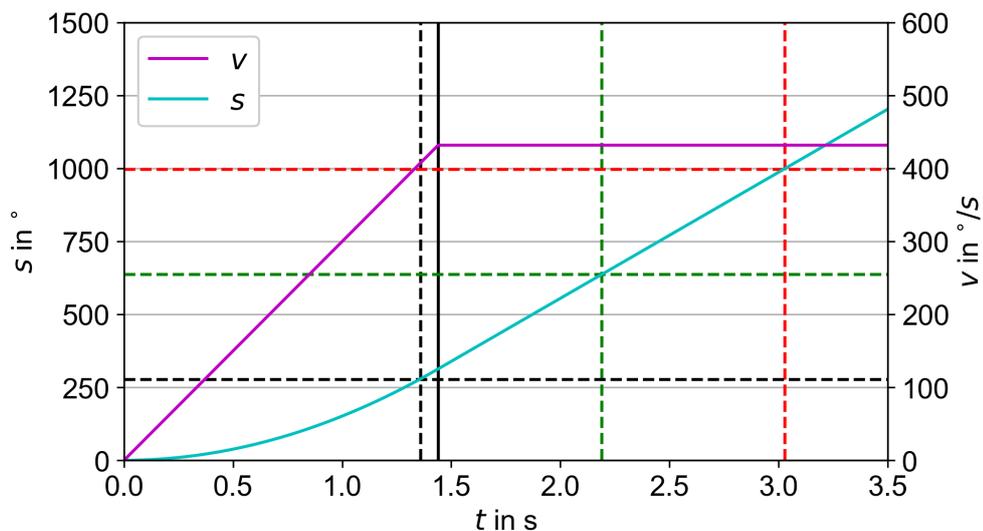


Abbildung 4.30: Beispielhafte Prozesszeitübersicht für $f_P = 60 \text{ Hz}$ mit $a = 300 \text{ }^\circ/\text{s}$ (grüne Linien: Strukturierungsbeginn, rote Linien: Strukturierungsende)

Wie bereits für die PSO-Methode erfolgt nun der Test bei steigender Laserpulsfrequenz bzw. Bearbeitungsgeschwindigkeit. Dabei kann festgestellt werden, dass bei der Berechnungsmethode nicht das CNC-Programm sondern die Drehachse limitierend wirkt. Bei $f_P > 62 \text{ Hz}$ bzw. $v_{\max} > 450^\circ/\text{s}$ bricht das Programm nach ca. $1,5 \text{ s}$ aufgrund eines Positionierungsfehlers ab, was bedeutet, dass die Drehachse die geforderte Verfahrensgeschwindigkeit nicht erreichen kann. Mit der maximalen Pulswiederholfrequenz ist die Prozessdauer von $0,81 \text{ s}$ mit der Berechnungsmethode jedoch deutlich kürzer als mit der PSO-Methode. Aus diesem Grund wird auf Abtragstests mit der PSO-Methode verzichtet und nachfolgend Kegelstrukturen auf Basis der Berechnungsmethode bei verschiedenen Pulswiederholfrequenzen hergestellt und hinsichtlich des Basiswinkels und der Oberflächenrauheit untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.31 dargestellt.

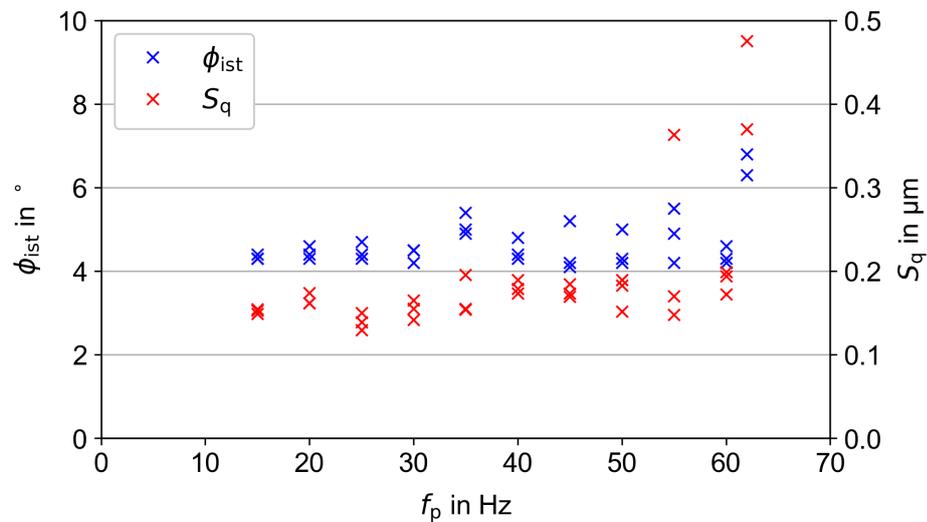


Abbildung 4.31: Gemessener Basiswinkel und Oberflächenrauheit der Kegelstrukturen für verschiedene Pulswiederhol frequenzen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Bis $f_p = 60 \text{ Hz}$ ist sowohl ϕ_{ist} als auch S_q für alle Pulswiederhol frequenzen etwa gleich. Bei 62 Hz vergrößern sich beide Zahlenwerte. Die Ursache hierfür liegt in dem zunehmenden Positionierungsfehler, der auch im Abtrag sichtbar wird (vgl. Abbildung 4.32). Somit kann abgeleitet werden, dass sich die Struktur wahrscheinlich auch bei größeren Pulswiederhol frequenzen nicht verändern wird, insofern die Drehachse für größere Verfahrensgeschwindigkeiten ausgelegt ist. Mit der vorhandenen Drehachse beträgt die minimale Prozessdauer bei der Verwendung aller 50 Masken und unter der Voraussetzung gleichbleibender Strukturqualität $0,84 \text{ s}$.

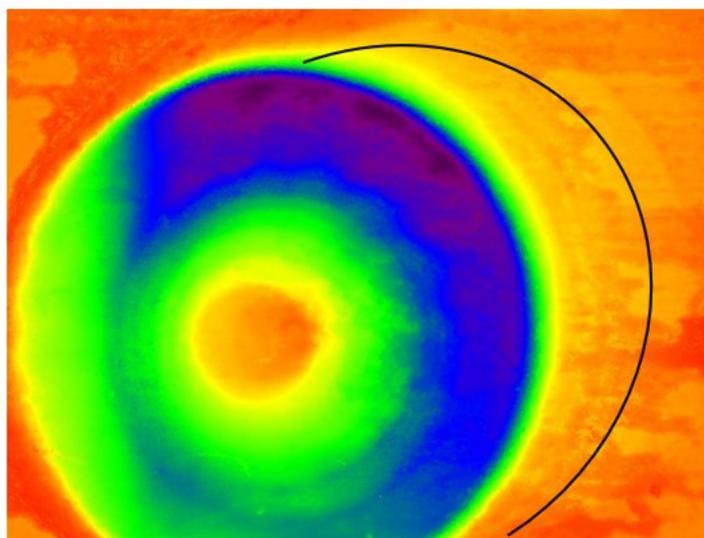


Abbildung 4.32: Positionierungsfehler bei $f_p = 62 \text{ Hz}$ (schwarze Linie entlang der Außenkontur eines verschobenen Abtrags)

In dem Modus der kontinuierlichen Drehbewegung muss der Maskensatz auf die zu fertigende Zielgeometrie angepasst werden, da keine Maske ausgelassen werden kann. Weiterhin kann pro Maskenposition nur ein Laserpuls ausgelöst werden. Soll eine einzelne Maske mehr als einmal abgebildet werden, so muss sie entsprechend oft hintereinander im Maskensatz vorhanden sein. Sollen stattdessen alle Masken mehrfach abgebildet werden, so kann das Maskenrad entsprechend mehrmals um 360° verfahren und die gesamte Laserpulsanzahl um ein ganzzahliges Vielfaches hochskaliert werden. Das Resultat mehrerer Überfahrten mit dem bisher verwendeten Maskensatz soll nachfolgend untersucht werden.

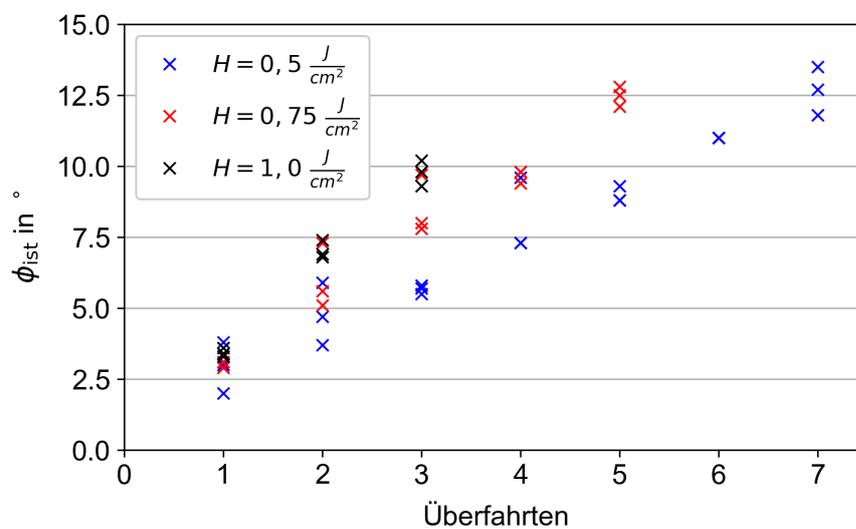


Abbildung 4.33: Gemessener Basiswinkel der Kegelstruktur bei mehreren Überfahrten und für verschiedene Laserpulsfluenzen bei $f_p = 60$ Hz

In Abbildung 4.33 ist der Einfluss von mehreren Überfahrten bei verschiedenen Laserpulsfluenzen auf den gemessenen Basiswinkel der Kegelstrukturen dargestellt. Für jede Laserpulsfluenz kann ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Basiswinkel und der Anzahl an Überfahrten festgestellt werden. Weiterhin führt eine Erhöhung der Laserpulsfluenz zu einem größeren Basiswinkel. Daher ist anzunehmen, dass mit einer geeigneten Parameterkombination von der Anzahl der Überfahrten und der Laserpulsfluenz der Kegelbasiswinkel trotz der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit nahezu beliebig einstellbar ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination aus der sequentiellen Maskenprojektion und der Fluorlasermikrostrukturierung ermöglicht die Herstellung von rotationssymmetrischen Mikrooptiken. Der Test des für die Umsetzung der Strukturierungsmethode verwendeten Versuchsaufbaus erfolgt anhand von Kegelstrukturen. Diese zeigten Formabweichungen, die auf die Referenzierung mittels Hall-Sensor zurückzuführen waren. Durch den Umbau auf ein optisches Referenzierungssystem und Korrekturbewegungen des Bearbeitungstischs während der Strukturierung, um die einzelnen Abtragsmittelpunkte übereinander zu positionieren, konnten die Formabweichungen verringert werden. Nachfolgend wurde das Programm zur Berechnung geeigneter Prozessparameter getestet, das auf der Simulation des Strukturierungsprozesses basiert. Unter Vorgabe der Laserpulsfluenz und eines Strukturparameters wie bspw. des Sollkrümmungsradius der Linsengeometrie wird die benötigte Maskensequenz sowie die Laserpulsanzahl pro Maske berechnet. Die Auswertung der mit diesen Parametern hergestellten Strukturen zeigt, dass die Berechnungsmethode prinzipiell zum Erreichen der Zielgeometrien führt. Jedoch wurden für alle Parametersätze geringfügig kleinere Krümmungsradien der Mikrolinsen festgestellt. Die Ursache dafür liegt in der Messung der Abtragstiefe pro Laserpuls. Für eine exakte Übereinstimmung der Simulation mit den realen Strukturen muss die Abtragstiefe pro Laserpuls auf wenige Nanometer genau bekannt sein. Eine Analyse des Abtragsfeldes ergab allerdings, dass lokal Abweichungen vom angenommenen Abtrag pro Laserpuls von bis zu 30 % auftreten. Das bedeutet, dass die Intensitätsverteilung im Laserstrahl inhomogen ist. Wird das inhomogene Abtragsfeld in der Prozesssimulation berücksichtigt, stimmen die berechneten Krümmungsradien deutlich besser mit den real gemessenen überein. Die noch vorhandenen Formabweichungen der Mikrolinsen sind somit ein Resultat der inhomogenen Intensitätsverteilung im Laserstrahl. Nach einer erneuten Messung der Abtragstiefe pro Laserpuls wurden mit verschiedenen Laserpulsfluenzen Mikrolinsen mit Sollkrümmungsradien im Bereich von $50\ \mu\text{m}$ bis $250\ \mu\text{m}$ strukturiert. Die gemessenen Radien der mit $H = 1,0\ \text{J}/\text{cm}^2$ hergestellten Strukturen weichen dabei am geringsten vom jeweiligen Sollradius ab, wobei aus jedem Parametersatz eine Struktur nahezu exakt den Sollradius aufweist. Die Abweichung der Radien der jeweils anderen Strukturen beträgt maximal etwa +5 %. Für die Angabe der Oberflächenrauheit der Mikrolinsen werden zwei verschiedene Methoden eingesetzt. Nach dem Formabzug kann die quadratisch gemittelte Oberflächenrauheit S_q der Strukturen berechnet werden, die mit größer werdendem Krümmungsradius geringer wird und minimal etwa 250 nm beträgt. In diesem Wert sind allerdings auch die Formabweichungen enthalten. Für eine genauere Analyse wird mittels einer diskreten Fouriertransformation die R_q Linienrauheit der Struktur

oberflächenwellenlängenaufgelöst berechnet. Bis zu einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 1 \mu\text{m}$ ist der Rauheitswert kleiner als 10 nm und bis etwa $\lambda_c = 10 \mu\text{m}$ kleiner als 40 nm. Bezogen auf die für die Datenübertragung häufig genutzte Wellenlänge von 1310 nm liegt die Rauheit somit im Bereich von etwa $\lambda/130$ bzw. etwa $\lambda/33$. Abschließend werden Verfahrensvarianten mit Hinblick auf die jeweils kürzest mögliche Bearbeitungsdauer für ein mikrooptisches Bauelement gegenübergestellt. Diese wird bisher nur durch die Drehzahlbegrenzung des im Versuchsaufbau enthaltenen Motors limitiert und beträgt minimal etwa 0,84 s, wobei die Pulswiederholfrequenz 60 Hz beträgt.

Das Ziel weiterführender Untersuchungen sollte zuerst eine Verbesserung der Homogenität der Intensitätsverteilung im Laserstrahl sein, um die Formabweichungen und damit auch die Rauheitswerte weiter zu verringern. Weiterhin sollte ein anderer Antrieb im Versuchsaufbau getestet werden. Mit einem geeigneteren Motor könnte theoretisch eine Drehzahl gewählt werden, die der maximalen Pulswiederholfrequenz des Lasers von 200 Hz entspricht. Somit könnte eine Mikrooptik in etwa 0,25 s hergestellt werden. Zur Verringerung der Strukturierungstiefen besonders bei kleinen Krümmungsradien kann eine Auslegung der Mikrolinsen als Fresnel-Optiken getestet werden. Dazu müssen entweder die Maskengeometrien angepasst oder der Versuchsaufbau um weitere (austauschbare) Blenden ergänzt werden. Außerdem sollten Nachbehandlungsmethoden wie bspw. das Ätzen mit einer Kaliumhydroxidlösung oder mittels Ionenstrahl untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [AG05] AG, 3D-Micromac: *Technikhandbuch Fluor Laser Station EX-157*. Chemnitz, 2005
- [ALOD10] ALCOCK, Simon G. ; LUDBROOK, Geoff D. ; OWEN, Tommy ; DOCKREE, Richard: Using the power spectral density method to characterise the surface topography of optical surfaces. In: *Advances in Metrology for X-Ray and EUV Optics III*. 2010
- [Ber09] BERTRAM, René: *Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien*. Mittweida, Hochschule Mittweida, Diplomarbeit, 2009
- [Bro05] BROKMANN, Ulrike: *Beitrag zur Mikrostrukturierung von fotostrukturierbarem Glas mittels UV-Laserstrahlung*, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2005
- [BSTK14] BÜCKMANN, Tiemo ; SCHITTY, Robert ; THIEL, Michael ; KADIC, Muamer: On three-dimensional dilational elastic metamaterials. In: *New Journal of Physics* 16 (2014), Nr. 3
- [But09] BUTZ, Tilman: *Fouriertransformation für Fußgänger, 6. aktualisierte Auflage*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009 (Studium). – ISBN 987–3–8348–0538–6
- [BZG20] BOGUCKI, Aleksander ; ZINKIEWICZ, Łukasz ; GRZESZCZYK, Magdalena: Ultra-long-working-distance spectroscopy of single nanostructures with aspherical solid immersion microlenses. In: *Light, science & applications* 9 (2020), S. 48
- [DH08] DAHOTRE, Narendra B. ; HARIMKAR, Sandip P.: *Laser fabrication and machining of materials*. New York, NY : Springer, 2008. – ISBN 9780387723440
- [DIN98] DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG): *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen*

mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen (ISO 13565-1 : 1996). April 1998

- [DIN10] DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG): *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009*. EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009 D. Berlin, Juli 2010
- [DIN12] DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG): *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 25178-2:2012*. EN ISO 25178-2:2012 D. Berlin, September 2012
- [DLD09] DI, Si ; LIN, Hui ; DU, Ruxu: An Artificial Compound Eyes Imaging System Based on MEMS Technology. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE Press, 2009 (ROBIO'09). – ISBN 9781424447749, S. 13–18
- [DYC12] DU, Guangqing ; YANG, Qing ; CHEN, Feng: Direct fabrication of seamless roller molds with gapless and shaped-controlled concave microlens arrays. In: *Optics letters* 37 (2012), Nr. 21, S. 4404–4406
- [EE15] EICHLER, Hans J. ; EICHLER, Jürgen: *Laser*. Berlin : Springer, 2015. – ISBN 978-3-642-41437-4
- [EHPR19] ERIKSSON, Tobias A. ; HIRANO, Takuya ; PUTTNAM, Benjamin J. ; RADEMACHER, Georg: Wavelength division multiplexing of continuous variable quantum key distribution and 18.3 Tbit/s data channels. In: *Communications Physics* 2 (2019), Nr. 1
- [FBIM06] FRICKE-BEGEMANN, Thomas ; IHLEMANN, Jürgen ; MEINERTZ, Jörg: Diffraktive Mikrolinsen: Herstellung durch direkte Laserstrukturierung. In: *DGaO-Proceedings* (2006)
- [HAEH20] HATEFI, Shahrokh ; ABOU-EL-HOSSEIN, Khaled: Review of single-point diamond turning process in terms of ultra-precision optical surface roughness. In:

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020), Nr. 5-6, S. 2167–2187. – ISSN 0268–3768
- [Häh06] HÄHNEL, Falk: *Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser*. Mittweida, Hochschule Mittweida, Diplomarbeit, 2006
- [Her13] HERMATSCHWEILER, Martin: *3D-Druck erobert die Mikroskala*. Wiley Online Library, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/latj.201300001>, Zugriff: 15.06.2021, 2013
- [HG09] HÜGEL, Helmut ; GRAF, Thomas: *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren, 2. Auflage*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009 (Aus dem Programm Fertigung). – ISBN 9783835100053
- [Hwu09] HWU, Ruey-Jen: *Micro-optic elements and method for making the same*. 2009. – Patent No.: US 7,531,104 B1
- [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: 16.05.2021, 2019
- [KBFB11] KIM, Joo Y. ; BRAUER, Nils B. ; FAKHFOURI, Vahid ; BOIKO, Dmitri L.: Hybrid polymer microlens arrays with high numerical apertures fabricated using simple ink-jet printing technique. In: *Optical Materials Express* 1 (2011), Nr. 2, S. 259
- [Klo17] KLOCKE, Fritz: *Fertigungsverfahren 2*. Berlin : Springer, 2017
- [MCY15] MENG, Xiangwei ; CHEN, Feng ; YANG, Qing: Simple fabrication of closed-packed IR microlens arrays on silicon by femtosecond laser wet etching. In: *Applied Physics A* 121 (2015), Nr. 1, S. 157–162. – ISSN 0947–8396
- [MGL16] MOORE, Sean ; GOMEZ, Juan ; LEK, Devanda: Experimental study of polymer microlens fabrication using partial-filling hot embossing technique. In: *Micro-electronic Engineering* 162 (2016), S. 57–62. – ISSN 0167–9317
- [Nau14] NAUMANN, Helmut: *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe,*

- Geräte, Messtechnik, 7. Auflage.* Carl Hanser Verlag, 2014. – ISBN 978–3–446–42625–2
- [Sch21] SCHOTT AG: *D263T*. <https://www.pgo-online.com/de/D263.html>, Zugriff: 16.05.2021, 2021
- [Smi11] SMITH, Julius O.: *Spectral Audio Signal Processing: Hann or Hanning or Raised Cosine*. W3K, <http://www.worldcat.org/oclc/776892709>, Zugriff: 16.05.2021, 2011. – ISBN 9780974560731
- [Syr19] SYRBE, Eric: *Herstellung von ebenen, definiert geneigten Spiegelflächen für mikrooptische Anwendung in Borosilikatglas mittels Fluorlasermikrostrukturierung*. Mittweida, Hochschule Mittweida, Bachelorarbeit, 2019
- [Syr21] SYRBE, Eric: *Forschungs- und Entwicklungsmodul II: Charakterisierung von Mikrostrukturen mittels Power-Spectral-Density-Funktion*. Hochschule Mittweida, Mittweida : Fakultät Ingenieurwissenschaften, 2021
- [Wer08] WERNER, Martin: *Signale und Systeme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008. – ISBN 978–3–8348–0233–0
- [WRES09] WORSCH, Christian ; RÜSSEL, Christian ; EDELMANN, Jan ; SCHUBERT, Andreas: Isothermes Heißprägen von beschichteten Glaswafern. In: *Vakuum in Forschung und Praxis* 21 (2009), Nr. 5, S. 10–14. – ISSN 0947076X
- [YLL18] YUAN, Wei ; LI, Li-Hua ; LEE, Wing-Bun: Fabrication of Microlens Array and Its Application: A Review. In: *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 31 (2018), Nr. 1. – ISSN 1000–9345
- [Yod89] YODER, Paul R.: *Apparatus for laser sculpture of the cornea*. 08.06.1989. – Patent No. EP 0346116A3

Anhang A: Abbildungen

Kapitel 4.6: Herstellung von Mikrolinsen mit definierten Radien

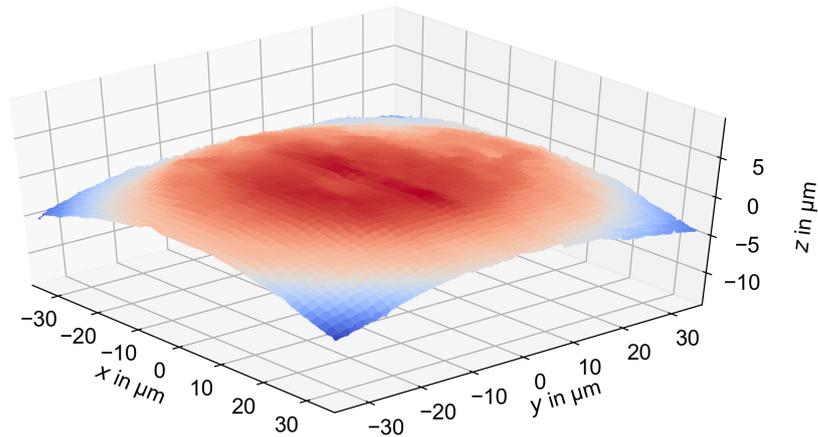


Abbildung A.1: Mikrolinse ($R_{\text{Soll}} = 190 \mu\text{m}$, $H = 1 \text{ J/cm}^2$)

Kapitel 3.8: Auswertung mittels PSD-Funktion

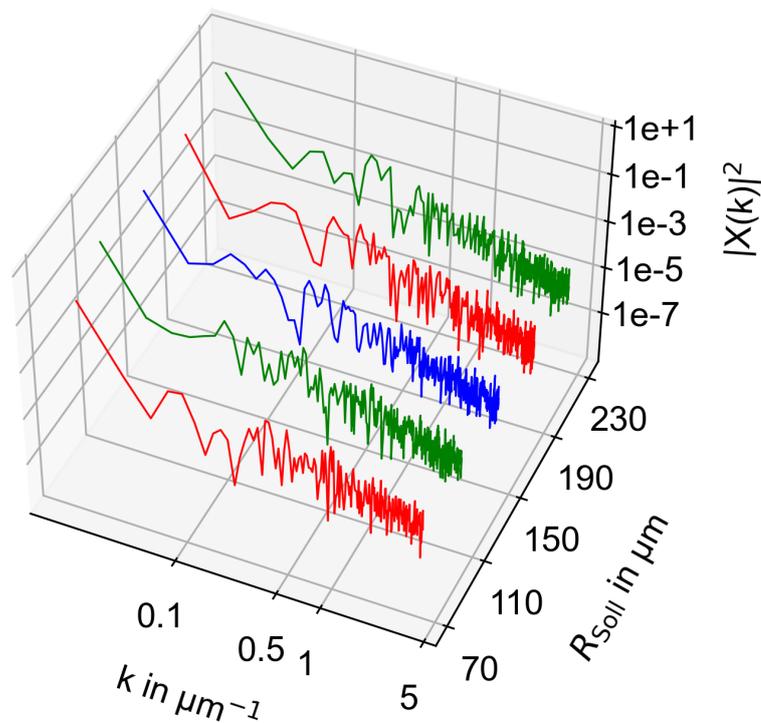
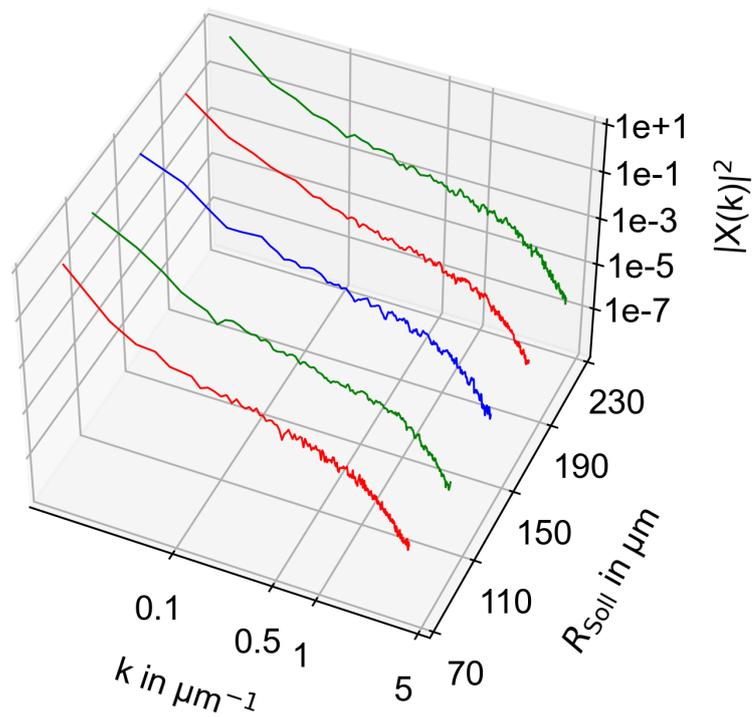
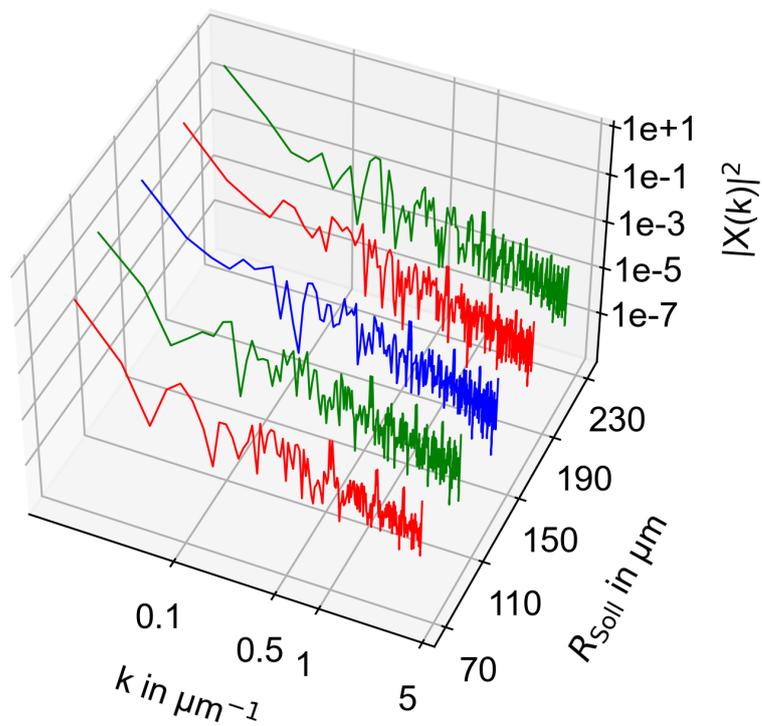


Abbildung A.2: PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit den verwendeten Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Abbildung A.3: PSD-Funktionen der realen Strukturen für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ Abbildung A.4: PSD-Funktionen der simulierten Strukturen mit idealen Masken für verschiedene Sollradien bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

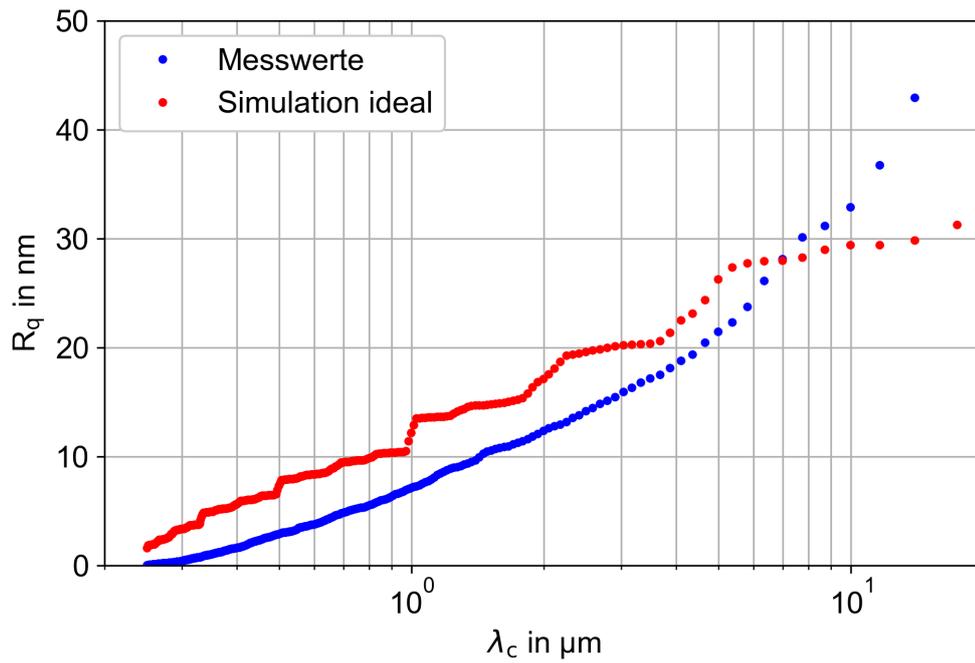


Abbildung A.5: Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit für $R_{\text{soll}} = 150 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J}/\text{cm}^2$

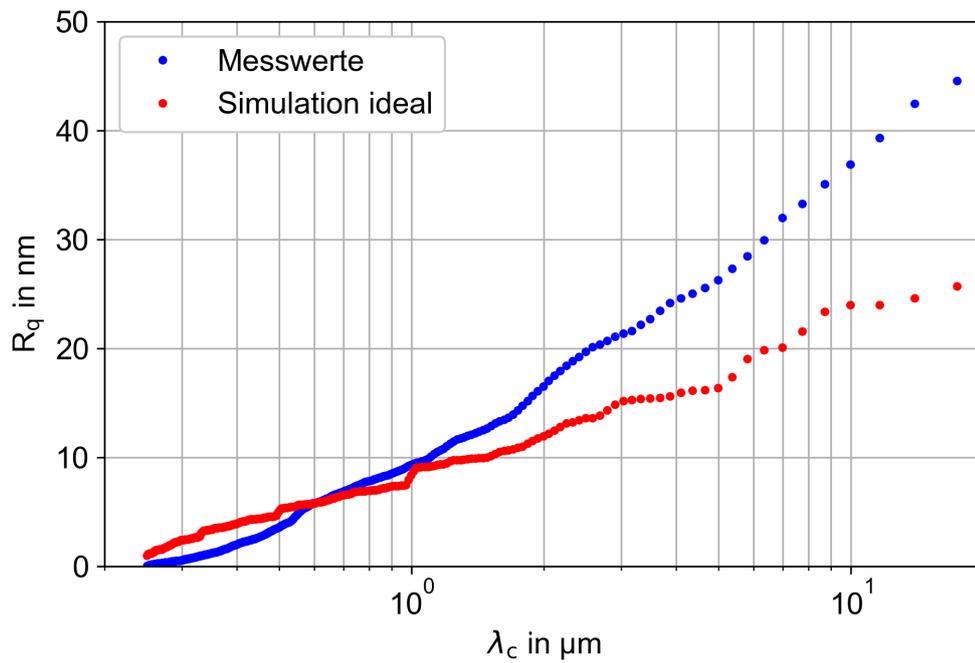


Abbildung A.6: Aus der PSD-Funktion berechnete R_q Rauheit für $R_{\text{soll}} = 250 \mu\text{m}$ und $H = 1 \text{ J}/\text{cm}^2$

Anhang B: Messdaten

Kapitel 3.2: Maskenherstellung

Masken- nummer	Sollgröße in μm	gemessene Ist- größe in mm	Istgröße D in der Abbildungsebene in μm
1	2	0,064	2,4
2	4	0,126	4,7
3	6	0,212	7,9
4	8	0,248	9,3
5	10	0,300	11,2
6	12	0,352	13,2
7	14	0,408	15,3
8	16	0,449	16,8
9	18	0,504	18,9
10	20	0,555	20,8
11	22	0,597	22,4
12	24	0,672	25,2
13	26	0,732	27,4
14	28	0,785	29,4
15	30	0,843	31,6
16	32	0,886	33,2
17	34	0,928	34,8
18	36	0,985	36,9
19	38	1,044	39,1
20	40	1,097	41,1
21	42	1,158	43,4
22	44	1,214	45,5
23	46	1,217	45,6
24	48	1,252	47,0
25	50	1,303	48,8
26	52	1,356	50,8
27	54	1,417	53,1
28	56	1,481	55,5
29	58	1,535	57,5

Masken- nummer	Sollgröße in μm	gemessene Ist- größe in mm	Istgröße D in der Abbildungsebene in μm
30	60	1,571	58,9
31	62	1,613	60,5
32	64	1,670	62,6
33	66	1,718	64,4
34	68	1,766	66,2
35	70	1,840	69,0
36	72	1,874	70,3
37	74	1,936	72,6
38	76	1,986	74,5
39	78	2,020	75,7
40	80	2,100	78,8
41	82	2,151	80,6
42	84	2,208	82,8
43	86	2,264	84,9
44	88	2,321	87,0
45	90	2,372	88,9
46	92	2,416	90,6
47	94	2,482	93,1
48	96	2,534	95,0
49	98	2,632	98,7
50	100	2,649	99,3

Tabelle B.1: Masken

Kapitel 4.3: Parameterstudie

H in J/cm ²	ϕ_{ist} in °	S_q in μm
0,5	5,2	0,28
	4,9	0,30
	5,0	0,29
1,0	8,0	0,39
	8,1	0,37
	8,1	0,32
1,5	9,6	0,47
	9,3	0,46
	9,6	0,45
2,0	11,1	0,53
	11,1	0,48
	10,8	0,48
2,5	12,7	0,60
	12,5	0,55
	11,8	0,56
3,0	13,6	0,56
	13,7	0,57
	13,5	0,61
3,5	14,8	0,63
	14,6	0,61
	14,6	0,62
4,0	14,9	0,66
	15,0	0,95
	15,2	0,65

Tabelle B.2: Einfluss der Laserpulsfluenz

Laserpulsanzahl	ϕ_{ist} in $^{\circ}$	S_q in μm
1	5,3	0,18
	4,9	0,19
	5,0	0,15
2	8,0	0,39
	8,1	0,37
	8,1	0,32
3	10,0	0,62
	9,5	0,65
	9,0	0,65
4	13,0	0,82
	12,1	0,84
	12,7	0,81
5	15,5	1,04
	15,7	1,07
	15,9	1,13
6	18,3	1,29
	17,6	1,28
	18,0	1,47

Tabelle B.3: Einfluss der Laserpulsanzahl

Maskensequenz	ϕ_{ist} in $^{\circ}$	S_q in μm
1	8,0	0,39
	8,1	0,37
	8,1	0,32
2	4,3	0,21
	4,5	0,18
	4,8	0,16
3	3,5	0,17
	3,9	0,20
	4,1	0,23
4	3,1	0,18
	2,9	0,16
	2,8	0,17
5	2,3	0,17
	1,8	0,08
	1,7	0,07

Tabelle B.4: Einfluss der Maskensequenz

Kapitel 4.4: Test der berechneten Prozessparameter

ϕ_{soll} in $^{\circ}$	ϕ_{ist} in $^{\circ}$
	5,7
5,0	6,4
	6,6
	9,7
7,5	9,7
	9,5
	12,0
10,0	11,2
	11,1

Tabelle B.5: Parametertest mit Kegelstrukturen

R_{soll} in μm	R_{ist} in μm	R_{soll} in μm	R_{ist} in μm
50	-	170	153,3
50	48,6	170	145,8
70	67,1	170	148,3
70	64,0	190	178,2
90	92,4	190	183,1
90	92,9	190	180,2
90	93,1	210	179,8
110	99,6	210	176,0
110	99,3	210	172,7
110	101,3	230	202,7
130	118,8	230	210,8
130	125,7	230	194,2
130	126,3	250	214,6
150	142,7	250	218,1
150	142,7	250	211,0
150	138,7		

Tabelle B.6: Parametertests mit Linsenstrukturen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$ ($\Delta z = 55 \text{ nm}$)

H in J/cm^2	Laserpulsabtrag in nm
0,25	13
0,50	25
0,75	44
1,00	63
1,25	72
1,50	74
1,75	86
2,00	92

Tabelle B.7: Gemessener Laserpulsabtrag Δz bei $f_P = 200$ Hz in D263T

R_{soll} in μm	R_{ist} in μm	R_{soll} in μm	R_{ist} in μm
50	66,8	170	168,7
50	52,8	170	171,7
50	60,0	170	187,7
70	46,6	190	190,3
70	67,8	190	188,8
70	79,5	190	214,6
90	72,6	210	211,1
90	87,7	210	219,4
90	97,0	210	223,6
110	93,3	230	237,3
110	114,8	230	238,0
110	109,1	230	233,0
130	138,5	250	247,7
130	131,2	250	253,4
130	132,1	250	251,4
150	160,1		
150	149,5		
150	154,4		

Tabelle B.8: Parametertest mit Linsenstrukturen bei $H = 1$ J/cm^2 ($\Delta z = 63$ nm)

Kapitel 4.5: Auswertung der simulierten Strukturen

R_{soll} in μm	R_{ist} in μm für $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$	R_{ist} in μm für $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$	R_{ist} in μm für $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$	R_{ist} in μm für $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$
50	53,4	53,0	53,2	53,3
70	73,5	73,0	73,2	73,4
90	93,5	93,9	94,1	93,8
110	115,0	114,8	114,6	115,3
130	134,8	135,0	134,9	135,3
150	156,1	155,6	155,5	154,8
170	175,9	176,1	176,3	177,5
190	197,7	197,4	198,5	196,7
210	219,0	218,0	218,4	218,5
230	237,8	240,6	240,2	239,8
250	262,2	260,5	259,9	260,4

Tabelle B.9: Vergleich der gemessenen Radien der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Sollradien und Laserpulsfluenzen

R_{soll} in μm	S_q in μm für $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$	S_q in μm für $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$	S_q in μm für $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$	S_q in μm für $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$
50	0,104	0,111	0,120	0,120
70	0,132	0,128	0,131	0,145
90	0,105	0,122	0,163	0,114
110	0,128	0,132	0,135	0,131
130	0,088	0,099	0,115	0,113
150	0,086	0,079	0,092	0,101
170	0,071	0,084	0,088	0,097
190	0,077	0,082	0,083	0,094
210	0,074	0,077	0,076	0,085
230	0,062	0,077	0,066	0,084
250	0,055	0,072	0,074	0,075

Tabelle B.10: Vergleich der Oberflächenrauheit der simulierten Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen

Kapitel 4.6: Herstellung von Mikrolinsen mit definierten Radien

R_{soll} in μm	R_{ist} in μm für $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$	R_{ist} in μm für $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$	R_{ist} in μm für $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$	R_{ist} in μm für $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$
50	46,5	66,8	49,9	57,8
	50,7	52,8	54,0	48,5
	61,6	60,0	68,2	-
70	59,5	46,6	68,3	65,4
	44,5	67,8	60,8	67,5
	-	79,5	60,2	75,6
90	73,9	72,6	82,7	70,0
	72,1	87,7	83,2	69,9
	74,8	97,0	83,4	65,6
110	92,0	93,3	104,2	112,6
	91,9	114,8	99,1	107,9
	93,1	109,1	98,6	105,7
130	105,0	138,5	119,0	127,0
	108,2	131,2	113,0	122,8
	103,4	132,1	111,4	122,7
150	125,2	160,1	137,3	137,6
	119,7	149,5	127,0	130,2
	118,5	154,4	124,0	130,7
170	130,8	168,7	142,6	148,1
	131,0	171,7	155,6	146,4
	127,3	187,7	143,9	147,5
190	141,2	190,3	159,1	216,4
	140,3	188,8	160,6	163,7
	143,0	214,6	164,2	171,3
210	159,1	211,1	176,1	183,3
	155,3	219,4	178,5	184,3
	156,2	223,6	-	190,6
230	174,7	237,3	190,3	203,2
	173,8	238,0	192,3	206,5
	173,7	233,0	192,9	209,5
250	191,3	247,7	214,2	230,8
	189,3	253,4	209,3	216,8
	187,0	251,4	207,2	217,6

Tabelle B.11: Vergleich der gemessenen Radien der Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen

Analysewinkel θ in $^\circ$	R_{ist} in μm	R_{ist} in μm	R_{ist} in μm
	bei $R_{\text{Soll}} = 110 \mu\text{m}$	bei $R_{\text{Soll}} = 170 \mu\text{m}$	bei $R_{\text{Soll}} = 250 \mu\text{m}$
0	142	228	350
15	138	233	298
30	129	224	277
45	122	214	267
60	120	208	266
75	115	198	251
90	119	201	245
105	118	201	267
120	121	209	262
135	125	223	283
150	134	233	310
165	138	238	354

Tabelle B.12: Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien ($H = 1 \text{ J/cm}^2$)

Analysewinkel θ in $^\circ$	R_{ist} in μm	R_{ist} in μm	R_{ist} in μm
	bei $R_{\text{Soll}} = 110 \mu\text{m}$	bei $R_{\text{Soll}} = 170 \mu\text{m}$	bei $R_{\text{Soll}} = 250 \mu\text{m}$
0	122	189	280
15	117	180	266
30	115	178	262
45	111	171	252
60	112	172	254
75	110	170	251
90	110	170	252
105	111	171	253
120	112	173	255
135	112	172	255
150	112	174	256
165	117	181	267

Tabelle B.13: Gemessener Radius für verschiedene Analysewinkel und Sollradien von simulierten Strukturen unter Berücksichtigung des realen Abtragsfeldes ($H = 1 \text{ J/cm}^2$)

R_{soll} in μm	S_q in μm für $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$	S_q in μm für $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$	S_q in μm für $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$	S_q in μm für $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$
50	1,548	0,722	0,853	0,819
	-	0,771	0,765	0,839
	1,636	0,243	1,124	0,846
70	1,860	0,975	1,020	0,813
	1,071	-	0,776	0,663
	-	0,667	0,973	1,163
90	0,864	0,849	0,718	1,326
	0,891	0,772	0,634	1,044
	0,937	0,436	0,626	1,073
110	0,655	0,441	0,430	0,477
	0,682	0,410	0,500	0,567
	0,669	0,381	0,479	0,544
130	0,717	0,483	0,406	0,479
	0,720	0,353	0,463	0,530
	0,703	0,370	0,449	0,382
150	0,572	0,325	0,393	0,370
	0,523	0,407	0,415	0,347
	0,539	0,433	0,445	0,363
170	0,540	0,338	0,373	0,357
	0,599	0,372	0,505	0,363
	0,571	0,287	0,317	0,379
190	0,495	0,284	0,325	0,536
	0,462	0,314	0,322	0,296
	0,495	0,269	0,310	0,347
210	0,498	0,294	0,291	0,307
	0,479	0,251	0,311	0,301
	0,495	0,264	-	0,283
230	0,445	0,255	0,276	0,276
	0,420	0,269	0,285	0,290
	0,442	0,275	0,282	0,307
250	0,372	0,234	0,226	0,279
	0,370	0,242	0,268	0,277
	0,340	0,229	0,245	0,233

Tabelle B.14: Vergleich der Oberflächenrauheit der realen Linsenstrukturen für unterschiedliche Laserpulsfluenzen

Kapitel 4.8: Verringerung der Prozessdauer

f_P in Hz	ϕ_{ist} in $^\circ$	S_q in μm	f_P in Hz	ϕ_{ist} in $^\circ$	S_q in μm
15	4,3	0,151	45	4,1	0,171
	4,3	0,153		4,2	0,180
	4,4	0,148		5,2	0,167
20	4,6	0,159	50	5,0	0,189
	4,3	0,170		4,2	0,180
	4,4	0,159		4,3	0,150
25	4,7	0,129	55	4,9	0,146
	4,3	0,147		5,5	0,355
	4,4	0,137		4,2	0,169
30	4,2	0,154	60	4,6	0,194
	4,5	0,164		4,3	0,197
	4,5	0,141		4,2	0,171
35	5,4	0,192	62	6,3	0,457
	5,0	0,155		6,8	0,360
	4,9	0,154			
40	4,8	0,189			
	4,4	0,169			
	4,3	0,177			

Tabelle B.15: Gemessener Basiswinkel und Oberflächenrauheit der Kegelstrukturen für verschiedene Pulswiederholffrequenzen bei $H = 1 \text{ J/cm}^2$

Überfahrten	ϕ_{ist} in $^{\circ}$		
	für $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$	für $H = 0,75 \text{ J/cm}^2$	für $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$
1	3,4	2,9	2,0
	3,6	3,1	3,8
	3,3	3,1	3,0
2	6,8	5,1	4,7
	6,9	7,3	5,9
	7,4	5,6	3,7
3	10,2	8,0	5,5
	9,3	7,8	5,8
	9,8	9,7	5,7
4		9,4	7,3
		9,8	9,6
		9,8	7,3
5		12,1	8,8
		12,5	8,8
		12,8	9,3
6			11,0
			11,0
			11,0
7			13,5
			11,8
			12,7

Tabelle B.16: Gemessener Basiswinkel der Kegelstrukturen bei mehreren Überfahrten und für verschiedene Laserpulsfluenzen bei $f_p = 60 \text{ Hz}$

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, 29.09.2021

Eric Syrbe