

# **Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

von

**M.Sc. Marcel Röder**

aus Schorndorf

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. André Zimmermann

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Harald Gießen

Tag der mündlichen Prüfung: 03.07.2019

Institut für Mikrointegration der Universität Stuttgart  
2019



# Widmung

Meiner Frau Sarah



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen ganz herzlich bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Promotion unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. André Zimmermann von der Universität Stuttgart für die Betreuung und Korrektur der Arbeit. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr. Harald Gießen für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Mein weiterer Dank gilt meinen Kollegen von Hahn-Schickard in Stuttgart sowie den Mitarbeitern des Institutes für Mikrointegration an der Universität Stuttgart, die einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben und die Arbeit bei Hahn-Schickard zu einem schönen Erlebnis machen.

Besonders möchte ich mich bei Dr. Thomas Günther bedanken für die fachliche Betreuung der Promotion, das große Vertrauen, das er mir in meiner täglichen Arbeit entgegengebracht hat sowie das Fördern meiner Kompetenzen und Möglichkeiten während unserer gemeinsamen Zeit in der Gruppe Präzisions- und Kunststofftechnik. Außerdem danke ich den Kollegen aus der Werkstatt-Gruppe, insbesondere Marc Drexler und Hartmut Renz, mit denen es sehr viel Spaß gemacht hat zusammenzuarbeiten und die mich stark bei den Themen Ultrapräzisionsbearbeitung und Spritzguss unterstützt haben. Des Weiteren gilt mein Dank den Kollegen aus der Konstruktions-Gruppe Yaping Liu, Peter Schilling und Thilo Rothermel, die einen großen Anteil an dieser Promotion haben.

Ganz herzlich möchte ich mich auch bei meiner Familie bedanken, insbesondere meinen Eltern, die mich all die Jahre unterstützt und dadurch diese Promotion überhaupt ermöglicht haben. Bereitwillig haben sie mir ihr Büro zur Verfügung gestellt, um die schriftliche Ausarbeitung meiner Arbeit ungestört anfertigen zu können. Über all die Jahre standen sie mir stets mit Rat und Tat bei.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Sarah, die mir für die Promotion den Rücken freigehalten und mich über die komplette Zeit unterstützt hat.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzzusammenfassung</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>17</b>
<b>2 Aufbau der Arbeit</b> .....	<b>19</b>
<b>3 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>22</b>
3.1 Kunststoffoptiken .....	22
3.2 Herstellungsverfahren für optische Werkzeugeinsätze .....	25
3.2.1 Ultrapräzisionsbearbeitung.....	27
3.2.2 Erodieren .....	34
3.2.3 Elektrochemisches Abtragen .....	35
3.2.4 Laserbearbeitung .....	35
3.2.5 LIGA .....	36
3.2.6 Laserdirektschreiben .....	37
3.2.7 Elektronenstrahlschreiben .....	39
3.2.8 Ionenstrahlschreiben.....	40
3.2.9 Nanoimprintlithographie .....	40
3.2.10 Polieren/Läppen.....	42
3.3 Replikation von Kunststoffoptiken mittels Spritzguss .....	42
3.3.1 Spritzgießen.....	43
3.3.2 Spritzprägen.....	47
3.3.3 Materialien für Optikspritzguss.....	50
3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	52
<b>4 Wissenschaftliche Fragestellung</b> .....	<b>53</b>
<b>5 Mikrostrukturierung durch Ultrapräzisionsbearbeitung</b> .....	<b>55</b>
5.1 Einleitung.....	55
5.2 Methoden .....	56
5.2.1 UP-Fräsen von Mikrolinsenarrays.....	57
5.2.2 Werkzeugbau/Integrationstechnik.....	64
5.2.3 Spritzprägen.....	66
5.3 Ergebnisse.....	69
5.3.1 Charakterisierung der Werkzeugeinsätze für die Herstellung eines Mikrolinsenarrays.....	69
5.3.2 Ergebnisse des Spritzprägeprozesses zur Herstellung eines Mikrolinsenarrays.....	73
5.3.3 Charakterisierung der spritzgeprägten Mikrolinsenarrays .....	75

5.3.4	Demonstration der Funktionsfähigkeit der Mikrolinsenarrays in einem hyperspektralen Kamerasystem .....	78
5.4	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung .....	79
<b>6</b>	<b>Mikrostrukturierung durch Laserdirektschreiben .....</b>	<b>84</b>
6.1	Einleitung.....	84
6.2	Methoden .....	86
6.2.1	Herstellung von Glasmastern mittels Laserdirektschreiben .....	87
6.2.2	Galvanokopieren .....	88
6.2.3	Werkzeugbau/Integration .....	92
6.2.4	Spritzprägen gekrümmter DOE.....	95
6.3	Ergebnisse.....	99
6.3.1	Charakterisierung der durch Laserdirektschreiben hergestellten Glasmaster .....	99
6.3.2	Ergebnisse des Galvanokopierprozesses .....	100
6.3.3	Charakterisierung der Nickel-Stamper .....	104
6.3.4	Charakterisierung des UP-gedrehten Prägestempels.....	107
6.3.5	Ergebnisse des Spritzprägeprozesses zur Herstellung gekrümmter DOE.....	108
6.3.6	Charakterisierung der spritzgeprägten DOE .....	116
6.3.7	Demonstration der Funktionsfähigkeit in einem konfokalen Messaufbau.....	119
6.4	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung .....	120
<b>7</b>	<b>Nanostrukturierung durch Ionenstrahlschreiben.....</b>	<b>127</b>
7.1	Einleitung.....	127
7.2	Methoden .....	130
7.2.1	Herstellen eines nanostrukturierten Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben.....	131
7.2.2	Werkzeugbau und Integration .....	133
7.2.3	Spritzprägen.....	135
7.3	Ergebnisse.....	136
7.3.1	Charakterisierung des mittels Ionenstrahlschreiben strukturierten Werkzeugeinsatzes .....	137
7.3.2	Charakterisierung der mittels Spritzprägen abgeformten Nanostrukturen .....	142
7.3.3	Demonstration der Funktionsfähigkeit der spritzgeprägten DOE .....	145
7.4	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung .....	148
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>151</b>
8.1	Vergleich der Prozessketten .....	151
8.2	Auswahl Herstellungstechnologie für optische Werkzeugeinsätze.....	154



8.3 Herausforderungen bei der Herstellung mikrostrukturierter Kunststoffoptiken .....	158
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>162</b>
<b>10 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>167</b>
<b>11 Veröffentlichungen.....</b>	<b>177</b>



## Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken mittels Spritzgießen. Dabei wurden drei Prozessketten entwickelt. Jede Prozesskette verwendet unterschiedliche Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Werkzeugeinsatzes, welcher anschließend für die Replikation mittels Spritzgießen eingesetzt werden kann. Der Spritzguss wurde dabei im Spritzprägeverfahren durchgeführt, welches häufig im Bereich Optikspritzguss eingesetzt wird.

Die erste Prozesskette beschäftigt sich mit der Mikrostrukturierung mittels Ultrapräzisionsbearbeitung am Beispiel der Herstellung von Mikrolinsenarrays. Dabei wird im ersten Schritt ein Werkzeugeinsatz mittels Ultrapräzisionsbearbeitung gefräst und anschließend die optischen Bauteile im Spritzprägeverfahren repliziert. Für die Herstellung des Werkzeugeinsatzes wurde eine Frässtrategie entwickelt, die es ermöglicht, hochpräzise Mikrolinsen in einen Werkzeugeinsatz zu integrieren. Dabei wurden 12.000 Mikrolinsen auf einer Fläche von  $13 \times 15 \text{ mm}^2$  hergestellt, wobei die Oberflächenqualität der einzelnen Linsen  $R_a < 10 \text{ nm}$  betrug. Das spritzgeprägte Mikrolinsenarray hatte eine Bauteildicke von  $500 \mu\text{m}$ , wobei die sehr hohe Oberflächenqualität der einzelnen Linsen von  $R_a < 10 \text{ nm}$  beibehalten werden konnte. Die Funktionsfähigkeit der hergestellten Mikrolinsenarray konnte in einem hyperspektralen Kamerasystem demonstriert werden.

Die zweite Prozesskette beschreibt die Mikrostrukturierung mittels Laserdirektschreiben anhand der Herstellung eines diffraktiven optischen Elementes, welches als Nullbrechkraftelement ausgelegt wurde. Das hergestellte Element besaß dabei zwei gekrümmte Flächen, wovon eine asphärisch und die andere mikrostrukturiert war. Der benötigte strukturierte Werkzeugeinsatz wurde mittels Laserdirektschreiben strukturiert. Dabei wurde eine Masterstruktur auf einer gekrümmten Glaslinse erzeugt. Anschließend wurde durch Galvanokopieren ein fester Werkzeugeinsatz hergestellt und in ein Spritzprägewerkzeug integriert. Durch die Replikation im Spritzprägeverfahren konnten die diffraktiven Strukturen mit einer Stufenhöhe von  $1,65 \mu\text{m}$  abgeformt werden. Die Funktionsfähigkeit der hergestellten diffraktiven optischen Elemente konnten in einem chromatisch konfokalen Messaufbau gezeigt werden. Die Beugungseffizienz der Elemente betrug 73 %.

Die dritte Prozesskette befasst sich mit der Herstellung von mikro- und nanostrukturierten Bauteilen mittels Spritzprägen. Hierfür wurde eine neuartige Prozesskette etabliert, welche das direkte Strukturieren eines Titan-Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben verwendet. Dadurch konnten Strukturen im Sub-Mikrometerbereich erzeugt werden, welche anschließend im Spritzprägeverfahren in ein Kunststoffbauteil übertragen wurden. Als Mikrostrukturen wurden zum einen Teststrukturen und zum anderen ein diffraktives optisches Element hergestellt. Die Funktionsfähigkeit der dabei hergestellten DOE-Strukturen konnte in einem Versuchsaufbau demonstriert werden.

Neben der Entwicklung der drei Prozessketten wird in dieser Arbeit eine Auswahlhilfe für Technologien zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen präsentiert. Diese unter-

stützt die Auswahl einer geeigneten Technologie, wenn ein Werkzeugeinsatz für optische Anwendungen hergestellt werden soll. Dabei wird zwischen mikrostrukturierten und nicht strukturierten Werkzeugeinsätzen unterschieden. Eine ausführliche Erläuterung der Technologien beschreibt dabei zusätzlich die Möglichkeiten der einzelnen Technologien sowie deren Einschränkungen.

## Abstract

This thesis focuses on the fabrication of microstructured plastic optics by injection molding. Three process chains have been developed. Each process chain uses different processes to produce a microstructured tool insert, which can then be used for replication by injection molding. For the molding of the components the injection-compression molding process was applied, which is commonly used in optical injection molding.

The first process chain deals with the production of polymer microlens arrays as an example for ultra-precision machining. In the first step, a tool insert is milled using ultra-precision machining and then the optical components are replicated using injection-compression molding. A milling strategy was developed for the production of the tool insert that makes it possible to integrate high-precision microlenses into a tool insert. 12.000 microlenses were produced on an area of 13x15 mm<sup>2</sup>, whereby the surface quality of the individual lenses was  $R_a < 10$  nm. The injection-molded microlens array had a component thickness of 500  $\mu\text{m}$  and the very high surface quality of the individual lenses of  $R_a < 10$  nm could be maintained. The functionality of the manufactured microlens array could be demonstrated in a hyperspectral camera system.

The second process chain describes the fabrication of a diffractive optical element as an example for laser direct writing, which was designed as a zero refractive element. The manufactured element had two curved surfaces, whereby one was aspherical and the other microstructured. The required structured mold insert was structured by laser direct writing. A master structure was created on a curved glass lens. A solid mold insert was then produced by electroplating and integrated into an injection molding tool. The diffractive structures with a step height of 1.65  $\mu\text{m}$  could be molded by replication in the injection-compression molding process. The functionality of the produced diffractive optical elements could be demonstrated in a chromatic confocal measurement setup. The achieved diffraction efficiency of the elements was 73 %.

The third process chain describes the production of micro- and nanostructured components by injection-compression molding. Therefore, a new process chain was established, which uses the direct structuring of a titanium tool insert by means of ion beam writing. Thus, structures in the sub-micrometer range could be created, which were afterwards transferred into a plastic component by injection-compression molding. The microstructures produced were test structures and a diffractive optical element. The functional capability of the DOE structures produced could be demonstrated in a test setup.

In addition to the development of the three process chains, this work includes a selection guide for technologies that can be used to produce optical mold inserts. This supports the selection of a suitable technology, if a mold insert for optical applications needs to be manufactured. A distinction is made between microstructured and non-structured tool inserts. A detailed description of the technologies describes the possibilities of the individual technologies as well as their limitations.



## Abkürzungsverzeichnis

COC	Cyclo-Olefin Copolymer
COP	Cyclo-Olefin Polymer
DOE	Diffraktives optisches Element
EDM	Electrical discharge machining
EUV	Extrem ultraviolett
FTS	Fast Tool Servo
h	Stunde
ITO	Institut für Technische Optik (Universität Stuttgart)
LAM	Laser Autofokus Messung
LDW	Laser direct writing
µm	Mikrometer
min	Minuten
MLA	Mikrolinsenarray
mm	Millimeter
NIL	Nanoimprint Lithographie
NiV	Nickel-Vanadium
nm	Nanometer
P-V	Peak to Valley
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVD	Physical vapour deposition
REM	Rasterelektronenmikroskopie
s	Sekunden
STS	Slow Tool Servo
UP	Ultrapräzision
UV	Ultraviolett
USAF	United State Air Force
WLI	Weißlichtinterferometrie





## 1 Einleitung

Optische Komponenten werden in einer Vielzahl von Industriezweigen benötigt, dazu gehören Kommunikation, Analytik, Sensorik, Energie, Beleuchtung, Automotive und Medizintechnik. Als Teil von optischen Systemen sind sie dabei unentbehrlich für industrielle und alltägliche Anwendungen. Beispiele hierfür sind Handykameras, Fahrassistenzsysteme, Lichtschranken, Gestensteuerungen, optische Datenspeicher, Sensoren und Endoskope.

Deutschland gehört zu den führenden Innovationstreibern im Bereich der optischen Technologien und will dies in Zukunft auch weiter bleiben. Der Markt für optische Technologien folgt weltweit einem starken, langfristigen Wachstumstrend [1] und wird als einer der größten Wachstumstreiber in der Zukunft gesehen [2]. Der Jahresumsatz in diesem Bereich betrug in Deutschland im Jahr 2014 29,4 Mrd. Euro mit einer erwarteten Steigerung auf 43,7 Mrd. Euro im Jahr 2020 [3]. Die optischen Technologien werden daher als Schlüsseltechnologie für den Wirtschaftsstandort Deutschland bezeichnet, welche eine starke Hebelwirkung auf Innovation und Wertschöpfung in anderen Industrien und Dienstleistungsbereichen erzielen [4].

Optiken sind zwar omnipräsent, aber durch den Fortschritt bei Miniaturisierung und Integration immer unauffälliger. Der Trend geht immer mehr zu optischen Komponenten aus Kunststoffen, da deren Leistungsfähigkeit immer weiter steigt und die Herstellungskosten im Vergleich zu Glaslinsen um ein Vielfaches geringer sind. Insbesondere wenn hohe Stückzahlen benötigt werden, können Kunststoffoptiken punkten, da diese vergleichsweise günstig und schnell durch Heißpräge- und Spritzgussverfahren produziert werden können. Zusätzlich ermöglichen Kunststoffoptiken technologiebedingt einen großen Freiraum an herstellbaren Geometrien. Einen wesentlichen Beitrag hierzu leisten moderne optische Komponenten wie zum Beispiel diffraktive optische Elemente (DOE), Mikrolinsenarrays (MLA), Fresnel Linsen und Freiformoptiken. Diese Komponenten besitzen komplexe Formen und Mikrostrukturen, welche aus Glas nur mit stark erhöhtem Aufwand hergestellt werden können und daher nur für High-End-Anwendungen genutzt werden können.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken und den hierfür benötigten Prozessketten. Dabei wird stets auf eine Replikation der Kunststoffoptiken mittels Spritzgießen gesetzt, insbesondere auf die Prozessvariante des Spritzprägens. Für die Herstellung solcher optischen Bauteile ist ein hohes Prozesswissen über den gesamten Herstellungsprozess hinweg notwendig. Das Prozesswissen muss erarbeitet werden und für die Replikation werden komplexe Spritzprägewerkzeuge mit aufwendigen mikrostrukturierten Werkzeugeinsätzen benötigt. Aus diesem Grund sind die Initialkosten für industrielle Anwendungen hoch. Dies stellt eine Hürde für industrielle Anwendungen dar, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen. Dies wiederum beeinträchtigt die

großflächige Verbreitung von Kunststoffoptiken in industriellen Anwendungen. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Arbeiten sollen das nötige Prozesswissen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung stellen um die Weiterentwicklung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken voranzutreiben und deren Einsatzgebiete zu verbreiten. Hierfür werden verfügbare Technologien zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen ausführlich beschrieben und deren Vor- und Nachteile benannt. Zusätzlich werden drei unterschiedliche Prozessketten zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken erarbeitet und untersucht. Dabei werden unterschiedliche optische Komponenten mit unterschiedlichen Technologien hergestellt. Die Replikation der Kunststoffoptiken wird mit dem Spritzprägeverfahren durchgeführt, welches eine schnelle und hochpräzise Herstellung der Komponenten ermöglicht. Das dabei erarbeitete Prozesswissen in den einzelnen Verfahren wird ausführlich dokumentiert und wichtige Einflussfaktoren benannt. Dadurch wird der Einsatz von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken in industrielle Anwendungen für kleine und mittelständische Unternehmen vereinfacht. Diese können von den erarbeiteten Erkenntnissen direkt profitieren. Zusätzlich wird eine Auswahlhilfe in Form eines Entscheidungsbaumes bereitgestellt, der eine schnelle Auswahl der passenden Technologie ermöglicht.

## **2 Aufbau der Arbeit**

Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau der Arbeit beschrieben, um dem Leser den roten Faden näher zu bringen und die Inhalte der einzelnen Kapitel zu erläutern.

Zu Beginn werden in Kapitel 3 die Grundlagen und der Stand der Technik im Bereich Kunststoffoptiken, Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen und Replikation mittels Spritzguss dargestellt. Folgende Punkte sollen als Erkenntnisse aus dem Kapitel gezogen werden:

- Stand der Technik bei Kunststoffoptiken sowie bestehende Einschränkungen und Optimierungspotentiale
- Verfügbare Herstellungstechnologien für optische und mikrostrukturierte Werkzeugeinsätze für den Spritzguss
- Grundlagen des Spritzgießens sowie des Spritzprägens

Im Anschluss wird in Kapitel 4 die wissenschaftliche Fragestellung erarbeitet, welche sich aus dem Stand der Technik ableitet. Folgende Zielstellungen werden in diesem Kapitel beschrieben:

- Erarbeiten von drei unterschiedlichen Prozessketten zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken
- Herstellen von drei mikrostrukturierten Werkzeugeinsätzen mit unterschiedlichen Technologien zur Herstellung von optischen Komponenten
- Prozessentwicklung von Spritzprägeprozessen zur Herstellung von mikrostrukturierten optischen Bauteilen
- Vergleich und Diskussion der erarbeiteten Prozessketten zur Ableitung allgemeiner Erkenntnisse
- Entwicklung einer Auswahlhilfe für Technologien zur Herstellung von (mikrostrukturierten) optischen Werkzeugeinsätzen

Im Anschluss an die wissenschaftliche Fragestellung soll die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken anhand von drei unterschiedlichen Prozessketten gezeigt werden. Für jede Prozesskette werden hierfür die verwendeten Methoden und erzielten Ergebnisse in einem eigenen Kapitel beschrieben. Anschließend werden direkt die Ergebnisse der jeweiligen Prozesskette diskutiert und allgemeine Erkenntnisse abgeleitet, welche für andere Anwendungen genutzt werden können.

In Kapitel 5 wird die Mikrostrukturierung mittels Ultrapräzisionsbearbeitung und die daraus resultierende Prozesskette untersucht. Als Anwendungsbeispiel dient die Herstellung eines Mikrolinsenarrays durch Spritzprägen. Das Kapitel beinhaltet folgende Schwerpunkte:

- Herstellung eines Werkzeugeinsatzes mittels Ultrapräzisionsbearbeitung, insbesondere durch Ultrapräzisions-Fräsen
- Auslegung und Design eines Spritzprägewerkzeugs zum Hauptachsenprägen mit Rahmenplatte
- Replikation von Mikrolinsenarrays mittels Spritzprägen

In Kapitel 6 wird die Mikrostrukturierung mittels Laserdirektschreiben und die daraus resultierende Prozesskette untersucht. Dabei wird ein gekrümmtes diffraktives optisches Element mittels Spritzprägen repliziert. Zur Herstellung eines Werkzeugeinsatzes wird dabei ein gekrümmter Glasmaster mittels Laserdirektschreiben strukturiert und anschließend durch eine Galvanoabformung in einen festen Werkzeugeinsatz überführt. Die folgenden Aspekte werden dabei erarbeitet:

- Herstellung eines gekrümmten Glasmasters mittels Laserdirektschreiben
- Abformung eines strukturierten gekrümmten Glasmasters durch Galvanokopieren
- Auslegung und Design eines Spritzprägewerkzeuges zum Nebenachsenprägen
- Replikation von gekrümmten diffraktiven optischen Elementen mittels Spritzprägen

In Kapitel 7 wird eine neuartige Prozesskette zur Herstellung von nanostrukturierten Kunststoffoptiken untersucht, bei der ein Werkzeugeinsatz mittels Ionenstrahlschreiben direkt strukturiert wird, wobei Strukturgrößen im Mikro- und Nanometerbereich erzeugt werden. Um die Prozesskette zu evaluieren, werden Teststrukturen zur Bestimmung der Auflösung sowie diffraktive Strukturen hergestellt und mittels Spritzprägen repliziert. Folgende Schritte werden dabei berücksichtigt:

- Direktstrukturierung eines Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben
- Auslegung und Design eines Spritzprägewerkzeuges zum Hauptachsenprägen mit Rahmenplatte
- Replikation von Mikro- und Nanostrukturen mittels Spritzprägen

In Kapitel 8 werden die drei zuvor beschriebenen Prozessketten im Gesamten diskutiert und miteinander verglichen. Dabei werden weitere allgemein ableitbare Erkenntnisse erarbeitet. Des Weiteren wird eine Auswahlhilfe für Technologien zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen vorgestellt, wobei auf die Herausforderungen beim Herstellen von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken eingegangen wird. Zusammengefasst werden die folgenden Punkte beschrieben:

- Allgemein ableitbare Erkenntnisse aus den drei erarbeiteten Prozessketten
- Entscheidungsbaum zur Auswahl von Herstellungstechnologien für optische Werkzeugeinsätze
- Herausforderungen bei der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken

In Kapitel 9 werden die Ergebnisse der Arbeit nochmals zusammengefasst. Außerdem wird ein Ausblick gegeben, in welcher Form die Arbeiten weitergeführt werden können, um das Entwicklungspotential der einzelnen Prozessketten zu erschließen.

### **3 Grundlagen und Stand der Technik**

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik im Bereich Kunststoffoptiken dargestellt. Dabei wird ein starker Fokus auf Herstellungstechnologien für optische Werkzeugeinsätze gelegt. Die Zusammenfassung der verfügbaren Technologien soll dabei einen Überblick geben und die Suche nach einem geeigneten Verfahren entsprechend der Anwendung unterstützen. Des Weiteren werden in diesem Kapitel die Grundlagen des Spritzgießens und Spritzprägen beschrieben sowie nötiges Grundwissen zu Werkzeugkonzepten erklärt. Am Ende des Kapitels wird noch eine kurze Einführung in die Materialien für den Optikspritzguss gegeben. Das gesamte Kapitel ist dabei so aufgebaut, dass das für das Verständnis der Arbeit nötige Wissen vermittelt wird. Für weiterführende Informationen sind zusätzlich Referenzen im Text angegeben, in denen detaillierte Beschreibungen der Themen nachgelesen werden können.

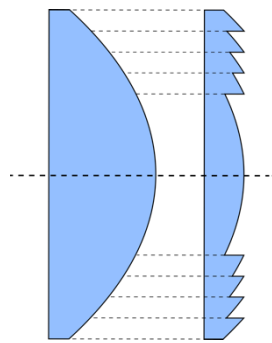
#### **3.1 Kunststoffoptiken**

Kunststoffoptiken gewinnen immer mehr an Bedeutung und konkurrieren in vielen Bereichen mit herkömmlichen Glasoptiken. Grund hierfür sind zum einen deutliche Vorteile bei den Herstellungskosten, geringeres Gewicht sowie die Möglichkeit, Halterungsstrukturen direkt am Bauteil zu integrieren. Zum anderen bieten die Herstellungsverfahren für Kunststoffoptiken technologische Vorteile, welche es ermöglichen, auch komplexe Formen wie Freiformflächen sowie mikrostrukturierte Bauteile kostengünstig herzustellen. Glasoptiken haben insbesondere die Vorteile, dass durch die homogene Materialdichte kaum Doppelbrechung entsteht und eine große Auswahl an Glasmaterialien mit breitem Spektrum an Brechungsindizes verfügbar ist.

Eine treibende Kraft bei der Entwicklung von Kunststoffoptiken stellt die Beleuchtungsindustrie dar. Der stetig wachsende Einsatz von LEDs, welche die traditionellen Glühlampen ersetzen, führt zu einer starken Nachfrage nach Kunststoffoptiken. Diese werden eingesetzt um das entstehende Licht in die gewünschte Form zu bringen. Die Beleuchtungsoptiken werden dabei in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt. Beispiele hierfür sind Indoor- und Outdoor-Beleuchtung, Automotiv-Anwendungen sowie Blitzlichter von Smartphones. Des Weiteren kann das Licht durch spezielle Kunststofflinsen so geformt werden, dass beispielsweise Logos oder Head-up-Displays für die Automobilindustrie erzeugt werden [5]. Hierbei werden oft komplexe Freiformflächen benötigt [6], welche mit konventionellen Glasoptiken nur schwer herstellbar sind. Insbesondere die Ultrapräzisionsbearbeitung bietet jedoch geeignete Lösungen für die Herstellung von Kunststoffoptiken. Auf die Herstellungsverfahren wird im nachfolgenden Kapitel detailliert eingegangen.

Ein limitierende Faktor bei Kunststoffoptiken ist der begrenzte Bereich an Brechungsindizes, welche bei optisch transparenten Materialien zur Verfügung stehen [7]. Der Brechungsindex liegt bei den transparenten Polymeren zwischen 1,49 und 1,65. Der Großteil dieser Polymere weist eine amorphe Struktur auf. Beispiele hierfür sind Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Cycloolefin Copolymer (COC) und Cycloolefin Polymer (COP). Allerdings gibt es mittlerweile auch teilkristalline Polymere auf Basis von Polyamid (PA), bei denen die kristallinen Bereiche so klein sind, dass Licht mit Wellenlängen im optischen Bereich nicht gestreut wird [8]. Um die Einschränkungen bei den Brechungsindizes zu überwinden, werden Kunststoffoptiken häufig mit Mikrostrukturen versehen, welche die Möglichkeiten im Optikdesign deutlich vergrößern. Die Herstellungsmethoden für Kunststoffoptiken bieten hierfür optimale technologische Voraussetzungen, solche mikrostrukturierten optischen Bauteile kostengünstig herzustellen. Beispiele für solche Strukturen sind Fresnellinsen, diffraktive Strukturen, Mikroprismenarrays und Mikrolinsenarrays.

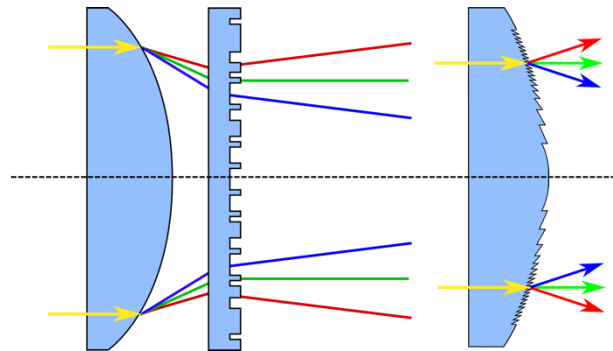
Fresnellinsen sind optische Linsen, bei denen das Volumen und die Masse reduziert werden, indem die Linse in ringförmige Stufen aufgeteilt wird. Da die Brechung des Lichtes nur von den Winkeln der gegenüberliegenden Flächen abhängig ist, kann die Dicke der Linse reduziert werden. Eine schematische Darstellung einer solchen Linse ist in Abb. 3-1 dargestellt. Fresnellinsen werden heute insbesondere dort eingesetzt, wo Gewichts- und Volumenreduktion benötigt wird und bei der Abbildungsqualität Abstriche gemacht werden können. Insbesondere bei Anwendungen zur Konzentration wie beispielsweise bei Solarzellen sind ein Einsatzgebiet für Fresnellinsen [9].



**Abb. 3-1: Schematische Darstellung einer Fresnellinse**

Ein weiteres Beispiel für mikrostrukturierte Optiken sind diffraktive Elemente (DOE). Dabei wird das Licht an diffraktiven Strukturen gebeugt, wodurch ein Lichtstrahl gezielt beeinflusst werden kann. Aus diesem Grund werden DOE häufig eingesetzt, um Abbildungsfehler zu korrigieren oder Laserstrahlen zu formen. Weitere Einsatzgebiete sind Okularlinsen [10], Head-Mounted Displays [11,12], Weltraumteleskope [13] sowie Fotokameras [14]. Dabei bietet insbesondere auch die Kombination von refraktiven und diffraktiven Flächen in einem Element neue Anwendungsmöglichkeiten sowie Optimierungspotential für vorhanden optische Systeme (siehe Abb. 3-2). Insbesondere das Einsparen von Platz und Gewicht sowie die Korrektur von Abbildungsfehlern sind dabei von großer Bedeutung. Auch wenn DOE

langsam den Weg in industrielle Anwendungen finden gibt es heute noch Einschränkungen, die die großflächige Verbreitung dieser optischen Elemente verhindern. Ein Grund hierfür ist, dass die komplette Prozesskette der Herstellung hochgenau kontrolliert werden muss, um qualitativ hochwertige optische Komponenten und Systeme zu erhalten [15]. Hierzu gehören das Optikdesign, eine Vielzahl an möglichen Herstellungsverfahren, das Testen der Komponenten sowie die Systemintegration.



**Abb. 3-2: Schematische Darstellung eines refraktiven/diffraktiven Elements**

Neben diffraktiven Optiken sind Mikrolinsenarrays ein weiteres Beispiel für mikrostrukturierte Optiken, die schon heute in vielen Anwendungen eingesetzt werden. Beispiele hierfür können im Bereich der Telekommunikation, Datenspeicherung, Strahlformung, Displays, optischen Sensoren und biomedizinischen Geräten gefunden werden [16]. Konkrete Anwendungsbeispiele sind Lichtfeldkameras [17], Mikroskope [18], Fingerabdrucksensoren [19], Hyperspektralkameras [20,21] sowie die Füllfaktorhöhung von Empfängerarrays in Bildsensoren [22]. Mikrolinsenarrays bestehen aus einer Vielzahl an kleinen Linsen, die in einem Array angeordnet sind. Dabei können die Linsen sphärisch, asphärisch oder freiförmig sein. Die Größe und Form der einzelnen Linsen sowie des gesamten Arrays ist dabei von Anwendung zu Anwendung unterschiedlich und muss für das jeweilige Optikdesign angepasst werden. Die einzelnen Mikrolinsen können dabei sowohl die gleiche Form als auch unterschiedliche Formen besitzen. Die schematische Darstellung eines Mikrolinsenarrays ist in Abb. 3-3 dargestellt. Die einzelnen Linsen fokussieren das einfallende Licht auf einen definierten Punkt, abhängig vom optischen Design.



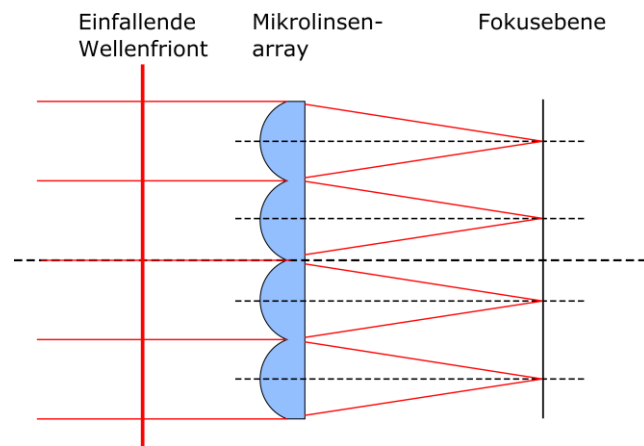


Abb. 3-3: Schematische Darstellung eines Mikrolinsenarrays

Mikrolinsenarrays können mit einer Vielzahl von Technologien hergestellt werden. Dazu gehören die Ultrapräzisionsbearbeitung [23], LIGA [16], Elektronenstrahlschreiben [24], Laserbearbeitung [25] und Erodieren [26]. All diese Verfahren werden dabei meist zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen für den Spritzguss verwendet. Die direkte Herstellung von Mikrolinsenarrays ist relativ zeitaufwendig, was die Herstellung sehr teuer macht und Anwendungen limitiert. Durch die Möglichkeit der Replikation im Spritzguss hingegen können Mikrolinsenarrays in hohen Stückzahlen kostengünstig hergestellt werden.

Weitere mikrostrukturierte Optiken sind anti-reflektierende Mikrostrukturen, Mikroprismenarrays und Mikrospiegel. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht weiter betrachtet.

### 3.2 Herstellungsverfahren für optische Werkzeugeinsätze

In diesem Abschnitt werden verschiedene Herstellungsverfahren für optische Werkzeugeinsätze beschrieben. Dadurch soll ein Überblick über verfügbare Technologien gegeben sowie deren Vorteile und Einschränkungen erläutert werden. Der Fokus liegt dabei auf der erzielbaren Formgenauigkeit und Oberflächenqualität sowie der herstellbaren Strukturgröße von Mikrostrukturen. Die Verfahren können dabei grundsätzlich in zwei Kategorien unterschieden werden: Formgebende Verfahren und Mikrostrukturierungsverfahren. Einige Verfahren können dabei auch beiden Bereichen zugeordnet werden, da sie sowohl zur Formgebung von Werkzeugeinsätzen als auch zu deren Mikrostrukturierung eingesetzt werden können. Eine Übersicht der Herstellungsverfahren ist in Tab. 3-1 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Technologien folgt in den nachfolgenden Abschnitten.

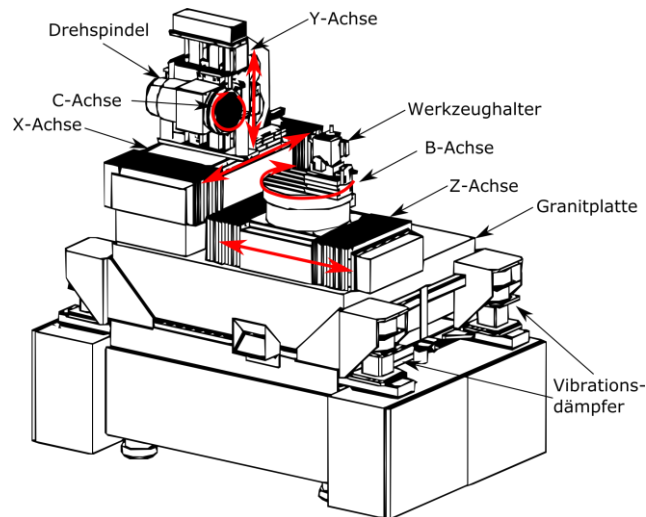
**Tab. 3-1: Übersicht über verfügbare Herstellungsverfahren für optische Werkzeugeinsätze**

Verfahren	Oberflächenqualität	Mikrostrukturierung	Vorteile	Limitationen
Ultrapräzisionsbearbeitung		5 µm [27]		Verfügbare Diamantwerkzeuge limitieren die Größe und Form von Mikrostrukturen
- Ultrapräzisionsdrehen	<5 nm [28]	5 µm [27]	Sehr hohe Formgenauigkeit und Oberflächenqualität	Limitiert auf symmetrische Bauteile und nicht-eisenhaltige Materialien
> Slow Tool Servo (STS)	<10 nm [29]	5 µm [27]	Herstellung von asymmetrischen Formen	Herstellbare Geometrien sind eingeschränkt durch die langsame Z-Bewegung
> Fast Tool Servo (FTS)	< 10 nm [30]	5 µm [31]	Herstellung von asymmetrischen Formen, schnelle und präzise Positionierung des Diamantwerkzeuges	Geometrie muss innerhalb des FTS-Hubs sein
- Ultrapräzisionsfräsen	<10 nm [32]	50 µm Exp. Daten	Herstellung von Freiformflächen	Lange Bearbeitungszeit, insbesondere wenn hohe Oberflächenqualitäten gefordert sind
- Fly-Cutting	<10 nm [33]	5 µm [27]	Herstellung von komplexen Mikrostrukturen wie Prismen und Pyramiden	Beschränkt auf flache Substrate
- Ultrapräzisionsbearbeitung von Stahl	<10 nm [34]	5 µm [35]	Bearbeitung von eisenhaltigen Materialien mit hoher Präzision	Verschleiß des Diamantwerkzeuges problematisch
Erodieren	<0,1 µm [36]	< 10 µm [37]	Hohe Materialabtragsrate	Limitiert auf elektrisch leitfähige Materialien, unzureichende Oberflächenqualität für optische Anwendungen
Elektrochemisches Abtragen	30 nm [38]	Kann nicht zur Mikrostrukturierung verwendet werden	Kein Verschleiß, hohe Materialabtragsrate auch in sehr harten Materialien	Limitiert auf elektrisch leitfähige Materialien, Elektrodenherstellung kann komplex und aufwendig sein
Laserbearbeitung	< 1 µm [39]	< 1 µm [40]	Keine Einschränkungen im Substratmaterial	Resultierende Oberflächenqualität nicht ausreichend für optische Anwendungen
LIGA	<10 nm [16]	< 1 µm [41]	Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis, große Variationsmöglichkeiten in der Geometrie der Mikrostrukturen	Limitiert auf flache Substrate, aufwendig und teuer, wenn mehrere Lithographieprozesse notwendig sind
Laserdirekt schreiben	25 nm [42]	1-3 µm Exp. Daten	Ermöglicht Strukturierung von gekrümmten Oberflächen, Herstellung von kontinuierlichen Strukturen	Limitiert auf Strukturierung von Fotolack
Elektronenstrahlschreiben	0,2 µm [43]	< 100 nm [44]	Keine Einschränkungen im Substratmaterial	Limitiert auf kleine Flächen durch lange Bearbeitungszeit
Ionenstrahlschreiben	<1 nm [45]	< 10 nm [46]	Keine Einschränkungen im Substratmaterial solange nicht magnetisch, Herstellen von feinsten Nanostrukturen möglich	Limitiert auf kleine Flächen durch lange Bearbeitungszeit
Nanoimprint-Lithographie	-	< 10 nm [47]	Herstellung und Replikation von sehr kleinen Strukturen, hoher Durchsatz möglich	Qualität stark vom Masterwerkzeug abhängig
Polieren/Läppen	< 1 nm [48]	Kann nicht zur Mikrostrukturierung verwendet werden	Sehr hohe Oberflächenqualität	Eingeschränkte Formgenauigkeit, insbesondere bei Freiformflächen

### **3.2.1 Ultrapräzisionsbearbeitung**

Die Ultrapräzisionsbearbeitung (engl. ultra-precision machining) ist die gebräuchlichste Methode zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen. Die verwendeten Anlagen erreichen dabei eine Positioniergenauigkeit im Nanometerbereich, wodurch herausragenden Oberflächenqualitäten und Formgenauigkeiten erreicht werden können [49]. Für die Ultrapräzisionsbearbeitung werden in den meisten Fällen Diamantwerkzeuge verwendet. Diese bieten durch ihre einzigartigen Materialeigenschaften (v.a. hohe Härte) die Möglichkeit, hochgenaue Werkzeugeinsätze herzustellen. Insbesondere die Möglichkeit, hochgenaue, definierte Schneiden herzustellen sowie sehr kleine Schneideradien von weniger als 50 nm [50] zu erzeugen, stellt eine wichtige Voraussetzung für die Ultrapräzisionsbearbeitung dar. Die Oberflächenqualität von diamantbearbeiteten Bauteilen beträgt meist  $R_a < 10$  nm [51], wobei  $R_a$  der mittlere Rauheit gemäß des arithmetischen Mittels entspricht. Daher können durch Ultrapräzisionsbearbeitung direkt optische Werkzeugoberflächen erzeugt werden, ohne einen zusätzlichen Nachbearbeitungsschritt.

Um diese hohe Qualität zu erreichen, müssen die Maschinenkomponenten an ihr Limit gebracht werden. Ultrapräzisionsanlagen sind meist auf einem massiven Granitblock aufgebaut. Zusätzlich werden hochpräzise Positioniersysteme, Hochfrequenzspindeln sowie hochgenaue Fixiersysteme verwendet [52]. Die Achsen sind dabei meist ölgelagert, um die geforderte Positionsgenauigkeit und Steifigkeit zu erreichen. Die Positionierung wird dabei über Glasmaßstäbe sichergestellt, welche eine Auflösung im Sub-Nanometerbereich besitzen. Da die Temperatur einen starken Einfluss auf die Prozesse hat, werden Ultrapräzisionsanlagen meist in temperaturkontrollierter Umgebung aufgestellt und besitzen zusätzlich eine eigenständige Klimatisierung der Bearbeitungskammer, welche eine konstante Temperaturregelung von  $\pm 0,1$  K und besser ermöglicht. Die schematische Darstellung einer Ultrapräzisionsanlage mit den wichtigsten Komponenten sowie der Bezeichnung der Achsen ist in Abb. 3-4 dargestellt.



**Abb. 3-4: Schematische Darstellung einer Ultrapräzisionsanlage mit den wichtigsten Komponenten und Bezeichnung der Achsen (vgl. [53])**

Bei der mechanischen Bearbeitung im Mikrometerbereich ändern sich die Bearbeitungseigenschaften signifikant. Einflussfaktoren, die bei konventioneller Bearbeitung einen vernachlässigbaren Einfluss besitzen, werden dominant, wenn die abzutragende Spangröße reduziert wird. Wichtige Faktoren, welche die erzielbare Oberflächenqualität und Formgenauigkeit beeinflussen, sind die Bearbeitungsbedingungen [54], Vibrationen [54–56], Materialeigenschaften [57–60] und Spindelvibrationen [61]. Das Verständnis und die Beherrschung dieser Effekte und Einflussfaktoren sowie deren Auswirkung auf den Prozess sind von grundlegender Bedeutung für die Ultrapräzisionsbearbeitung.

Ein weiterer entscheidender Faktor für die resultierende Qualität des Bauteils ist die Qualität der Diamantwerkzeuge. Insbesondere die Form der Schneide muss exakt bekannt sein, um diese beim Verfahrenweg beachten zu können. Nur so können Oberflächenqualitäten mit optischer Güte und hoher Formgenauigkeit erreicht werden. Für die Schneiden werden daher meist monokristalline Diamanten verwendet, bei denen die Schneide präzise eingeschliffen wird. Da die Diamantschneiden mit sehr kleinen Schneidenradien ( $< 50$  nm) hergestellt werden können, ist der Einfluss der Schneidegeschwindigkeit auf die Oberfläche sehr gering im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung [62], da durch die scharfen Kanten weniger Schneidekraft benötigt wird. Allerdings bringt die Verwendung von Diamantwerkzeugen auch einen entscheidenden Nachteil mit sich. Diamantwerkzeuge können unter Standard-Prozessbedingungen nur in nicht-eisenhaltigen Materialien verwendet werden. Der Kohlenstoff des Diamanten reagiert stark mit Eisen, wodurch sich die Diamantschneide bei der Bearbeitung durch Diffusion auflöst. Aus diesem Grund werden entweder nicht-eisenhaltige Materialien oder spezielle Bearbeitungsprozesse wie Ultraschall-Diamantbearbeitung verwendet. Die Bearbeitung von eisenhaltigen Materialien, insbesondere Stahl, wird in den folgenden Abschnitten noch genauer erklärt. Als alternative zu Stahl haben sich Nickel-Phosphor-Beschichtungen als Standardmaterial entwickelt, welche auch als Werkzeugeinsätze in Spritzgussprozessen verwendet werden können. Die Verwendung von Beschichtungen

macht den Herstellungsprozess von Diamant-bearbeiteten Werkzeugeinsätzen jedoch aufwendig und zeitintensiv. Daher sind solche Werkzeugeinsätze für den Polymeroptikspritzguss sehr teuer. Die Ultrapräzisionsbearbeitung kann allerdings nicht nur zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen verwendet werden, sondern es können auch direkt Kunststoff- und Metalloptiken hergestellt werden. Dies wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Prozessvarianten der Ultrapräzisionsbearbeitung beschrieben, wobei auf die erzielbare Oberflächenqualität und Formgenauigkeit eingegangen wird. Eine Übersicht über die verschiedenen Bearbeitungsvarianten der Ultrapräzisionsbearbeitung ist in Abb. 3-5 schematisch dargestellt.

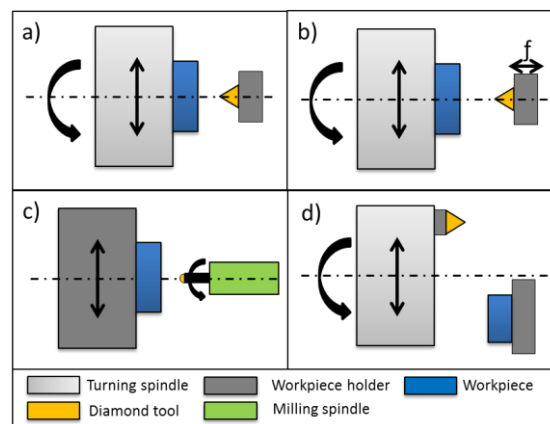


Abb. 3-5: Prozessvarianten der Ultrapräzisionsbearbeitung a) UP-Drehen, b) Slow-Tool oder Fast-Tool Drehen, c) UP-Fräsen und d) Fly-Cutting [63]

### 3.2.1.1 Ultrapräzisionsdrehen

Ultrapräzisionsdrehen (UP-Drehen) wird eingesetzt, wenn rotationssymmetrische Werkzeugeinsätze mit hoher Oberflächenqualität ( $R_a < 10 \text{ nm}$ ) und Formgenauigkeit hergestellt werden müssen [28]. Beim UP-Drehen wird das Werkstück auf eine Rotationsspindel aufgespannt (meist über ein Vakuumspannsystem) und mit definierter Geschwindigkeit rotiert. Zum Materialabtrag wird ein Diamantwerkzeug mit dem Werkstück in Kontakt gebracht und horizontal verfahren. Die Ausrichtung des Werkstückes zur Rotationsachse sowie die Positionierung zum Diamantwerkzeug ist von entscheidender Bedeutung für die erzielbare Formgenauigkeit. Herstellbare Geometrien sind aufgrund der Maschinenanordnung limitiert. UP-Drehen wird hauptsächlich zur Herstellung von sphärischen und asphärischen Formen verwendet. Allerdings können auch Fresnel- und diffraktive Strukturen hergestellt werden [64,65]. Dabei ist die erzielbare Strukturgröße hauptsächlich von der Verfügbarkeit der Diamantwerkzeuge abhängig, welche einen minimalen Werkzeugradius von ca.  $5 \mu\text{m}$  besitzen können [27]. Die Qualität der Bauteile ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Die wichtigsten Faktoren sind die Spindeldrehzahl, der Werkzeugradius und der Vorschub. Allgemein kann gesagt werden, dass hohe Spindeldrehzahlen, große Werkzeugradien und geringer Vorschub die höchste Oberflächenqualität liefert [54]. Die Spindeldrehzahl ist Maschinenbedingt meist auf 5000-6000 1/min limitiert. In Abb. 3-6 ist beispielhaft ein Werkzeugeinsatz

mit asphärischer Fläche dargestellt, welcher mittels UP-Drehen hergestellt wurde. Die gemessene Oberflächenqualität beträgt  $R_a = 6 \text{ nm}$ .



Abb. 3-6: Diamantgedrehter Werkzeugeinsatz mit asphärischer Form ( $R_a = 6 \text{ nm}$ )

Um die Geometrieinschränkungen des UP-Drehens zu überwinden, gibt es zwei Prozessvarianten, welche als Slow-Tool Servo (STS) und Fast-Tool Servo (FTS) bezeichnet werden. Dabei wird der klassische Drehprozess um eine zusätzliche Bewegung des Diamantwerkzeuges in Z-Richtung erweitert. Das Werkzeug oszilliert in Z-Richtung, wodurch der Schneidprozess teilweise unterbrochen wird. Dadurch können auch nicht-rotationssymmetrische Formen erzeugt werden. Beim STS wird für die Z-Bewegung die Z-Achse der Ultrapräzisionsanlage verwendet. Diese ermöglicht allerdings nur langsame Bewegungen, wodurch auch der Name des Prozesses zustande kommt. Die Oszillation findet dabei in einem Bereich von bis zu  $> 20 \text{ mm}$  statt. Für die Durchführung des Prozesses ist neben der Z-Bewegung des Werkzeuges auch eine kodierte C-Achse Voraussetzung. Die C-Achse bestimmt die Rotation des Werkstückes und muss exakt kontrolliert werden, wenn nicht rotationssymmetrische Formen erzeugt werden sollen. Die Position des Werkstückes wird dabei exakt mit der Werkzeugposition koordiniert [66]. Daher ist die Rotationsgeschwindigkeit der Spindel meist geringer als bei einem regulären UP-Drehprozess. Im Vergleich zu einem FTS Prozess oder UP-Drehprozess ist die Bearbeitungszeit höher, da die Z-Achse schwer und langsam ist, wodurch nur begrenzte Geschwindigkeiten verwendet werden können. Die resultierende Oberflächenqualität beträgt  $R_a < 10 \text{ nm}$  [29]. Anwendung findet der STS-Prozess insbesondere bei der Herstellung von Werkzeugeinsätzen für Freiformoptiken [67,68] und nicht-achssymmetrischen Asphären [69]. Neben nicht-rotationssymmetrischen Grundformen können mit dem STS-Verfahren auch Mikrostrukturen erzeugt werden, indem mit der Werkzeugspitze feine Strukturen in das Material eingebracht werden. Ebenso wie beim UP-Drehen, ist die erzielbare Strukturgröße durch die verfügbaren Diamantwerkzeuge limitiert. Beispiele für Mikrostrukturen, die mittels STS in Werkzeugeinsätzen erzeugt werden können, sind Mikrolinsenarrays [70], Prismenarrays [71], diffraktive Optiken [29] und Facettenaugen-Strukturen [72].

Im Gegensatz zum STS-Verfahren wird beim FTS-Prozess nicht die Z-Achse zur Erzeugung der Z-Bewegung verwendet, sondern ein zusätzlicher Aktuator, welcher eine schnelle oszillierende Bewegung des Diamantwerkzeuges ermöglicht. Dieser Aktuator muss zusätzlich in der Ultrapräzisionsanlage installiert werden. Das FTS-System ermöglicht eine hochgenaue Positionierung des Diamantwerkzeuges, allerdings ist die Amplitude der Z-Bewegung deutlich geringer als beim STS-Verfahren und kann zwischen einigen Mikrometern und einigen hundert Mikrometern liegen. Einige FTS-Systeme sind entweder für sehr kleine Bewegungen von  $< 1 \mu\text{m}$  oder größere Bewegungen bis zu 1 mm optimiert [73,74]. Für den FTS-Prozess wird die Position der C-Achse an den das FTS-System übermittelt, wodurch die Werkzeugposition exakt koordiniert und eingestellt werden kann. Der Prozess wird hauptsächlich für die Herstellung von mikrostrukturierten Elementen eingesetzt. Beispiele hierfür sind Mikrolinsenarrays, Mikroprismenarrays und torische Linsen [6]. Außerdem können mit dem FTS-Prozess auch diffraktive Optiken hergestellt werden [74]. Die erzielbare Oberflächenqualität beträgt  $R_a < 10 \text{ nm}$  [30].

### **3.2.1.2 Ultrapräzisionsfräsen**

Beim Ultrapräzisionsfräsen (UP-Fräsen) wird eine Frässpindel zur Erzeugung einer Rotationsbewegung verwendet. Im Gegensatz zum Drehprozess bewegt sich dabei das Werkstück nicht. Die Drehzahlen können bis zu 100.000 1/min und mehr betragen. Für das UP-Fräsen werden in den meisten Fällen luftgelagerte Spindeln verwendet, da diese bei hohen Drehzahlen eine hohe Steifigkeit sowie eine geringe Wärmeentwicklung ermöglichen. Die Diamantwerkzeuge zum UP-Fräsen besitzen einen definierten Radius und nur eine Schneide. Für die Positionierung des Werkzeuges werden drei oder mehr Achsen verwendet. Im Vergleich zum UP-Drehen ist die Bearbeitungszeit deutlich höher, da die Materialabtragsrate äußerst gering ist, jedoch bietet das Verfahren eine große Freiheit in Bezug auf die herzustellenden Geometrien. Ebenso wie beim UP-Drehen ist die Qualität des Diamantfräasers ein entscheidender Faktor für die erreichbare Formgenauigkeit und Oberflächenqualität. Der UP-Prozess wird häufig zum Herstellen von Mikrolinsenarrays verwendet [75] oder zum Erzeugen von Freiformflächen [6]. Die resultierende Oberfläche ist dabei stark von den Prozessparametern abhängig, insbesondere von der Überlappung der Fräsbahnen. Eine Oberflächenqualität von  $R_a < 50 \text{ nm}$  ist problemlos möglich [76]. In eigenen Experimenten konnten auch Oberflächenqualitäten von  $R_a < 10 \text{ nm}$  erzielt werden [77]. Allerdings kann die Bearbeitungszeit dann signifikant verlängert werden.

### **3.2.1.3 Fly-Cutting**

Ebenso wie beim Diamantfräsen rotiert beim Fly-Cutting das Diamantwerkzeug. Im Gegensatz zum UP-Fräsen befindet sich die Diamantschneide allerdings nicht auf der Rotationsachse. Dadurch entsteht ein großer Rotationsradius der Diamantschneide, wodurch große Flächen schnell und präzise bearbeitet werden können. Aus diesem Grund wird das Verfahren häufig eingesetzt, um große Planflächen mit optischer Qualität zu erzeugen bzw. als Vorbear-

beitung für eine anschließende Fräsbearbeitung. Durch die nicht-zentrierte Anordnung des Diamanten ist die Schneide nicht durchgehend mit dem Material in Kontakt. Der Fly-Cutting Prozess kann aber auch zum Erzeugen von Freiformflächen [78] oder zur Mikrostrukturierung von Oberflächen verwendet werden. Beispiele hierfür sind Fresnellinsen [79], Mikropyramidenarrays [80] und diffraktive Strukturen [81]. Die Erreichbare Formgenauigkeit liegt im Sub-Mikrometerbereich und eine Oberflächenqualität im Nanometerbereich kann erzeugt werden [33].

#### **3.2.1.4 Ultrapräzisionsbearbeitung von Stahl**

Wie bereits beschrieben können Diamantwerkzeuge in Standard-Ultrapräzisionsprozessen zur Bearbeitung von Stählen nur unter sehr starkem Verschleiß eingesetzt und daher keine guten Ergebnisse erzielt werden. Allerdings besitzt die direkte Bearbeitung von Stahl eine hohe Nachfrage für verschiedenen Anwendungen. Die direkte Bearbeitung von Stahl ermöglicht die Herstellung von Werkzeugeinsätzen ohne zusätzlichen Beschichtungsprozess. Daher werden in diesem Abschnitt einige Ansätze beschrieben, die eingesetzt werden, um die Stahlbearbeitung mittels Ultrapräzisionsbearbeitung zu ermöglichen. Eine ausführliche Zusammenfassung dieser Methoden kann in der Literatur gefunden werden [82].

Die am häufigsten verwendete Methode zu Bearbeitung von Stahl mittels Ultrapräzisionsbearbeitung ist die Ultraschallbearbeitung mit Diamantwerkzeugen [35]. Hierfür wird das Diamantwerkzeug meist in einer elliptischen Bewegung hochfrequent bewegt. Dadurch wird der Kontakt der Diamantschneide mit der Materialoberfläche deutlich reduziert, wodurch der Verschleiß signifikant verringert werden kann [83,84]. Für die Ultraschallbearbeitung muss die Ultrapräzisionsanlage mit einem piezoelektrischen Ultraschallsystem ausgestattet werden, welches die oszillierende Bewegung des Werkzeuges steuert. Für die Berechnung der Verfahrensbahn muss allerdings keine Anpassung vorgenommen werden, da das Ultraschallsystem die Werkzeugspitze immer wieder an die gleiche Position führt. Der Verfahrensweg wird also rein über die Achsen der Ultrapräzisionsanlage gesteuert. Das System kann dabei in einem Drehprozess sowie in einem reinen X/Y/Z-Aufbau verwendet werden. Die Ultraschallbearbeitung kann somit zur Herstellung von einfachen rotationssymmetrischen Formen verwendet werden, allerdings auch zur Herstellung von Freiformflächen und zur Mikrostrukturierung wie zum Beispiel zur Erzeugung von V-Gräben oder Mikropyramiden [85,86]. Dabei können Oberflächenqualitäten von  $R_a < 10$  nm erreicht werden.

Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung von binderlosen cBN-Werkzeugen (engl. cubic boron nitride, kubisches Bornitrid). Dieses extrem harte Material wird in einem Sinterprozess hergestellt und kann vergleichbar mit Diamantwerkzeugen hochgenau eingeschliffen werden. Binderloses cBN weist eine hohe chemische Beständigkeit auf und ist das zweithärteste Material nach Diamant [87]. Das Material benötigt hierfür sehr kleine Korngrößen, um gute Oberflächenqualitäten zu erzeugen. In der Literatur wird berichtet, dass bei der Bearbeitung von Stahl mit einer Härte von 52 HRC [88] Oberflächenqualitäten von  $R_a < 10$  nm



erzielt werden können. Die Verwendung von cBN ist in der Industrie bereits weit verbreitet, binderloses cBN hingegen befindet sich noch in einem Forschungsstadium. Die Verfügbarkeit der Werkzeuge ist aktuell nur sehr begrenzt, sodass Werkzeuge nur in kleiner Stückzahl beschafft werden können. Des Weiteren ist das Material aktuell nur in Form von Drehwerkzeugen (Schneidwendeplatten) verfügbar. Zwar kann durch die Verwendung von binderlosem cBN der Verschleiß reduziert werden, allerdings ist der aktuelle Stand der Forschung noch weit von vergleichbaren Ergebnissen entfernt, die bei der Diamantbearbeitung in NiP erzielt werden können. Eine REM-Aufnahme (Rasterelektronenmikroskop) eines binderlosen cBN-Werkzeuges ist in Abb. 3-7 gezeigt.

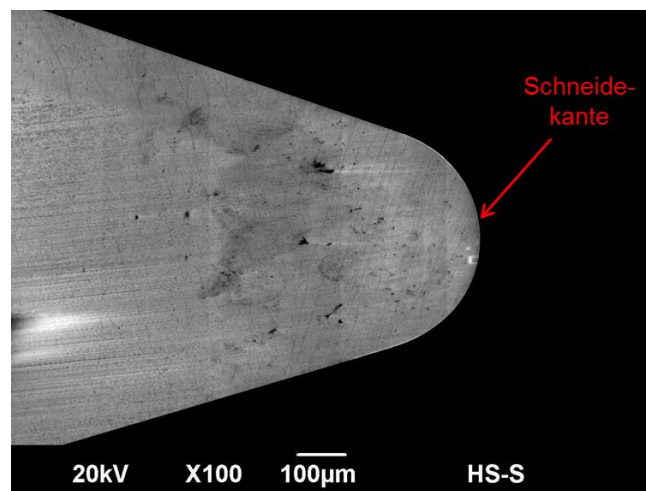


Abb. 3-7: REM-Aufnahme einer binderlosen cBN-Schneide [63]

Neben den beiden vorgestellten Möglichkeiten zur Ultrapräzisionsbearbeitung von Stahl gibt es weitere Forschungsansätze. Ein Ansatz ist die Optimierung der Prozessbedingungen, um den Verschleiß zu reduzieren. Beispiele hierfür sind die Bearbeitung in kryogenen Bedingungen [89] oder unter Methan-Atmosphäre [90]. Ein weiterer Ansatz ist die Modifikation von Diamantwerkzeugen mit Beschichtungen. Beispiele hierfür sind Titannitrid und Titancarbid [91]. Die beschriebenen Ansätze befinden sich allerdings noch in einem frühen Forschungsstadium und liefern bisher keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Zwar kann der Verschleiß der Diamantschneide teilweise reduziert, jedoch nicht vollständig verhindert werden, wodurch keine ausreichende Oberflächenqualität erzielt werden kann.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass eine direkte Bearbeitung von Stahl mit Diamantwerkzeugen mit allen beschriebenen Methoden noch nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt. Nach wie vor stellt die NiP-Beschichtung und anschließende UP-Bearbeitung die beste Lösung dar, wenn hochgenaue Werkzeugeinsätze mit optischer Qualität benötigt werden.

### 3.2.2 Erodieren

Erodieren (engl. electric discharge machining, EDM) ist ein thermo-elektrischer Prozess, bei dem mittels einer elektrischen Entladung durch Funkenbildung ein Materialabtrag erzeugt wird [92]. Die Entladung findet dabei zwischen der Arbeitselektrode und dem Bauteil statt. Die Elektrode bildet die Negativ-Form des gewünschten Bauteils ab. Daher ist die Qualität der Elektrode von entscheidender Bedeutung für die resultierende Form. Formabweichungen in der Elektrode können später im EDM-Prozess nicht mehr korrigiert werden. Der Prozess kann ausschließlich an elektrisch leitfähigen Materialien angewendet werden und wird in einem dielektrischen Medium durchgeführt.

Es gibt eine Vielzahl an Prozessvarianten bei der EDM-Technologie, welche ausführlich in der Literatur beschrieben sind [36]. Die Anwendung von EDM zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen befindet sich allerdings noch in einem Forschungsstadium. Erste Untersuchungen wurden angestellt, um mit dem EDM-Verfahren Werkzeugeinsätze mit Mikrolinsen herzustellen, wie in Abb. 3-8 dargestellt [26]. Dabei wird eine kugelförmige Elektrode verwendet, um die Mikrolinsen in einen Werkzeugeinsatz aus Stahl einzubringen. Der Ansatz wird auch um ein Elektrodenarray erweitert, bei dem insgesamt neun kugelförmige Elektroden zur Herstellung eines Mikrolinsenarrays verwendet werden [93]. Die erzielte Formgenauigkeit lag bei  $10\ \mu\text{m}$  mit einer Oberflächenrauheit von  $0,85\ \mu\text{m}$ . Diese Ergebnisse sind für optische Anwendungen noch nicht ausreichend und müssen deutlich optimiert werden. Es gibt allerdings auch Veröffentlichungen, bei denen die erzielte Oberflächenqualität mit dem EDM-Verfahren  $R_a < 0,3\ \mu\text{m}$  betrug, allerdings wurden dabei keine optischen Anwendungen verfolgt [36,94]. Dennoch ist die erzielbare Oberflächenqualität bisher nicht ausreichend für optische Anwendungen, wodurch ein zusätzlicher Nachbearbeitungsschritt Voraussetzung wäre. Der große Vorteil der EDM-Technologie ist die Tatsache, dass Materialien unabhängig von ihrer Härte bearbeitet werden können. Dies ermöglicht die Bearbeitung von gehärtetem Stahl. Für die Verwendung zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen muss der Prozess jedoch noch weiter optimiert werden, um die erzielbare Oberflächenqualität und Formgenauigkeit zu verbessern.

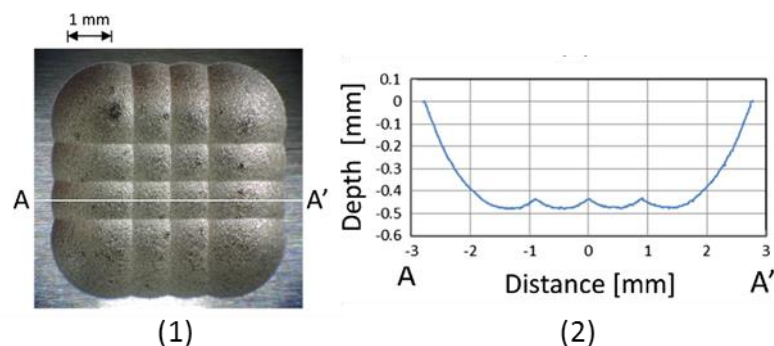


Abb. 3-8: Mittels EDM hergestelltes Mikrolinsenarray in Stahl, (1) Mikroskopaufnahme der Oberfläche, (2) Profilschnitt entlang AA' [26]

### 3.2.3 Elektrochemisches Abtragen

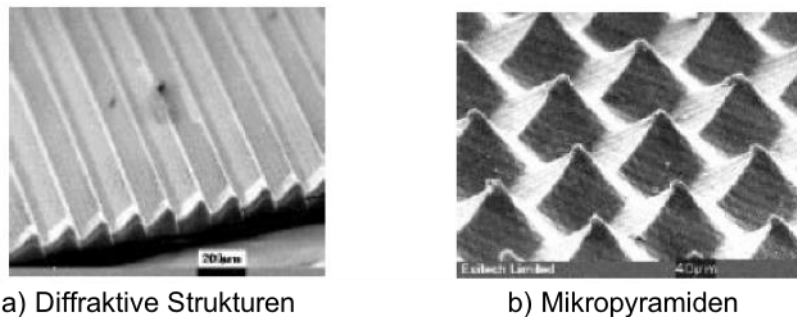
Elektrochemisches Abtragen (engl. electrochemical machining, ECM) nutzt die anodische Auflösung eines Metalls in einem Elektrolyt zum Abtragen und Formgeben in einem Material [95]. Das Bauteil muss hierzu elektrisch leitfähig sein. Das ECM-Verfahren bietet einige Vorteile gegenüber konventionellen Bearbeitungsmethoden, da das Verfahren nicht von der Materialhärte abhängt und eine hohe Materialabtragsrate, kein Verschleiß und glatte Oberflächen erzielt werden können [95]. Vergleichbar mit dem EDM-Prozess wird beim ECM-Verfahren eine vorgefertigte Elektrode verwendet, um die entsprechende Form zu generieren. Das Verfahren kann auch als Nachbehandlungsprozess von konventionell bearbeiteten Werkzeugeinsätzen verwendet werden, um ggf. die Oberflächenqualität zu verbessern und Grate zu entfernen. Der Prozess wird dann auch als Elektropolieren bezeichnet. Die erzielbare Oberflächenqualität ist stark von den Prozessparametern, dem zu bearbeitenden Material sowie dem Elektrolyt abhängig und kann optische Qualität erreichen [96]. Die erzielbare Oberflächenqualität kann dabei  $R_a = 30\text{-}60\text{ nm}$  betragen bei einer Formgenauigkeit von bis zu  $5\text{ }\mu\text{m}$  [38,97]. Die Anwendung von ECM für optische Anwendungen befindet sich allerdings noch in einem Forschungsstadium. Das häufigste Einsatzgebiet für ECM ist derzeit das Entfernen von Graten und die Nachbearbeitung von konventionell hergestellten Werkzeugeinsätzen.

### 3.2.4 Laserbearbeitung

Die Verwendung von kurzen- und ultrakurzen Laserpulsen zur Bearbeitung von Werkstoffen ist eine Technologie, welche in einer Vielzahl von Mikrobearbeitungsanwendungen eingesetzt wird. Ein Einsatzgebiet ist dabei die Herstellung von mikrostrukturierten Werkzeugeinsätzen [98,99]. Im Gegensatz zum Laserdirektschreiben (engl. laser direct writing, LDW), welches in Kapitel 3.2.6 beschrieben ist, wird bei der Laserbearbeitung ein Laserstrahl mit höherer Energie verwendet, wodurch ein direkter Materialabtrag erzielt wird. Der Prozess kann dabei in fast allen Materialien verwendet werden [100]. Durch die Verwendung von energiereichen, aber kurzen bis sehr kurzen Laserpulsen kann ein hochgenauer Materialabtrag erzielt werden. Die Pulslänge kann dabei einige Nanosekunden bis wenige Femtosekunden betragen. Beispiele für verwendete Laserquellen sind Excimer-,  $\text{CO}_2$ - oder Nd:YAG-Laser.

Die resultierende Qualität der Strukturen und der Oberfläche bei der Laserbearbeitung ist stark von der Kombination aus Laserquelle, Substratmaterial und Prozessparametern abhängig. Wenn die Parameter optimiert worden sind, können Oberflächenqualitäten von  $R_a < 1\text{ }\mu\text{m}$  erzeugt werden [39]. Dies ist allerdings noch nicht ausreichend für optische Anwendungen, wodurch eine Nachbearbeitung notwendig ist. Allerdings kann das Verfahren verwendet werden, um mikrostrukturierte Werkzeugeinsätze herzustellen. Der Laserimpuls stellt einen gut definierten Energieeintrag in das Material dar, wodurch komplexe Strukturen in Werkzeugeinsätzen erzeugt werden können. Beispiele hierfür sind kontinuierliche diffraktive Strukturen und Mikropyramiden wie in Abb. 3-9 dargestellt [101]. Strukturgrößen bis zu  $10\text{ }\mu\text{m}$  können erreicht werden [102]. Die erreichbare Strukturgröße ist stark von der Spot-

Größe des Laserstrahls sowie der Pulslänge abhängig. Mit reduzierter Pulslänge und Spotgröße steigt zwar das Auflösungsvermögen, allerdings nimmt auch die Bearbeitungszeit zu.



**Abb. 3-9: Mikrostrukturen hergestellt mittels Laserbearbeitung, a) diffraktive Strukturen und b) Mikropyramiden [101]**

### 3.2.5 LIGA

Das LIGA-Verfahren beschreibt eine Prozesskette, die aus Lithographie, Galvanik und Abformung besteht, woher auch der Name abgeleitet ist. Das LIGA-Verfahren ist weit verbreitet und wird häufig zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen verwendet [103,104]. Das Verfahren wird dabei hauptsächlich zur Herstellung von mikrostrukturierten Werkzeugeinsätzen genutzt. Mit dem LIGA-Prozess können Strukturen mit großem Aspektverhältnis hergestellt werden [105]. Die Strukturen können dabei auch deutlich kleiner als 1 µm sein [40]. Wie bereits erwähnt beschreibt das LIGA-Verfahren eine Prozesskette aus drei Schritten. Der erste Schritt ist ein Lithographieprozess, der zur Strukturierung eines Substrates verwendet wird. Das verwendete Verfahren ist dabei nicht strikt definiert. Anschließend werden die Substrate in einem Galvanikprozess in eine feste Nickelform überführt. Dieser Prozess wird ausführlich im Kapitel 6.2.2 beschrieben. Im letzten Prozessschritt wird der durch den Galvanikprozess erzeugte Werkzeugeinsatz verwendet, um die Mikrostrukturen mittels Spritzgießen oder Heißprägen in Kunststoff zu replizieren. Eine ausführliche Beschreibung der Prozesskette ist in der Literatur zu finden [106]. Die Hauptanwendung des LIGA-Verfahrens für optische Komponenten ist die Herstellung von diffraktiven optischen Elementen [107–111]. Allerdings wird die Herstellung von diffraktiven Elementen mittels LIGA äußerst aufwendig und teuer, wenn das DOE-Level, d.h. die Anzahl der Stufen in der diffraktiven Struktur, höher als vier ist, da der Lithographieprozess dadurch sehr komplex wird und in vielen Stufen durchgeführt werden muss [109]. Ein modifizierter LIGA-Prozess kann jedoch auch verwendet werden, um andere mikrostrukturierten Kunststoffoptiken herzustellen. Insbesondere Mikrolinsenarrays können hergestellt werden, wobei eine extrem gute Oberflächenqualität von  $R_a = 1$  nm erzielt werden kann [16]. Ein mittels LIGA hergestellter Werkzeugeinsatz mit Mikrolinsen ist in Abb. 3-10 dargestellt. Weitere Mikrostrukturen, welche mittels LIGA hergestellt werden können, sind Mikroprismen [112], Mikrospiegel [113] und Wellenleiter [114].

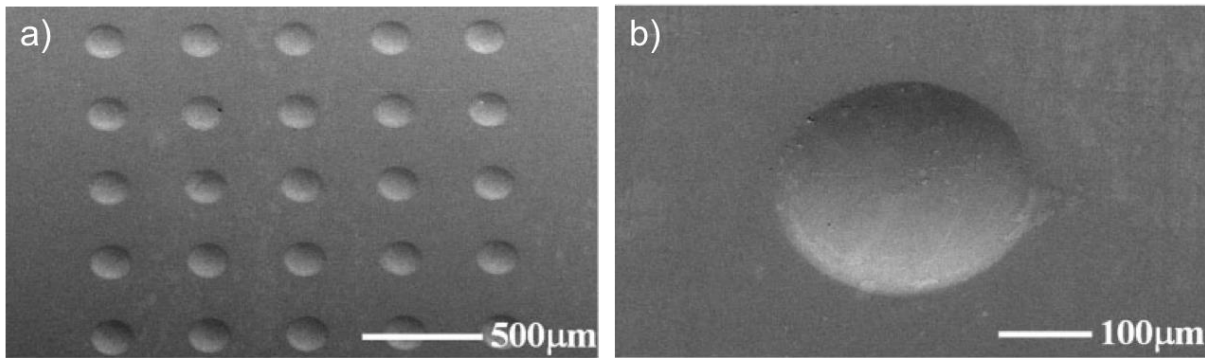


Abb. 3-10: a) REM-Aufnahme eines Werkzeugeinsatzes mit Mikrolinsenarray, hergestellt mit dem LIGA-Verfahren, b) Nahaufnahme einer einzelnen Mikrolinse mittels REM [109]

### 3.2.6 Laserdirektschreiben

Das Laserdirektschreiben (engl. laser direct writing, LDW) ist ein Verfahren, bei dem ein Laserstrahl zur Strukturierung eines Fotolacks verwendet wird. Das Verfahren darf daher nicht mit einer klassischen Laserbearbeitung, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, verwechselt werden, bei der durch den Laser ein direkter Materialabtrag erzeugt wird. Für den LDW-Prozess wird ein Substrat mit einem Fotolack beschichtet (meist über Spincoating), welcher anschließend mittels LDW strukturiert wird. Dabei wird ein Laserstrahl in einer scannenden Bewegung über das Substrat bewegt und die Intensität des Lasers simultan moduliert [115]. Anschließend muss der Fotolack entwickelt werden. Zur Herstellung eines festen Werkzeugeinsatzes, muss das strukturierte Substrat mittels Galvanokopieren abgeformt werden, wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Das mittels LDW strukturierte Substrat stellt also nur eine Masterform dar [116]. Eine ausführliche Beschreibung des Prozesses kann in der Literatur gefunden werden [117]. In Abb. 3-11 ist beispielhaft ein Werkzeugeinsatz dargestellt, der auf Basis eines LDW strukturierten Masters hergestellt wurde. Mit dem LDW-Prozess können binäre und kontinuierliche Strukturen hergestellt werden. Der LDW-Prozess wird sehr häufig zur Herstellung von Fresnel- und diffraktiven Strukturen verwendet [118]. Dabei wird meist auf planaren Substraten gearbeitet. Im Vergleich zu anderen lithographischen Verfahren muss beim LDW-Prozess kein aufwendiges Positionieren von Fotomasken für mehrstufige Belichtungen wie beim klassischen LIGA Prozess durchgeführt werden.



**Abb. 3-11: Mittels Galvanokopieren abgeformter Werkzeugeinsatz von einem durch LDW hergestellten Mastersubstrat [63]**

Neuste Entwicklungen im Bereich des LDW ermöglichen nicht nur die Strukturierung von planaren Substraten, sondern können auch auf gekrümmten Oberflächen arbeiten [119]. Dies vergrößert das Anwendungsfeld von LDW zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen und bietet mehr Möglichkeiten im Optikdesign bei der Auslegung von Fresnellinsen oder diffraktiven optischen Elementen. Ein mittels LDW hergestellter Glasmaster mit gekrümmter Grundform ist in Abb. 3-12 abgebildet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden solche gekrümmten Master, die mittels LDW hergestellt wurden, durch Galvanokopieren abgeformt, um einen Werkzeugeinsatz zu erzeugen.



**Abb. 3-12: Gekrümmter Glasmaster mit diffraktiver Struktur, hergestellt mittels LDW [63]**

Die Strukturgröße liegt in den meisten Fällen, bedingt durch das Optikdesign, bei ungefähr  $5\ \mu\text{m}$  und größer, um eine gute Beugungseffizienz zu erzielen. Mit dem vorhandenen System können allerdings auch kleiner Strukturen im Bereich von  $1\text{-}3\ \mu\text{m}$  erzeugt werden, wodurch allerdings die Beugungseffizienz bei diffraktiven optischen Elementen reduziert wird [41,120]. Die erreichbare Strukturgröße ist dabei stark von der verwendeten Laserquelle sowie dem Fotolack abhängig. Die erzielbare Oberflächenqualität liegt bei ca.  $25\ \text{nm}$ , wobei die scannende Bewegung des Lasers und Positionierfehler die größten Einflussfaktoren sind [115]. Die Vorteile des LDW-Verfahrens sind die Erzeugung von kontinuierlichen Struk-

turen sowie die Möglichkeit, auch auf gekrümmten Oberflächen zu arbeiten. Ein entscheidender Nachteil ist die Notwendigkeit eines Galvanokopierprozesses, um einen festen Werkzeugeinsatz zu erzeugen. Außerdem benötigt der Schreibprozess lange, da der Laserstrahl scannend über den gesamten Bereich geführt werden muss.

### 3.2.7 Elektronenstrahlschreiben

Das Elektronenstrahlschreiben ist eine alternative Methode zur Strukturierung eines Fotolacks. Vergleichbar mit dem LDW-Verfahren wird Elektronenstrahlschreiben eingesetzt, um ein Mastersubstrat zu strukturieren, welches anschließend mittels Galvanokopieren abgeformt wird, um einen Werkzeugeinsatz zu erhalten. Das Verfahren wurde ursprünglich dafür entwickelt, um Masken für die Halbleiterindustrie herzustellen. Heutzutage wird es aber auch eingesetzt, um mikrooptische Strukturen zu erzeugen.

Beim Elektronenstrahlschreiben wird ein Elektronenstrahl in einer scannenden Bewegung über ein Substrat geführt, wodurch der Fotolack strukturiert wird. Der Elektronenstrahl kann dabei nur in einem begrenzten Feld von einigen Millimetern bewegt werden. Für großflächigere Strukturierungen kann das Substrat mit einem präzise kontrollierten XY-Tisch bewegt werden. Ebenso wie beim LDW-Prozess können mit dem Elektronenstrahlschreiben binäre und kontinuierliche Strukturen erzeugt werden. Das Verfahren wird dabei häufig zum Herstellen von Fresnel- und diffraktiven Strukturen verwendet [121,122]. Ein Beispiel für eine mittels Elektronenstrahlschreiben erstellte Struktur ist in Abb. 3-13 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Prozess kann in der Literatur gefunden werden [123].

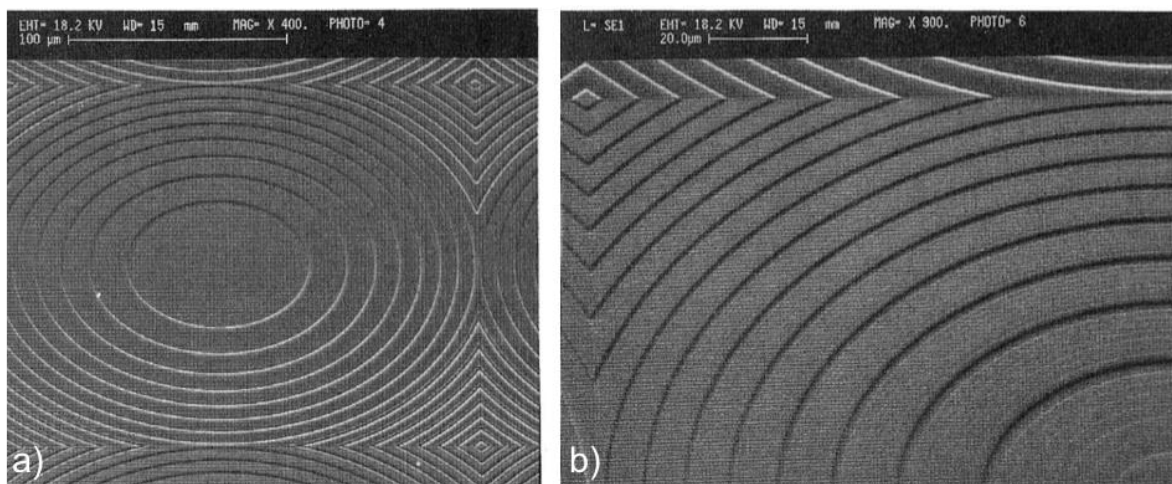


Abb. 3-13: a) Diffraktives optisches Element, hergestellt mittels Elektronenstrahlschreiben, b) Ausschnitt der diffraktiven Linse [122]

Im Vergleich zum LDW ist der Prozess des Elektronenstrahlschreibens aufwendiger, da der Prozess im Vakuum durchgeführt und unter dem Fotolack eine elektrisch leitfähige Schicht aufgebracht werden muss, um Aufladungseffekte zu vermeiden. Ebenso wie beim LDW ist die Bearbeitungszeit durch die nötige scannende Bewegung hoch. Ein großer Vorteil

des Verfahrens ist die erreichbare Strukturgröße sowie die Positioniergenauigkeit, welche aufgrund der Anwendung in der Halbleitertechnik sehr weit optimiert wurde. Die erzielbare Auflösung mit dem Elektronenstrahlschreiben in einem Fotolack kann  $< 10$  nm betragen [124].

### **3.2.8 Ionenstrahlschreiben**

Beim Ionenstrahlschreiben (Engl. focused ion beam, FIB) wird ein fokussierter Ionenstrahl in einer scannenden Bewegung über eine Oberfläche bewegt. Der Prozess ist dabei sehr ähnlich zum Elektronenstrahlschreiben. Ein entscheidender Unterschied ist, dass die Ionen (meist Gallium  $\text{Ga}^{2+}$ ) deutlich schwerer und stärker geladen sind als Elektronen. Dadurch kann das Verfahren verwendet werden, um einen direkten Materialabtrag in einem Substrat zu erzeugen. Material kann dabei unabhängig von der Härte bearbeitet werden, der Werkstoff darf allerdings nicht magnetisch sein, da sonst der Ionenstrahl abgelenkt wird wodurch kein definierter Schreibprozess möglich ist. Da der Ionenstrahl eine kleinere Wellenlänge als ein Elektronenstrahl besitzt, kann die Auflösung im Vergleich zum Elektronenstrahlschreiben nochmals verbessert werden [125]. Mittels Ionenstrahlschreiben können Strukturgrößen von 5 nm und kleiner erreicht werden [44]. Ebenso wie beim Elektronenstrahlschreiben ermöglicht Ionenstrahlschreiben eine hohe Designfreiheit, da der Ionenstrahl frei über das Substrat bewegt werden kann. Allerdings resultiert daraus eine hohe Prozesszeit, wenn die zu strukturierende Fläche groß ist. Ionenstrahlschreiben hat seinen Ursprung in der Fehleranalyse von Halbleiterbauteilen, wo das Verfahren bis heute noch hierfür eingesetzt wird [126]. Allerdings sind neue Anwendungen hinzugekommen wie zum Beispiel die Herstellung von Mikrokanälen [127], mikrostrukturierten Optiken [128] und Wellenleitern [129].

Der große Vorteil dieser Technologie ist der direkte Materialabtrag in einem harten Material. Dadurch können Werkzeugeinsätze ohne zusätzliche Galvanoabformung gefertigt werden. Dieser Prozess befindet sich allerdings noch in einem Forschungsstadium. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierzu erste Untersuchungen durchgeführt. Alternativ kann das Verfahren auch verwendet werden, um ein weiches Material hochpräzise zu strukturieren und anschließend die Strukturen abzuformen. Das Auflösungsvermögen ist beim Ionenstrahlschreiben mit Strukturen  $< 5$  nm extrem hoch. Das Verfahren kann auch dazu verwendet werden, um eine Oberfläche zu polieren. Dabei werden energiearme Ionen verwendet, um hochpräzise Formungenauigkeiten zu entfernen und die Oberflächenqualität zu verbessern, was insbesondere bei Lithographieoptiken in der Halbleiterindustrie benötigt wird. Dabei können Rauheitswerte von  $R_a < 1$  nm erzielt werden [45].

### **3.2.9 Nanoimprintlithographie**

Die Nanoimprintlithographie (NIL) ist ein Verfahren zur Mikro- und Nanostrukturierung von Kunststoffen mit hohem Durchsatz. Die Strukturen können dabei mit hoher Präzision bei gleichzeitig geringen Kosten produziert werden. NIL beschreibt einen Prozess, der aus drei großen Prozessschritten besteht. Vorab muss allerdings ein Master erzeugt werden. Die



Herstellungstechnologie für den Master ist dabei nicht vorgegeben und kann beispielsweise durch Elektronenstrahlschreiben oder Interferenzlithographie erfolgen. Der Master wird anschließend in einen Werkzeugeinsatz überführt, welcher nicht zwingendermaßen fest sein muss, sondern auch aus einem weichen Material bestehen kann. Die Replikation mittels NIL beginnt mit dem Anordnen des Werkzeugeinsatzes über einem mit Lack beschichteten Substrat. Anschließend wird der Werkzeugeinsatz in den unausgehärteten Lack eingeprägt und dieser anschließend ausgehärtet. Die Aushärtung kann dabei sowohl thermisch als auch über Belichtung durchgeführt werden. Für eine optische Belichtung muss der Werkzeugeinsatz transparent sein. Im letzten Prozessschritt wird der Werkzeugeinsatz wieder entfernt und das fertige Bauteil kann entnommen werden. Eine ausführliche Beschreibung des Prozesses sowie verschiedener Prozessvarianten kann in der Literatur gefunden werden [47]. Die Prozesskette ist schematisch in Abb. 3-14 dargestellt.

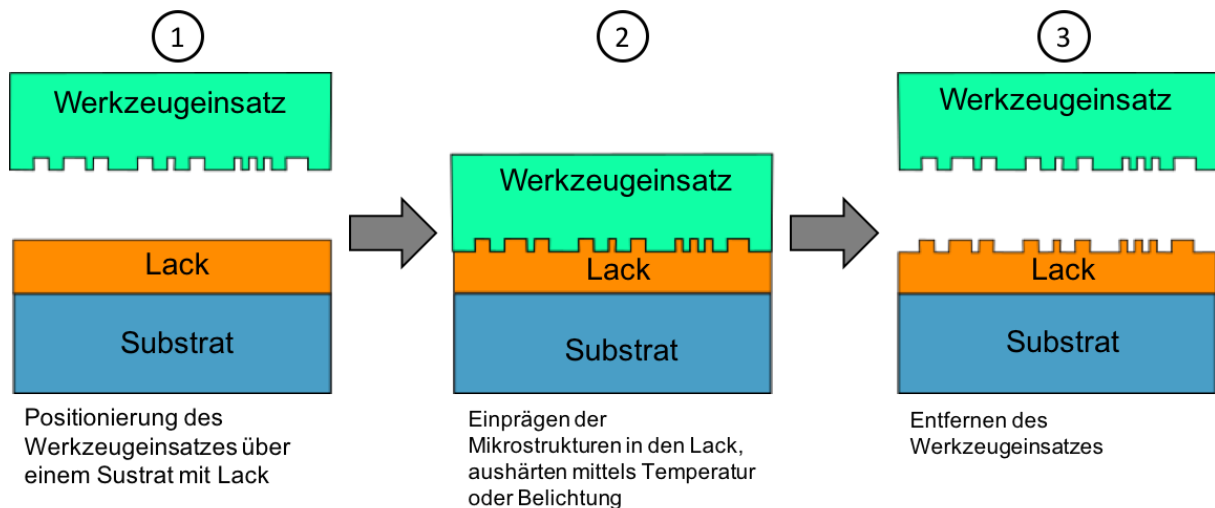


Abb. 3-14: Prozesskette des NIL-Verfahrens

Mit dem NIL-Verfahren können feinste Strukturen mit Strukturgrößen  $< 10$  nm hergestellt und repliziert werden [46]. Daher wird das Verfahren häufig für photonische Anwendungen verwendet, da die optischen Oberflächeneigenschaften präzise kontrolliert werden können. Anwendungsbeispiele sind Hologramme, diffraktive Strukturen, anti-reflektive Strukturen, Mikrolinsenarrays und Rolle-zu-Rolle Anwendungen [130]. Da das Verfahren im Gegensatz zu photolithographischen Prozessen ein mechanisches Verfahren ist, sind die erzielbaren Strukturen nicht beugungslimitiert [131].

NIL ist kein klassisches Verfahren zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen, da es angenommen selbst ein Replikationsprozess ist und die Herstellung eines Werkzeugeinsatzes einen Teil der Prozesskette bildet. Das Verfahren stellt aber einen wichtigen Prozess auf dem Gebiet der mikrostrukturierten Kunststoffoptiken dar und wird daher zur Vollständigkeit hier beschrieben. Allerdings gibt es bereits Ansätze, um den NIL-Prozess zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen für den Spritzguss zu verwenden. Hierfür wird ein Stahleinsatz mit einem Lack beschichtet und darauf der NIL-Prozess durchgeführt. Anschließend werden die Struktu-

ren mit einem Ätzprozess in den Stahleinsatz übertragen. Mit diesem Verfahren konnten diffraktive Strukturen mit einer Größe von 140 nm in einem Stahleinsatz erzeugt werden [132].

### **3.2.10 Polieren/Läppen**

Polieren ist ein seit Jahrzehnten etabliertes Nachbearbeitungsverfahren, das nicht zur Formgebung geeignet ist, sondern ausschließlich, um die Oberflächenqualität von bereits bearbeiteten Flächen und Strukturen zu verbessern. Beim Polieren wird eine Politur, welche feine Körner enthält, verwendet, um einen minimalen Materialabtrag an der Oberfläche zu generieren. Der Prozess besitzt dadurch keine definierte Schneide. Mittels des Polierens können sehr hohe Oberflächenqualitäten im Nano- und Subnanometerbereich erzeugt werden [48]. Um solch hohe Oberflächenqualitäten zu erzeugen, muss die Korngröße im Poliermittel sowie die Bearbeitungszeit sorgsam gewählt werden. Das Verfahren kann eingesetzt werden, um plane, sphärische, asphärische und Freiform-Werkzeugeinsätze zu bearbeiten. Optimierte Verfahren ermöglichen auch das Polieren von strukturierten Werkzeugeinsätzen [133,134].

Ebenso wie beim Polieren wird beim Läppen eine Suspension mit definierter Korngröße für den Materialabtrag verwendet. Diese wird zwischen zwei Platten gerieben, was händisch und maschinell durchgeführt werden kann. Läppen wird häufig eingesetzt, wenn eine hohe Formgenauigkeit benötigt wird [135]. Der Unterschied zwischen Läppen und Polieren ist allerdings nicht genau definiert und die Prozesse ähneln sich stark. Beide Verfahren können für nahezu jedes Material angewendet werden. Die Anwendungen unterscheiden sich nicht von denen des Polierens.

Neben den klassischen Polierverfahren, bei denen eine Politur verwendet wird, gibt es auch neue Polierverfahren, die auf anderen Technologien basieren. Beispiele hierfür sind das Laserpolieren und das Wasserstrahlpolieren. Mit dem Laserpolieren ist es möglich, durch gezielte Laserpulse eine Oberflächenqualität von bis zu  $R_a = 50$  nm zu erreichen [136]. Beim Wasserstrahlpolieren können Oberflächenqualitäten von  $R_a = 25$  nm und besser erzielt und zusätzlich auch Formfehler korrigiert werden [137].

## **3.3 Replikation von Kunststoffoptiken mittels Spritzguss**

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Replikation von Kunststoffoptiken mittels Spritzguss dargestellt. Neben dem klassischen Spritzgussprozess wird noch die Prozessvariante des Spritzprägen beschrieben, da diese insbesondere für Kunststoffoptiken häufig eingesetzt wird. Für die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurde stets das Spritzprägeverfahren eingesetzt und thermoplastische Kunststoffe verwendet. Der Aufbau einer Spritzgussanlage mit Spritzprägefunktion unterscheidet sich nicht von einer normalen Spritzgussanlage. Es werden ausschließlich zusätzliche Softwaremodifikationen benötigt, die weitere Prozesseinstellungen ermöglichen. Der genaue Ablauf eines Spritzprägeprozesses wird in Kapitel 3.3.2 erläutert.

Die Grundlagen zum Spritzgießen werden nur soweit erklärt, wie dies für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Ausführliche Beschreibungen des Prozesses sowie der Prozess- und Anlagenvarianten können in der Literatur gefunden werden [138,139].

### 3.3.1 Spritzgießen

Das Spritzgießverfahren ist eines der bedeutendsten und meist verwendeten Verfahren zum Herstellen von Kunststoffformteilen. Das Verfahren eignet sich insbesondere zum Herstellen von geometrisch komplexen Bauteilen in große Stückzahlen. Die Stärken der Technologie sind dabei unter anderem:

- Keine Nachbearbeitung des Bauteils nötig
- Hohe Stückzahlen durch Werkzeuge mit mehreren Kavitäten
- Verfahren voll automatisierbar
- Hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit
- Große Variationsmöglichkeiten in Bauteilgeometrie und Bauteilgröße
- Möglichkeit zur Herstellung von optischen Bauteilen

#### 3.3.1.1 Aufbau einer Spritzgussanlage

Um den Spritzgussprozess besser zu verstehen, wird zunächst der grundsätzliche Aufbau einer Spritzgussanlage beschrieben und die Funktion der einzelnen Komponenten erklärt. Neben dem Maschinenbett und der Steuereinheit besteht eine Spritzgussanlage aus zwei Hauptbaugruppen, nämlich der Plastifiziereinheit zum Aufschmelzen des Kunststoffes und der Schließeinheit mit dem Spritzgusswerkzeug. Der schematische Aufbau einer Spritzgussanlage ist in Abb. 3-15 dargestellt.

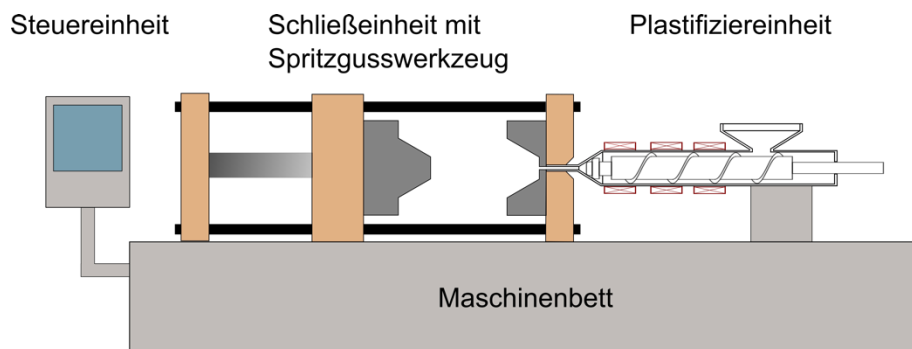


Abb. 3-15: Aufbau einer Spritzgussanlage

Die Steuereinheit regelt und koordiniert den kompletten Spritzgusszyklus. Der Ablauf des Prozesses wird auf der Steuereinheit programmiert und alle Prozessparameter eingestellt. Die Schließeinheit ist für das Öffnen und Schließen des Spritzgusswerkzeuges zuständig.

Das Spritzgusswerkzeug gehört zwar nicht direkt zu der Spritzgussanlage, ist allerdings für den Spritzgussprozess zwingend notwendig. Das Spritzgusswerkzeug wird vor Prozessstart in die Spritzgussanlage eingebaut. Die maximale Schließkraft einer Anlage wird meist

zur ersten Charakterisierung einer Spritzgussanlage verwendet. Diese Kraft bezeichnet die maximale Kraft, die aufgebracht werden kann, um die beiden Werkzeughälften geschlossen zu halten, wenn durch den Spritzgussprozess im Werkzeug ein Innendruck (Werkzeuginnen-  
druck) erzeugt wird. Die Schließeinheit wird, abhängig von der Spritzgussanlage, meist hydraulisch oder elektrisch betrieben. Hydraulisch betriebene Anlagen haben den Vorteil, dass hohe Schließkräfte dauerhaft erzeugt werden können. Elektrisch betriebene Spritzgussanlagen ermöglichen insbesondere eine sehr genaue Positionierung der Werkzeugkomponenten.

Die Plastifiziereinheit bildet eine weitere wichtige Baugruppe einer Spritzgussanlage. In dieser Einheit wird das meist in Granulat-Form vorliegende Kunststoffmaterial plastifiziert, homogenisiert, dosiert und eingespritzt. In der Plastifiziereinheit befindet sich hierzu eine rotierbare Schnecke. Das Material wird hauptsächlich durch die Scherung des Kunststoffes in der Plastifiziereinheit erzeugt, welche durch die Rotation der Schnecke entsteht. Zusätzlich besitzt die Plastifiziereinheit noch Heizbänder, die den Aufschmelzprozess unterstützen und zur Temperaturregelung eingesetzt werden. Neben der Rotationsbewegung kann die Schnecke zusätzlich noch axial vor und zurück bewegt werden. Dies ist insbesondere für das Dosieren des Materials sowie für den Einspritzvorgang entscheidend. Beim Dosieren wird das aufgeschmolzene Material durch eine Rotationsbewegung der Schnecke nach vorne transportiert. Dadurch wird die Schnecke gleichzeitig nach hinten gedrückt. Während des Einspritzvorgangs wird die Schnecke wieder nach vorne geschoben, wodurch das Material in das Spritzgusswerkzeug eingespritzt wird. Ein vollständiger Spritzgusszyklus wird in Kapitel 3.3.1.2 detailliert erklärt.

### **3.3.1.2 Verfahrensablauf Spritzgießen**

Ein Spritzgusszyklus kann in fünf Hauptprozessschritte unterteilt werden, welche in Abb. 3-16 abgebildet sind. Der Spritzgusszyklus beginnt mit dem Schließen des Werkzeuges. Dabei ist das Material für den darauf folgenden Einspritzprozess schon dosiert. Während des zweiten Prozessschritts, dem Einspritzen, wird die Schnecke ohne Rotationsbewegung nach vorne in Richtung Einspritzdüse bewegt, wodurch das Material unter hohem Druck in die Bauteilkavität gedrückt wird. Die Einspritzphase wird üblicherweise über den Volumenstrom bzw. die Geschwindigkeit geregelt. Anschließend folgt die Nachdruck- und Kühlphase. Der Nachdruck ist nötig, um das Schrumpfen des Bauteils während des Erstarrungsvorgangs durch Nachdrücken von neuem Material auszugleichen. Daher wird die Schnecke weiter in Richtung Düsen spitze gedrückt. Sollte der Nachdruck zu gering gewählt oder die Nachdruckzeit zu kurz sein, entstehen Einfallstellen oder Verzüge im Bauteil, welche zu Formabweichungen führen. Sobald der Anguss durch das Abkühlen erstarrt ist, beginnt die Restkühlzeit. Diese ist notwendig, da das Bauteil anfangs keine ausreichende Formstabilität besitzt, welche erst durch weiteres Abkühlen entsteht. Während der Kühlzeit wird parallel im vierten Prozessschritt das Material für das nachfolgende Bauteil dosiert. Dabei rotiert die Schnecke, um Material vom Einzug zur Düsenseite zu befördern und dabei dieses aufzuschmelzen. Dabei wird die Schnecke gleichzeitig nach hinten gedrückt. Im Anschluss an das Dosieren und

Abkühlen wird das Bauteil aus dem Werkzeug ausgeworfen. Hierzu wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil mit Hilfe von Auswerfern aus der Kavität entformt. Beim Öffnen und Schließen des Werkzeuges wird nur eine Werkzeughälfte bewegt, in der sich auch die Auswerfer befinden. Aus diesem Grund werden die Werkzeughälften oft als bewegliche Seite oder Auswerferseite und Düsenseite bezeichnet. Eine detaillierte Beschreibung eines Spritzgusswerkzeuges ist in Kapitel 3.3.1.3 enthalten. Bezüglich des Materials ist zu beachten, dass dieses für den Spritzgussprozess keine Feuchtigkeit enthalten sollte, da dies zu Fehlstellen im Bauteil führen kann. Aus diesem Grund werden die Materialien meist vorab in hierfür vorgesehenen Trocknern getrocknet.

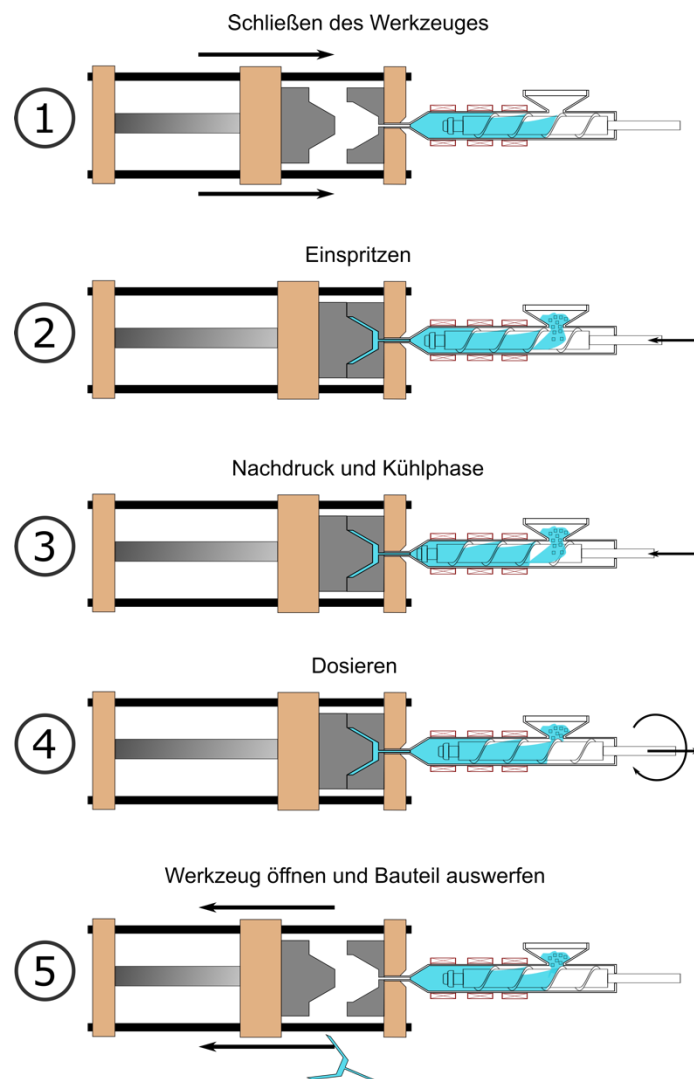


Abb. 3-16: Verfahrensablauf beim Spritzgießen

### 3.3.1.3 Aufbau eines Spritzgusswerkzeuges

Das Spritzgusswerkzeug bildet das Herzstück eines Spritzgussprozesses. Insbesondere zum Herstellen von Kunststoffoptiken werden Werkzeuge mit höchsten Anforderungen benötigt, da für diese Prozesse oft hohe Drücke und Temperaturen erforderlich sind. Die

wichtigen Funktionsflächen werden oft auch als Werkzeugeinsätze realisiert, welche wechselbar sind und im Werkzeug fixiert werden können. In Kapitel 3.2 werden verschiedene Technologien zur Herstellung von optischen Werkzeugeinsätzen beschrieben.

Ein Spritzgusswerkzeug kann grundsätzlich in zwei Hälften gegliedert werden, eine bewegliche Hälfte mit dem Auswerferpaket, welche als Auswerferseite bezeichnet wird, und eine unbewegliche Seite, die als Düsenseite bezeichnet wird. Die Ebene, in der die beiden Werkzeughälften zusammentreffen, wird als Trennebene bezeichnet. In der Trennebene befindet sich die sogenannte Kavität, d.h. der Bereich, der im Spritzgussprozess gefüllt werden muss, um ein Bauteil zu erhalten. Der Großteil eines Spritzgusswerkzeuges wird aus Normalien aufgebaut. Hierzu gehören Führungselemente, Auswerferstifte, Grundplatten, Schrauben, Zentrierflansch, usw. Die Werkzeugplatten enthalten neben der Struktur auch Kühlkanäle mit Anschlüssen für externe Temperiergeräte. Alternativ können auch elektrische Heizpatronen in die Werkzeugplatten integriert werden. Auf die bewegliche Auswerferplatte sind die Auswerferstifte fixiert. Am Ende eines Spritzgusszyklus wird die gesamte Platte nach vorne bewegt, um das Kunststoffbauteil über die Auswerferstifte auszuwerfen. Das setzt voraus, dass das Kunststoffbauteil beim Öffnen des Werkzeuges auf der beweglichen Auswerferseite hängen verbleibt. Um dies zu gewährleisten, werden oft Hinterschnitte in der Kavität eingebracht, z.B. in den Auswerferbohrungen, um ein Haften des Bauteils zu erzeugen. In Abb. 3-17 ist eine schematische Darstellung eines Spritzgusswerkzeuges dargestellt.

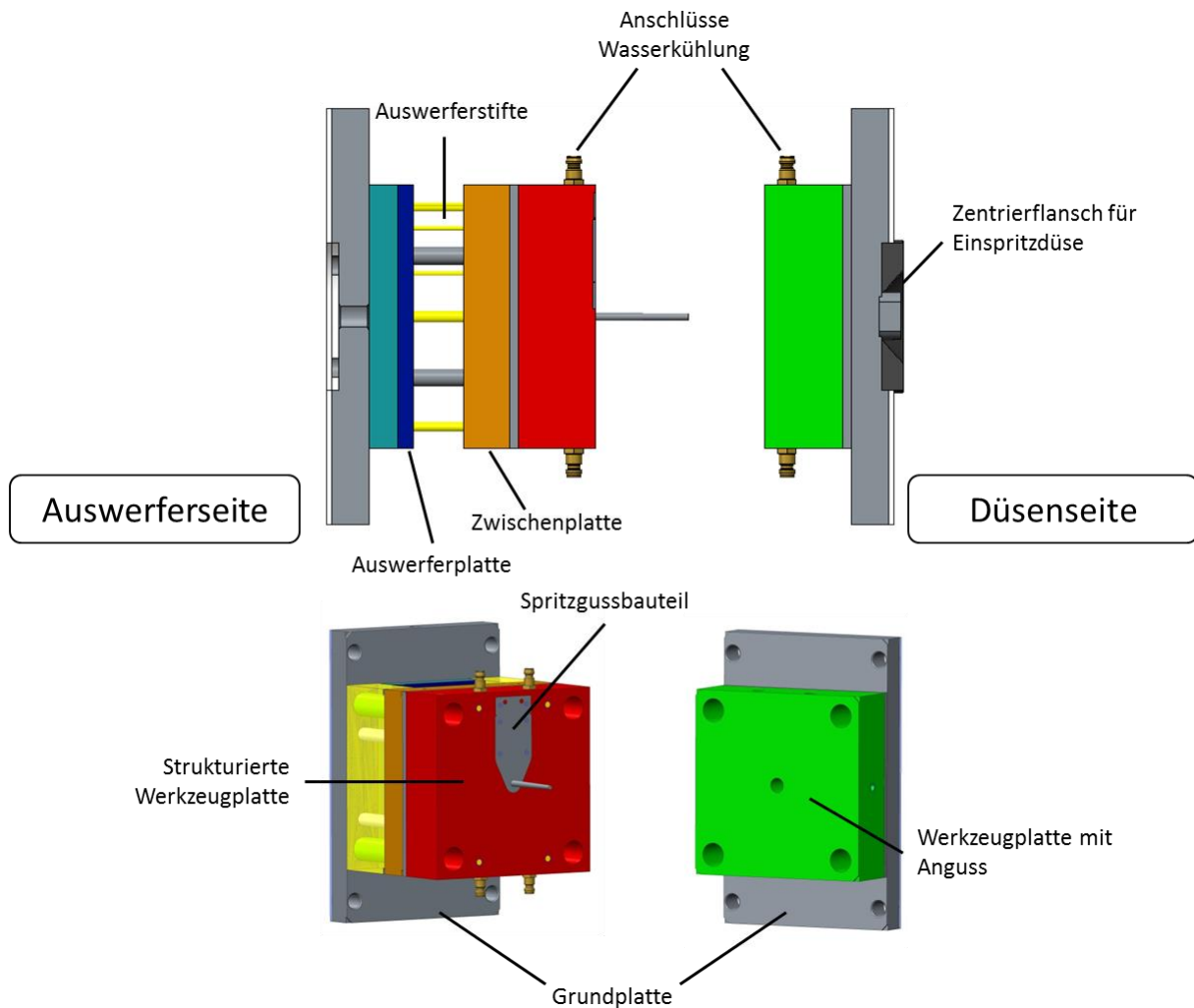


Abb. 3-17: Schematische Darstellung eines Spritzgusswerkzeuges

### 3.3.2 Spritzprägen

Das Spritzprägen ist eine Prozessvariante des Spritzgießens. Grundsätzlich kann der Spritzprägeprozess auf einer klassischen Spritzgussanlage durchgeführt werden. Es werden lediglich Softwaremodule benötigt, welche zusätzliche Prozesseinstellungen für das Spritzprägen ermöglichen. Beim Spritzprägen wird im Gegensatz zum Spritzgießen das Werkzeug nicht sofort vollständig geschlossen, sondern nur soweit vorgefahren, dass noch ein Prägespalt verbleibt, der zu einem späteren Zeitpunkt im Prozess geschlossen wird. Die Kavität ist dadurch nicht vollständig geschlossen und befindet sich in einem vergrößerten Zustand. Das Werkzeug wird erst mit oder nach dem Einspritzvorgang vollständig geschlossen. Dadurch entsteht eine homogene Druckverteilung im gesamten Bauteil, was zu einer homogenen Materialdichte führt. Dadurch können Doppelbrechungen reduziert werden, was ein Vorteil für optische Bauteile ist [140]. Im Gegensatz dazu entsteht bei einem klassischen Spritzgussprozess ein Druckgefälle im Bauteil mit dem höchsten Druck am Angusspunkt, wie in Abb. 3-18 dargestellt. Der Druck wird dabei vom Nachdruck bestimmt. Aus diesem Grund wird das Spritzprägeverfahren häufig für den Optikspritzguss eingesetzt. Das Spritzprägeverfahren

erzielt oft auch höhere Formgenauigkeiten der Bauteile [141]. Des Weiteren unterstützt die Prägebewegung das Abformen von feinen Mikrostrukturen und Strukturen mit großem Aspektverhältnis. Durch die Möglichkeit, die Kavität beim Füllvorgang weiter geöffnet zu haben, kann auch das Füllverhalten positiv beeinflussen. Allerdings ist für den Spritzprägeprozess zu beachten, dass spezielle Spritzprägwerkzeuge benötigt werden. Diese müssen so ausgelegt sein, dass trotz vergrößerter Kavität keine Schmelze austreten kann. Die unterschiedlichen Varianten von Spritzprägwerkzeugen werden in Kapitel werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

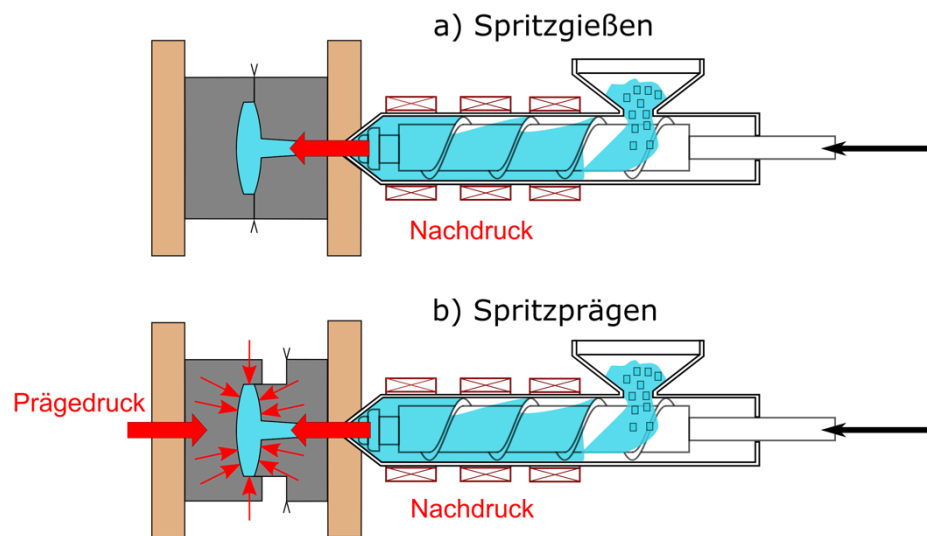


Abb. 3-18: Unterschied zwischen Spritzgießen und Spritzprägen

Beim Spritzprägeprozess können grundsätzlich in der Prozessführung zwei Varianten unterschieden werden. Zum einen kann der Spritzprägeprozess sequentiell durchgeführt werden, d.h. die Prägebewegung wird erst gestartet, wenn der Einspritzvorgang vollständig abgeschlossen ist. Im Gegensatz dazu beginnt beim simultanen Prägen die Prägebewegung während der Einspritzphase. Welche Prozessführung gewählt wird, hängt stark vom Bauteil ab und kann nicht pauschal bestimmt werden.

Anwendungsbeispiele für spritzgeprägte Optiken sind klassische sphärische und asphärische Linsen [142], diffraktive Optiken [141,143] und Mikrolinsenarrays [144].

### Spritzprägwerkzeuge

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, benötigt man für einen Spritzprägeprozess spezielle Spritzprägwerkzeuge, die sich von klassischen Spritzgusswerkzeugen unterscheiden. Die Werkzeuge können auch für klassische Spritzgussprozesse verwendet werden. Der Aufbau von Spritzprägwerkzeugen ist komplexer und aufwendiger als klassische Werkzeuge, wodurch die Herstellungskosten höher sind. Da für den Spritzprägespalt im Werkzeug vor der Einspritzphase ein Prägespalt vorhanden sein muss, muss das Werkzeug so ausgelegt sein,



dass das Material beim Einspritzen die Kavität nicht verlassen kann. Hierfür gibt es grundsätzlich drei Werkzeugkonzepte, welche in Abb. 3-19 schematisch dargestellt sind:

- Tauchkante
- Kavitätenrahmen
- Prägestempel

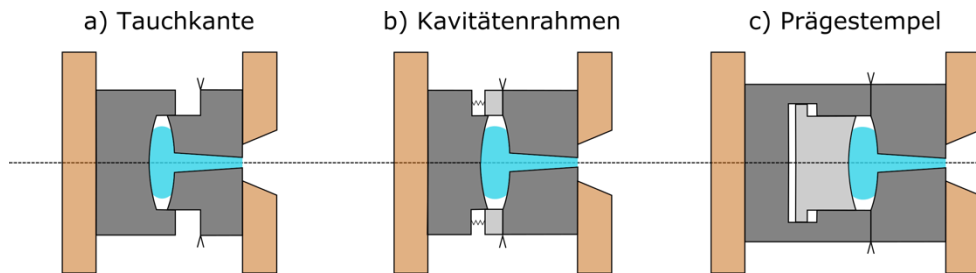


Abb. 3-19: Varianten von Spritzprägewerkzeugen

Grundsätzlich können die drei Werkzeugkonzepte in zwei Kategorien aufgeteilt werden: Werkzeuge mit Tauchkante oder Kavitätenrahmen werden zum Hauptachsenprägen gezählt, wohingegen Werkzeuge mit Prägestempel zum Nebenachsenprägen gehören. Beim Hauptachsenprägen wird die Hauptachse der Spritzgussanlage verwendet, um die Prägebewegung durchzuführen. Daher ist es notwendig, dass die Kavität bereits bei nicht vollständig zugefahrenem Werkzeug geschlossen ist. Dies kann zum einen durch eine Tauchkante umgesetzt werden. Dies ist die einfachste Ausführung eines Spritzprägewerkzeuges, allerdings kann es bei dieser Werkzeugform leicht zum Verklemmen der Werkzeughälften kommen. Daher wird für das Hauptachsenprägen bevorzugt die Bauform mit Kavitätenrahmen verwendet. Dabei wird eine bewegliche Rahmenplatte am Werkzeug angebracht, welche getrennt vom restlichen Werkzeug bewegt werden kann. Dies kann beispielsweise hydraulisch oder pneumatisch geschehen. Die Rahmenplatte verschließt die Kavität, auch wenn das Werkzeug noch nicht vollständig geschlossen ist, wie in Abb. 3-19 b) dargestellt. Im Gegensatz zum Hauptachsenprägen wird beim Nebenachsenprägen nicht die Hauptachse für die Prägebewegung verwendet, sondern das Auswerferpaket der Spritzgussanlage. Hierfür ist ein beweglicher Prägestempel im Werkzeug integriert, welcher getrennt vom restlichen Werkzeug bewegt werden kann. Dadurch kann das Spritzgusswerkzeug vollständig geschlossen werden und gleichzeitig die Größe der Kavität getrennt kontrolliert werden. Der Prägestempel wird zu Beginn des Prozesses so positioniert, dass ein Prägespalt vorhanden ist. Nach dem Einspritzvorgang wird der Prägestempel anschließend über das Auswerferpaket nach vorne gefahren und der Prägespalt geschlossen.

Für einen Spritzprägeprozess ist die exakte Positionierung der Werkzeugkomponenten von höchster Bedeutung. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass ein Positionsmesssystem mit hoher Auflösung und hoher Dynamik verwendet wird. Hierzu werden meist Abstandssensoren am Werkzeug angebracht und deren Daten an die Spritzgussanlage übermittelt. Dadurch ist es

möglich, präzise Prägebewegungen zu erzeugen und eine hohe Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten.

Insbesondere, wenn optische Bauteile hergestellt werden sollen, müssen die Werkzeuge sehr hohe Anforderungen erfüllen. Die Werkzeuge müssen eine hohe Steifigkeit und Genauigkeit aufweisen, um reproduzierbar hohe Bauteilqualitäten und Formgenauigkeiten erzielen zu können. Des Weiteren ist die Temperierung bei optischen Bauteilen ein wichtiger Faktor. Die Temperierung muss so optimiert sein, dass keine Abkühlspannungen im Bauteil entstehen. Dabei ist es insbesondere wichtig, dass die Abstände der Kühlkanäle zur Kavität gleichmäßig sind. Für ein gutes Füllverhalten sollte der Anguss des Werkzeuges so ausgelegt sein, dass schnelle Fließgeschwindigkeiten möglich sind. Dadurch kann eine schnelle Füllung der Kavität erzielt werden, bevor es zu einem Erstarren der Schmelze kommt. Eine weitere Besonderheit beim Optikspritzguss ist die Tatsache, dass oft hohe Werkzeugtemperaturen verwendet werden, um gute Abformergebnisse zu erreichen. Dies muss in der Werkzeugauslegung mit beachtet werden. Ein weiterer entscheidender Punkt ist die Integration der Werkzeugeinsätze mit den entsprechenden Funktionsflächen im Spritzprägewerkzeug. Diese müssen so eingebaut werden können, dass sie exakt positioniert und fest im Werkzeug montiert sind, sodass keine Bewegungen mehr möglich sind. Nur so können hochwertige Kunststoffoptiken hergestellt werden. All diese Punkte sind notwendig, da für optische Bauteile höchste Anforderungen an Formgenauigkeit und Materialdicht gestellt werden. Bedingt durch die Tatsache, dass die optischen Bauteile meist aus transparenten Materialien hergestellt werden, sind bereits kleinste Abweichung in der Form und Spritzgussfehler im Bauteil sichtbar und zusätzlich, die Funktionalität beeinträchtigt.

### **3.3.3 Materialien für Optikspritzguss**

Im Vergleich zu Gläsern, gibt es bisher relativ wenige optische Materialien, die mittels Spritzguss verarbeitet werden können. Die am meisten verwendeten Materialien für Kunststoffoptiken sind Polymethylmethacrylat (PMMA), Cyclo-olefin Polymer (COP), Cyclo-olefin Copolymer (COP) und Polycarbonat (PC) [145]. All diese Materialien sind transparente amorphe Kunststoffe. Allerdings gibt es auch neu entwickelte optische Kunststoffe mit teilkristallinem Aufbau, deren Eigenschaften für optische Anwendungen und Optikspritzguss optimiert wurden. Ein Beispiel hierfür ist das auf Polyamid (PA 6) basierte Material Trogamid der Firma Evonik (Evonik Industries AG, Deutschland). Insbesondere durch die neu entwickelten Materialien wie COC und COP sowie Trogamid konnte in den vergangenen Jahren die Qualität von Kunststoffoptiken deutlich optimiert werden. Diese Materialien sind dabei so optimiert, dass sie eine gute Verarbeitbarkeit im Spritzgussprozess ermöglichen sowie eine geringe Wasserabsorption aufweisen. Für den Spritzgussprozess ist dabei insbesondere wichtig, dass die Entstehung von Doppelbrechungen so gering wie möglich ist. Der Doppelbrechungseffekt entsteht durch wechselnde Brechungsindizes im Bauteil aufgrund von Dichteschwankungen. Ursache für den stärkeren Doppelbrechungseffekt ist der Herstellungsprozess mittels Spritzgießen/Spritzprägen, welcher prozessbedingt Dichteschwankungen im

Bauteil erzeugt. Wie bereits in Kapitel 3.3.2 beschrieben kann die Doppelbrechung beim Verwenden eines Spritzprägeprozesses deutlich reduziert werden im Vergleich zu einem klassischen Spritzgussprozesses. Wie stark die Doppelbrechung dabei ausfällt, ist stark prozessabhängig und kann durch Optimierung der Prozessparameter deutlich verbessert werden.

Eine geringe Wasserabsorption ist notwendig, um eine konstante Qualität der Kunststoffoptiken über den gesamten Lebenszeitraum zu gewährleisten. Durch die Wasseraufnahme kommt es zu einem Anschwellen des Bauteils, wodurch eine Geometrieänderung hervorgerufen wird, was zu einer Beeinträchtigung der optischen Funktionalität führt.

Der verfügbare Bereich von Brechungsindizes ist bei optischen Kunststoffen sehr gering und liegt meist um  $n = 1,5$ . Dies ist ein signifikanter Nachteil gegenüber Glasoptiken, bei denen ein großer Bereich an unterschiedlichen Gläsern verfügbar sind, was einen großen Spielraum im Optikdesign ermöglicht. Des Weiteren ist die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex im Allgemeinen bei Kunststoffoptiken höher als bei Glasoptiken. Die Transmission von optischen Kunststoffen ist im Bereich des sichtbaren Wellenlängenbereiches sehr gut und liegt bei über 90%. Im Bereich des ultravioletten Wellenlängenbereiches nimmt die Transmission der meisten optischen Kunststoffe allerdings rapide ab. Im infraroten Wellenlängenbereich ist die Transmission stark materialabhängig. Die optischen Kunststoffe besitzen im höheren Wellenlängenbereich einige Absorptionsbänder, was auf die chemische Struktur der Materialien zurückzuführen ist. Dadurch können Kunststoffoptiken im infraroten Wellenlängenbereich nur eingeschränkt eingesetzt werden. Die Transmissionskurven einiger optischer Kunststoffe sind in Abb. 3-20 dargestellt.

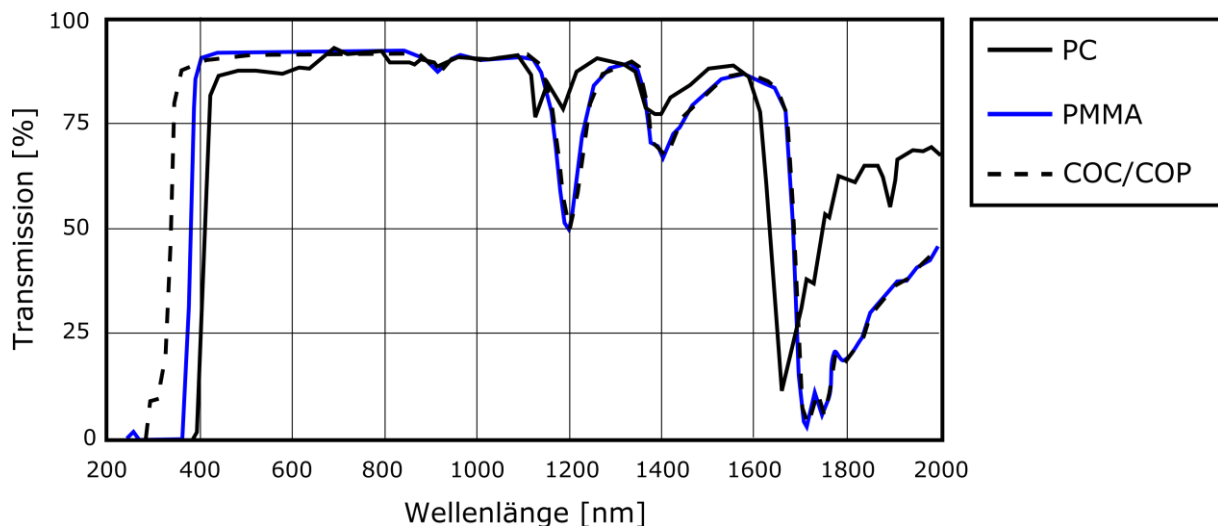


Abb. 3-20: Transmission verschiedener optischer Kunststoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge (vgl. [146])

Der größte Vorteil von Kunststoffoptiken gegenüber herkömmlichen Glaslinsen sind vor allem die deutlich geringeren Herstellungskosten, insbesondere bei hohen Stückzahlen [142,145]. Bei geringen Stückzahlen sind oft die Initialkosten für ein Spritzgusswerkzeug

sowie die Prozessentwicklung zu hoch. Zusätzlich ist das Gewicht von Kunststoffoptiken deutlich geringer, was für viele Anwendungen einen signifikanten Vorteil bietet. Außerdem können herstellungsbedingt mikrostrukturierte Optiken in Kunststoff deutlich einfacher hergestellt werden als Glaslinsen. Dadurch können auch Nachteile, wie zum Beispiel die Einschränkung im Brechungsindex, kompensiert werden sowie die Funktionalität der Optiken verbessert werden. Dabei ist allerdings eine sehr hohe Prozesskontrolle über den gesamten Herstellungsprozess von entscheidender Bedeutung.

### **3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Aus dem Stand der Technik können einige Erkenntnisse abgeleitet werden, welche nun nochmals zusammengefasst dargestellt werden. Allgemein kann gesagt werden, dass die Bedeutung von Kunststoffoptiken stark zunimmt. Insbesondere die kostengünstige Herstellung bei hohen Stückzahlen sowie das geringe Gewicht sind dabei ein entscheidender Faktor, bei dem Vorteile gegenüber klassischen Glasoptiken zum Tragen kommen. Hierfür kann das Spritzgussverfahren und das Spritzprägeverfahren eingesetzt werden, welche die Herstellung von qualitativ hochwertigen Kunststoffoptiken ermöglichen. Des Weiteren ist die Herstellung von Freiformoptiken sowie mikrostrukturierten Optiken technologiebedingt deutlich einfacher als bei Glasoptiken. Ein deutlicher Nachteil von Kunststoffoptiken ist der eingeschränkte Bereich von Brechungsindizes, den optische Kunststoffe besitzen. Dadurch ist das Optikdesign deutlich eingeschränkter als bei Glasoptiken. Um diesen Nachteil zu überwinden, können allerdings mikrostrukturierte Optiken eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken ein entscheidender Faktor, um eine breite Anwendung und Akzeptanz auf dem Gebiet der Optik zu erreichen. Die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken ist allerdings äußerst komplex und benötigt viel Know-how. Dadurch sind die Initialkosten für solche optischen Komponenten sehr hoch, was eine Hürde darstellt für eine weite Verbreitung in industriellen Anwendungen. Aus diesem Grund müssen die benötigten Prozessketten erforscht und untersucht werden und das Wissen zugänglich gemacht werden, um die Initialkosten zu reduzieren und weitere Anwendungen zu erschließen. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben gibt es eine große Zahl an Herstellungsverfahren, um optische Werkzeugeinsätze für den Spritzguss herzustellen. Jedes dieser Verfahren besitzt Vor- und Nachteile und kann nur für bestimmte Anwendungen verwendet werden. Die Auswahl des am besten passenden Herstellungsverfahrens stellt also bereits die erste Herausforderung im Herstellungsprozess dar. Die in diesem Kapitel zusammengestellten Informationen sowie die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollen die Auswahl der am besten passenden Technologien unterstützen. In Abhängigkeit vom ausgewählten Herstellungsverfahren resultieren auch unterschiedliche Prozessketten, die durchlaufen werden müssen, um mikrostrukturierte Kunststoffoptiken herzustellen. Dabei sind eine vollständige Kontrolle und ein tiefes Prozessverständnis nötig, um qualitativ hochwertige Kunststoffoptiken zu erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei unterschiedliche Prozessketten erarbeitet, beschrieben und untersucht.

## **4 Wissenschaftliche Fragestellung**

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben, gewinnen Kunststoffoptiken mehr und mehr an Bedeutung in einem breiten Feld von Industriezweigen und Anwendungen. Dabei ersetzen sie häufig traditionelle Glaslinsen aufgrund der deutlich geringeren Herstellungskosten. Obwohl sich die Kunststoffe für Optikanwendungen in den vergangenen Jahren stark weiterentwickelt haben und auf diese Anforderungen hin optimiert wurden, bleibt die Einschränkung in den verfügbaren Brechungsindizes bestehen. Dadurch sind die Möglichkeiten im Optikdesign eingeschränkter als bei traditionellen Glaslinsen. Allerdings können diese Einschränkungen durch den Einsatz von Mikrostrukturen teilweise umgangen werden, welche in Kunststoffoptiken deutlich einfacher einzubringen sind als bei Glasoptiken. Insbesondere die Herstellung solcher Kunststoffoptiken mittels Spritzgießen hat sich dabei als erfolgreich erwiesen. Für hochwertige Bauteile wird dabei meist die Prozessvariante des Spritzprägens verwendet.

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass eine Vielzahl an Herstellungstechnologien für (mikrostrukturierte) optische Werkzeugeinsätze für Spritzgusswerkzeuge zur Verfügung steht. Die Auswahl der richtigen Technologie für die jeweilige Anwendung erfordert bereits ein breites Technologie Know-how und ausführliche Recherche. Dieses Wissen ist allerdings in vielen Unternehmen nicht vorhanden und muss daher aufwendig erarbeitet werden, da eine kompakte Zusammenfassung der Technologien nicht zur Verfügung steht. Je nachdem welche Herstellungstechnologie für die Herstellung des Werkzeugeinsatzes verwendet wird, ergibt sich eine ganze Prozesskette mit verschiedenen Arbeitsschritten, die abgearbeitet werden muss, um mikrostrukturierte Kunststoffoptiken herzustellen. Die Schwierigkeit dabei liegt zum einen im Erstellen der Prozesskette mit allen nötigen Prozessschritten, die bereits auf die finale Anwendung angepasst werden müssen. Zum anderen erfordert die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken ein breites Prozesswissen in allen nötigen Prozessschritten sowie eine sehr hohe Prozesskontrolle über den gesamten Herstellungsprozess hinweg. Sind diese Voraussetzungen geschaffen, können durch die Kombination eines geeigneten Strukturierungsverfahrens mit der passenden Integrationstechnik hochgenaue mikro- und nanooptische Komponenten aus Kunststoff mittels Spritzprägen hergestellt werden. Um diese Aussage zu belegen, werden in dieser Arbeit drei unterschiedliche Prozessketten erarbeitet und diskutiert, mit denen unterschiedliche mikrostrukturierte Kunststoffoptiken hergestellt werden können. Hierfür werden drei verschiedene Herstellungsverfahren für mikrostrukturierte Werkzeugeinsätze verwendet. Diese sind Ultrapräzisionsbearbeitung, Laserdirekt-schreiben und Ionenstrahlschreiben.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen daher die folgenden Punkte erarbeitet werden:

- Herstellung eines Mikrolinsenarrays durch die Verwendung von Ultrapräzisionsfräsen mittels entsprechender Frässtrategien
- Herstellung eines gekrümmten Glasmasters mit diffraktiven Strukturen durch Laserdirektschreiben
- Abformung eines gekrümmten, mikrostrukturierten Glasmasters mittels Galvanokopieren
- Umsetzbarkeit der Direktstrukturierung eines Werkzeugeinsatzes mit Nanostrukturen mittels Ionenstrahlschreiben
- Herausforderungen und Möglichkeiten bei der Replikation von mikrostrukturierten optischen Bauteilen mittels Spritzprägen
- Vergleich unterschiedlicher Prozessketten zur Herstellung von mikrostrukturierter Kunststoffoptiken und Ableiten von allgemein gültigen Erkenntnissen
- Auswahlhilfe für Technologien zur Herstellung (mikrostrukturierter) optischer Werkzeugeinsätze

## **5 Mikrostrukturierung durch Ultrapräzisionsbearbeitung**

In diesem Kapitel wird die Prozesskette zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken mittels Ultrapräzisionsbearbeitung und Spritzprägen beschrieben. Dabei wird ein Mikrolinsenarray (MLA) als Beispielanwendung betrachtet. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von Frässtrategien zur Herstellung des Werkzeugeinsatzes mittels Ultra-präzisionsfräsen (UP-Fräsen) sowie der Prozessentwicklung beim Spritzprägen der MLAs. Des Weiteren wird das verwendete Spritzprägewerkzeug-Konzept vorgestellt. Am Ende des Kapitels werden zuerst die Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte beschrieben und anschließend diskutiert.

### **5.1 Einleitung**

Ultrapräzisionsbearbeitung ist eine der am meisten verbreiteten Herstellungsverfahren für optische Werkzeugeinsätze. Die Technologie eignet sich dabei auch insbesondere, um Mikrostrukturen herzustellen. Die erreichbare Strukturgröße ist dabei, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, hauptsächlich durch die verfügbaren Diamantwerkzeuge limitiert. Der minimale verfügbare Spitzenradius liegt bei ungefähr 5  $\mu\text{m}$  [27]. In dieser Arbeit wird die Leistungsfähigkeit der Ultrapräzisionsbearbeitung anhand der Herstellung eines MLAs analysiert und evaluiert. Dabei wird der Prozess des Ultrapräzisionsfräsens (UP-Fräsen) zur Herstellung eines Werkzeugeinsatzes verwendet und anschließend die Bauteile in Kunststoff mittels Spritzprägen repliziert.

MLAs werden heutzutage in verschiedenen Anwendungen eingesetzt. Beispiele hierfür sind Bildgebung [147], Fingerprintsensoren [19], 3D-Nahfeldkameras [148] und hyperspektrale Bildgebung [20]. Alternativ zum UP-Fräsen gibt es weitere Herstellungsmethoden, die sich eignen, um MLAs herzustellen wie z.B. LIGA [16] und EDM [26]. Allerdings bietet die Ultrapräzisionsbearbeitung entscheidende Vorteile für die Herstellung von MLAs. Mittels UP-Fräsen kann direkt in einem harten Material gearbeitet werden, welches als Werkzeugeinsatz verwendet werden kann und gleichzeitig eine hohe Oberflächenqualität erzielt werden. Hierfür wird in den meisten Fällen eine Nickel-Phosphor-Beschichtung verwendet, da eine direkte Bearbeitung von eisenhaltigen Materialien zu einem starken Verschleiß am Diamantwerkzeug führt. Dadurch ist kein zusätzlicher Abformprozess nötig, wie es beispielsweise bei einem LIGA-Prozess nötig ist. Außerdem ermöglicht der Einsatz von Diamantwerkzeugen die direkte Herstellung von optischen Oberflächen ohne zusätzliche Nachbearbeitung. Dies kann auch auf vergleichsweise großen Bearbeitungsflächen von mehreren Quadratzentimetern durchgeführt werden.

Das MLA, welches im Rahmen dieser Arbeit hergestellt wurde, soll in einem hyperspektralen Kamerasystem eingesetzt werden, welches auch die Dimensionen und Strukturgrößen vorgibt. Das MLA hat eine strukturierte Fläche von 13x15 mm<sup>2</sup>. Die Mikrolinsen haben eine

sphärische Form mit einem Radius von exakt 1 mm. Der Abstand zwischen den einzelnen Linsen beträgt  $127,5 \mu\text{m}$ . Dies resultiert in einer Gesamtzahl von über 12.000 einzelnen Linsen. Jede Mikrolinse ist konvex und etwa  $4 \mu\text{m}$  hoch. Die Mikrolinsen sind zusätzlich noch in einem Winkel von  $26,56^\circ$  angeordnet, um eine bessere Abbildung auf dem Kamerachip zu ermöglichen. Die Oberflächenqualität der Mikrolinsen sollte für diese abbildende Anwendung  $R_a < 10 \text{ nm}$  betragen. Um das MLA in die vorgesehene hyperspektrale Kamera integrieren zu können, werden zusätzlich zu der strukturierten Fläche noch Halterungen am Bauteil angebracht. Diese werden im Spritzprägeprozess direkt im Bauteil integriert. Das spritzgeprägte Bauteil hat eine Bauteildicke von  $500 \mu\text{m}$ . Das Design des MLA ist in Abb. 5-1 abgebildet.

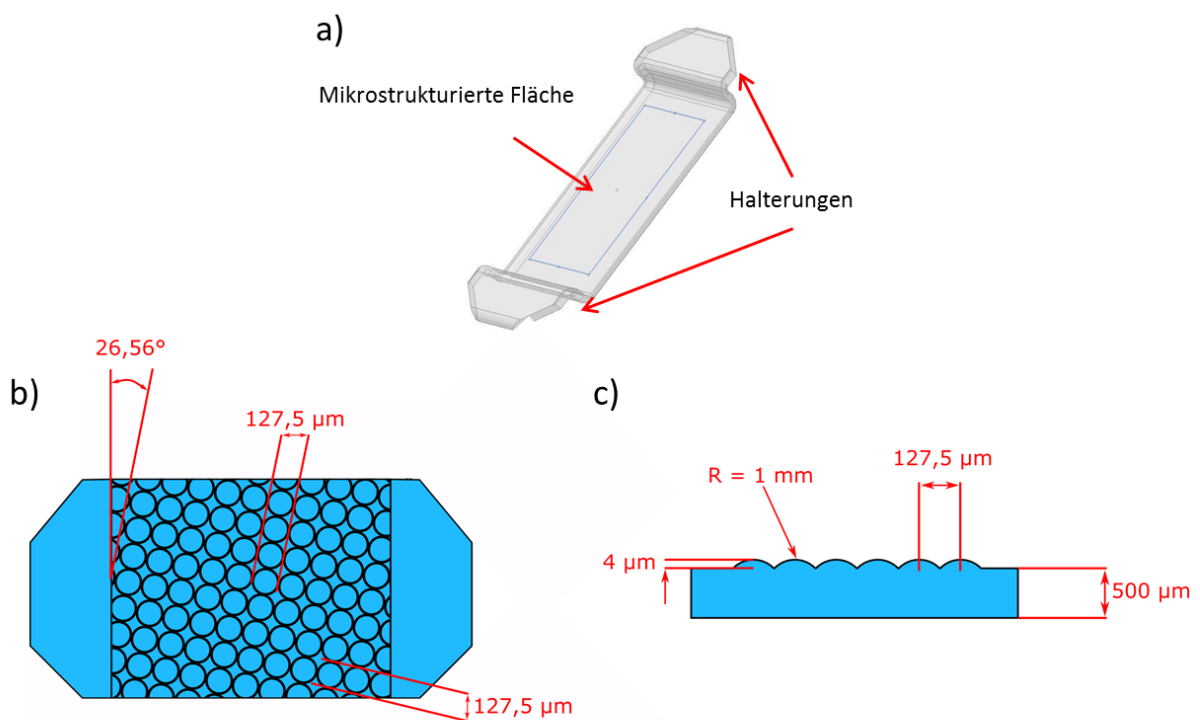


Abb. 5-1: a) Design des MLA, b) Anordnung der Mikrolinsen und c) Dimensionen der Mikrolinsen

## 5.2 Methoden

Die Prozesskette zur Herstellung des MLAs kann in vier große Prozessschritte unterteilt werden. Im ersten Schritt wird ein Werkzeugeinsatz mittels klassischer spanender Bearbeitung hergestellt und mit NiP beschichtet. Die Schichtdicke beträgt  $350 \mu\text{m}$ . Die Beschichtung für den Werkzeugeinsatz wurde von der Firma CZL Tilburg (Niederlande) durchgeführt. Bei der Beschichtung ist besonders darauf zu achten, dass nicht nur eine rein chemische Bindung zwischen dem Werkzeugeinsatz und der Beschichtung vorliegt sondern zusätzlich eine mechanische Verankerung vorgesehen ist. Dies kann in Form eines Hinterschnittes am Werkzeugeinsatz geschehen. Dadurch wird eine bessere Haftung der Beschichtung erzielt, welche



insbesondere für den Spritzprägeprozess von entscheidender Bedeutung ist. Andernfalls kann sich die Beschichtung durch die entstehende Reibung bei der Prägebewegung lösen und den Werkzeugeinsatz so zerstören. Nach der Beschichtung wird der Werkzeugeinsatz nochmals mittels klassischem Fräsen nachbearbeitet, um überschüssiges NiP zu entfernen. Der Zweite Prozessschritt ist die Ultrapräzisionsbearbeitung. Dabei wird zuerst die zu strukturierende Fläche mit einer Fly-Cutting Diamantbearbeitung vorbereitet. Dadurch entsteht eine plane Oberfläche, welche eine Voraussetzung für das UP-Fräsen ist. Im Anschluss werden die Mikrolinsen in den Werkzeugeinsatz gefräst. Im dritten Prozessschritt wird der fertige Werkzeugeinsatz in das Spritzprägewerkzeug integriert. Im letzten Prozessschritt werden die MLAs mittels Spritzprägen repliziert. Die gesamte Prozesskette ist nochmals in Abb. 5-2 dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die letzten drei Prozessschritte nochmals genauer beschrieben, da diese äußerst kritisch für einen erfolgreichen Herstellungsprozess sind.



**Abb. 5-2: Prozesskette zur Herstellung von MLAs mittels Ultrapräzisionsbearbeitung und Spritzprägen**

### **5.2.1 UP-Fräsen von Mikrolinsenarrays**

Für die Herstellung des MLA-Werkzeugeinsatzes wurde eine 5-Achs-Ultrapräzisionsanlage verwendet (Freeform 700, AMETEK Precitech Inc., USA, siehe Abb. 5-3). Die Anlage besitzt eine massive Granitplatte als Basis und hat zusätzlich pneumatische Schwingungsdämpfer, um externe Vibrationen zu dämmen. Die Frässpindel ist in der Anlage horizontal ausgerichtet. Die Achsen sind hydrostatisch gelagert, um höchste Positioniergenauigkeit und Steifigkeit zu gewährleisten. Die Positioniergenauigkeit beträgt 100 nm, welche durch Glasmaßstäbe erzielt wird, die eine Auflösung von 8,6 nm besitzen. Die Anlage wurde in einem auf  $\pm 1^\circ\text{C}$  temperierten Raum betrieben und besitzt zusätzlich eine klimatisierte Bearbeitungskammer mit einer Temperaturregelung von  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Diese hochgenaue Temperaturregelung ist notwendig, um die Temperatur über die gesamte Bearbeitungszeit konstant zu halten. Trotz hochgenauer Temperaturregelung ist es empfehlenswert, die Bearbeitungszeit so kurz wie möglich zu halten, um jegliche Temperaturdrifts zu verhindern. Schon kleine Temperaturveränderungen während der Bearbeitung können das Fräsergebnis signifikant beeinflussen und zu deutlichen Formabweichungen führen [149]. Während der Fräsbearbeitung

wird daher das Bauteil sowie die Fräterspitze gekühlt. Für die Kühlung wird das Kühlmittel Isoparaffin auf die Oberfläche gesprüht.

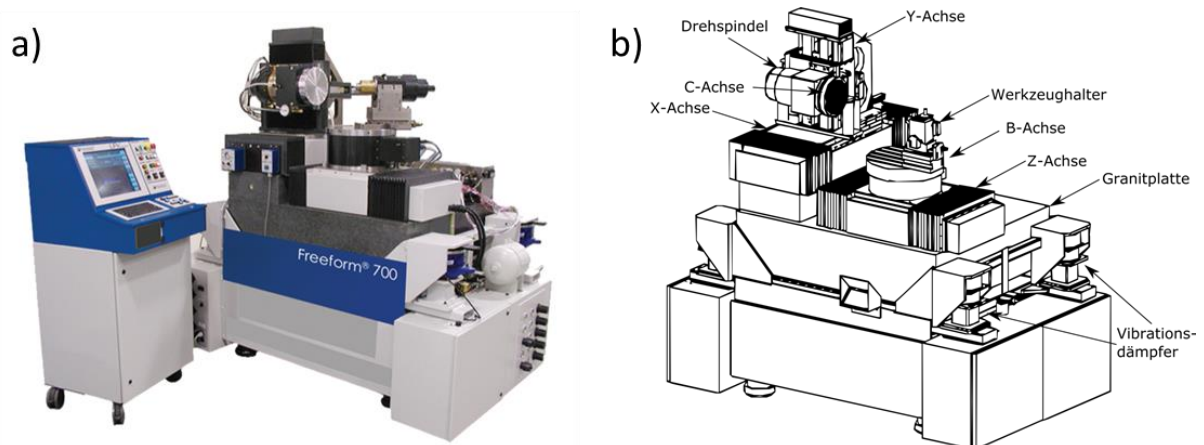


Abb. 5-3: a) Precitech 5-Achs-Ultrapräzisionsanlage b) Schematische Darstellung der Ultrapräzisionsanlage mit den wichtigsten Komponenten

Bevor das UP-Fräsen des Werkzeugeinsatzes durchgeführt werden kann, muss die Oberfläche des Einsatzes planarisiert werden. Hierfür wurde ein Fly-Cutting Prozess verwendet, wie er in Kapitel 3.2.1.3 beschrieben ist. Fly-Cutting ermöglicht es, große Flächen schnell und gleichmäßig zu bearbeiten. Für die Bearbeitung wurde ein Fly-Cutter der Firma Matzdorf (Gruppe Matzdorf GmbH, Deutschland) eingesetzt mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Diamantschneide von 3 mm. Für die Bearbeitung wurde der Werkzeugeinsatz exakt senkrecht zum Fly-Cutter ausgerichtet. Der Prozess wurde mit der vom Hersteller empfohlenen Drehzahl von 1.500 1/min durchgeführt. Hierfür wurde eine luftgelagerte Frässpindel mit eigenständiger Wasserkühlung eingesetzt (ASD-CX, Levicron GmbH, Deutschland). Während der Bearbeitung wurde der Schnittbereich mittels Minimalmengen-Kühlung gekühlt. Hierzu wurde über zwei Düsen Isoparaffin auf die Oberfläche gesprüht. In Abb. 5-4 ist der Fly-Cutting-Prozess des Werkzeugeinsatzes abgebildet.

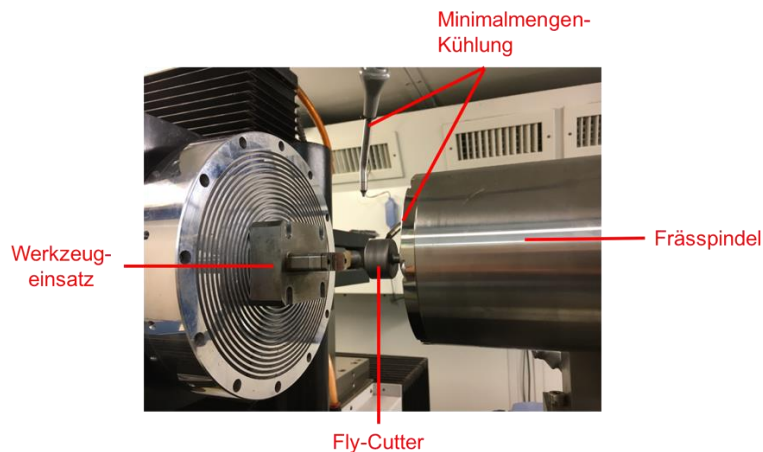


Abb. 5-4: Fly-Cutting-Bearbeitung des Werkzeugeinsatzes

Vor der eigentlichen Bearbeitung wurde die Frässpindel 10 min bei der Ziel-Drehzahl betrieben, um diese auf eine konstante Temperatur zu bringen. Dies ist nötig, um eine Ausdehnung der Spindel während der Bearbeitung zu verhindern. Durch die Vorlaufzeit findet die Ausdehnung der Spindel durch entstehende Wärme vor der Bearbeitung statt. Während der Bearbeitung kommt es dann zu keiner signifikanten thermischen Ausdehnung mehr. Dieser Effekt wird auch als Spindelwachstum bezeichnet. Der Fly-Cutting-Prozess wurde in zwei Phasen durchgeführt. In einer ersten Schrubb-Phase wurde bei höherem Vorschub die gesamte Oberfläche auf eine Höhe gebracht. In der zweiten Phase wurde ein sogenannter Schlichtspan abgenommen, d.h. bei verringertem Vorschub wurde die Oberfläche nochmals abgefahren, um eine hohe Oberflächenqualität zu erreichen. Die Prozessparameter sind in Tab. 5-1 zusammengefasst. Derselbe Prozess wird auch verwendet, um einen zweiten Werkzeugeinsatz herzustellen. Dieser Werkzeugeinsatz bildet die plane Rückseite des MLA und muss daher ebenfalls optische Qualität aufweisen. Der Aufbau des verwendeten Spritzprägewerkzeuges ist in Kapitel 5.2.2 erläutert.

**Tab. 5-1: Prozessparameter für Fly-Cutting-Bearbeitung**

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Drehgeschwindigkeit Spindel [1/min]	1.500
Zustellung [ $\mu\text{m}$ ]	3
Vorschub [mm/min]	
• Schruppen	20
• Schlichten	5
Vorlaufzeit [min]	10

Im Anschluss an den Fly-Cutting-Prozess wurde die Mikrolinsenstruktur in den Werkzeugeinsatz eingebracht. Hierfür wurden in einem ersten Schritt Frässtrategien für einzelne Mikrolinsen entwickelt und untersucht. Dabei wurden insbesondere zwei entscheidende Punkte für die Bearbeitung als Kriterien genutzt: Bearbeitungszeit und Oberflächenqualität. Für den Werkzeugeinsatz müssen die Mikrolinsen konkav geformt sein, da der Einsatz das Negativ des Bauteils darstellt.

Für die Herstellung der Mikrolinsen wurde ein Radiusfräser aus monokristallinem Diamant verwendet. Diese Fräser sind in den meisten Fällen als Einschneider ausgelegt, bei denen die Schneidekante hochgenau auf einen definierten Radius eingeschliffen wird. Der Diamant ist dabei auf einem (Hartmetall-)Schaft aufgebracht. Der prinzipielle Aufbau eines Dimant-Fräasers sowie eine vergrößerte Aufnahme der Schneidekante sind in Abb. 5-5 dargestellt.

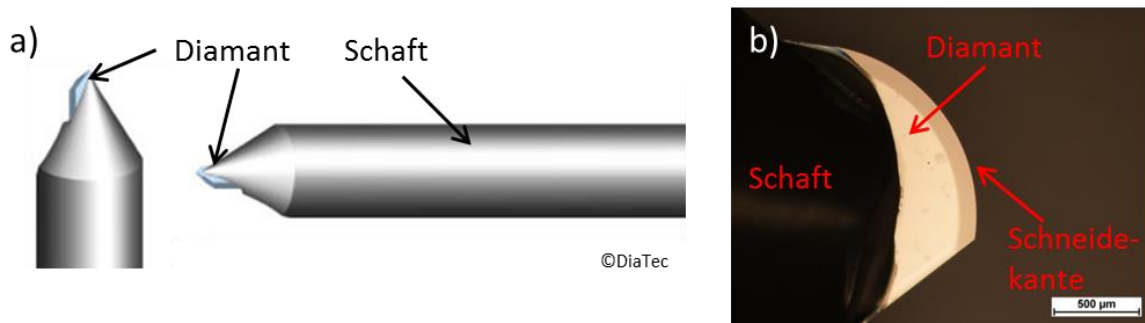


Abb. 5-5: Schematischer Aufbau eines Diamantfräasers mit Schaft und Diamantschneide, b) Mikroskopaufnahme einer Diamantschneide

Die erste Frässtrategie, die untersucht wurde, ist ein ringförmiger Verfahrensweg des Fräasers. Dabei wird eine ringförmige Bahn gefräst und anschließend die Position des Fräasers in Richtung Linsen-Zentrum verfahren und ein erneuter Ring gefräst. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis der Fräser am Linsenmittelpunkt angekommen ist. Im Prozess kann neben den Standard-Fräsparametern zusätzlich die Schrittweite eingestellt werden, in welchem Abstand ein neuer Ring gefräst wird. Der Verfahrensweg sowie eine Messung mittels Weißlichtinterferometrie (WLI, Veeco NT9100a, USA) sind in Abb. 5-6 a) dargestellt. Die resultierende Bearbeitungszeit für eine Mikrolinse beträgt dabei 6 min, was zu einer sehr langen Bearbeitungszeit für das gesamte MLA führen würde. Zusätzlich ist die resultierende Oberflächenrauheit von 85 nm nicht ausreichend für eine optische Anwendung. Es ist in der Messaufnahme auch deutlich sichtbar, an welcher Stelle der Fräser sich in Richtung Zentrum bewegt, was an dem dunklen Streifen im Messbild zu sehen ist.

Als zweite Frässtrategie wurde das radiale Fräsen getestet, welches in Abb. 5-6 b) dargestellt ist. Dabei wird der Fräser von außen in Richtung Linsenzentrum bewegt. Anschließend wird der Fräser um eine definierte Gradzahl versetzt und eine erneute Fräsbahn von außen in Richtung Zentrum gestartet. Bei dieser Frässtrategie verbessert sich die Oberflächenqualität in Richtung Linsenzentrum, da diese Flächen mit mehr Überlappung der Fräsbahnen bearbeitet werden. Allerdings ist die resultierende Bearbeitungszeit von 10 min deutlich zu hoch für eine großflächige Bearbeitung. Die Oberflächenrauheit konnte im Vergleich zur vorherigen Strategie nur gering auf  $R_a = 71$  nm verbessert werden. Die Oberfläche kann noch verbessert werden, indem die Gradzahl, um die der Fräser versetzt wird, enger gewählt wird. Allerdings erhöht sich dadurch die Bearbeitungszeit, da mehr Bahnen gefräst werden müssen, um die komplette Linse herzustellen.

Als dritte Frässtrategie wurde eine spiralförmige Fräsbahn getestet, bei der sich der Fräser spiralförmig von außen in Richtung Zentrum bewegt und in das Material eintaucht. Die Verfahrensbahn sowie eine Oberflächenmessung mittels Weißlichtinterferometrie ist in Abb. 5-6 c) abgebildet. Diese Frässtrategie wird häufig eingesetzt, wenn größere Linsen gefräst werden [23]. Ein Vorteil dieser Strategie gegenüber den vorherigen ist die deutliche Reduktion der Bearbeitungszeit. Allerdings ist die resultierende Oberflächenqualität mit  $R_a = 68$  nm nicht ausreichend für eine optische Anwendung. Die Oberflächenqualität kann noch verbessert

werden, indem die Spirale enger abgefahren wird, allerdings erhöht sich dadurch die Bearbeitungszeit. Ein Nachteil aller drei bisher beschriebenen Frässtrategien ist die Tatsache, dass für die Fräsbahnen stets drei Achsen simultan bewegt werden müssen. Um die Genauigkeit bei der Fräsbearbeitung hoch zu halten ist es allerdings empfehlenswert, möglichst wenig Achsen parallel zu bewegen, da durch jede Achse Ungenauigkeiten entstehen.

Die letzte Frässtrategie zur Herstellung einer einzelnen Mikrolinse ist das vertikale Eintauchen. Dabei wird der Fräser direkt in das Material eingetaucht, ohne eine zusätzliche Fräsbahn abzufahren. Der Vorteil dieser Strategie ist die extrem kurze Bearbeitungszeit von 1 s pro Mikrolinse. Bei dieser Frässtrategie repräsentiert die Form des Fräasers exakt die Form der resultierenden Linse. Aus diesem Grund ist die Qualität des Diamantwerkzeuges von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Mikrolinsen. Der Radius des Fräasers muss exakt dem gewünschten Mikrolinsenradius entsprechen und die Welligkeit sollte so gering wie möglich sein. Bei entsprechend hoher Qualität der Diamantfräser können allerdings sehr gute Oberflächen erzeugt werden. In den Fräsversuchen wurde eine optische Oberflächenqualität von  $R_a < 10 \text{ nm}$  erzielt. Das Messergebnis einer WLI-Messung ist in Abb. 5-6 d) abgebildet.





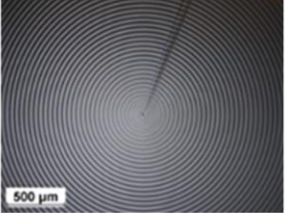
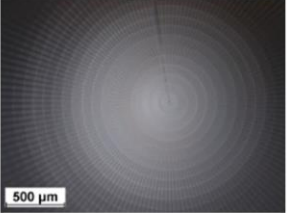
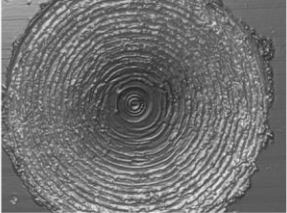
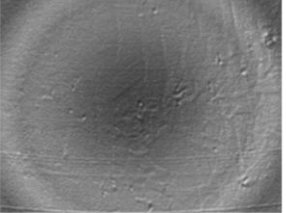
Ringförmiges Fräsen	Radial Fräsen	Spiralförmiges eintauchen	Vertikales eintauchen
			
			
$R_a = 85 \text{ nm}$	$R_a = 71 \text{ nm}$	$R_a = 68 \text{ nm}$	$R_a < 10 \text{ nm}$
6 min	10 min	1 min	1 s

Abb. 5-6: Frässtrategien zur Herstellung einer einzelnen Mikrolinse, a) ringförmiges fräsen, b) radiales fräsen, c) spiralförmiges Eintauchen und d) vertikales Eintauchen [77].

Ein Nachteil der Bearbeitungsstrategie „vertikales Eintauchen“ ist der starke Einfluss des Fräserverschleißes auf das Fräsergebnis. Eine Diamantschneide mit Ausbrüchen an der Schneidekante ist in Abb. 5-7 a) abgebildet. Sobald es zu Ausbrüchen an der Diamantschneide kommt, werden diese in allen nachfolgenden Mikrolinsen abgebildet, wie in Abb. 5-7 b) zu sehen ist. Die Ausbrüche sind in den Mikrolinsen als Riefen erkennbar. Abhängig von der Größe und Position dieser Fehlstellen können diese die Funktion des Bauteils erheblich beeinflussen oder sogar den gesamten Werkzeugeinsatz unbrauchbar machen. Aus diesem Grund muss während der Bearbeitung der Verschleiß möglichst gering gehalten

werden. Dieser kann reduziert werden, indem die Zustellung gering bleibt und Kühlmittel eingesetzt wird.

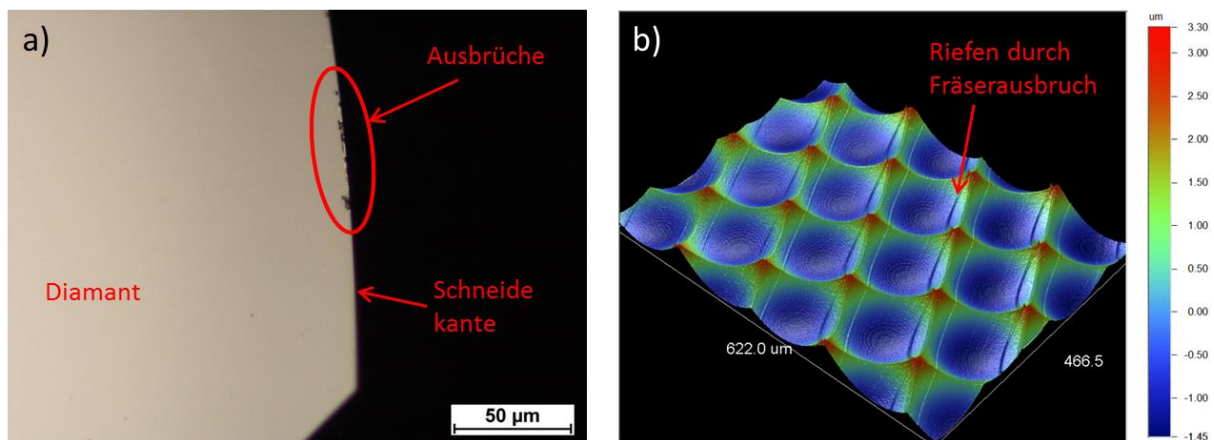


Abb. 5-7: a) Schneidekante eines Diamantfräasers mit Ausbrüchen, b) resultierende Riefen auf der Oberfläche gefräster Mikrolinsen

Eine weitere Problemstellung, die bei dieser Frässtrategie beachtet werden muss, ist die Zentrierung des Diamanten auf dem Diamantwerkzeug. Während des Herstellungsprozesses des Diamantwerkzeuges ergibt sich immer eine leichte Dezentrierung des Diamanten bezogen auf den Drehmittelpunkt des Frälerschaftes. Dies führt dazu, dass bei einem senkrechten Eintauchen des Diamantwerkzeuges in das Material in der Mitte eine Materialanhäufung zurückbleibt (siehe Abb. 5-8). Da diese Ungenauigkeit bei der Fräserherstellung nicht vollständig vermieden werden kann, muss die Dezentrierung im Fräsprozess ausgeglichen werden. Hierfür kann der Fräser in einem Anstellwinkel zum Werkzeugeinsatz positioniert werden, wodurch sich die Fräterspitze außerhalb der Linsenfläche befindet. Dies ist beispielhaft in Abb. 5-8 b) und c) dargestellt. Bei  $10^\circ$  Anstellwinkel ist die Fräterspitze aus dem Linsenzentrum entfernt, allerdings noch nicht vollständig aus dem Linsenbereich. Am unteren Teil der Linse ist die Materialanhäufung in Abb. 5-8 b) noch sichtbar. Bei der Erhöhung des Anstellwinkels auf  $20^\circ$  ist die Materialanhäufung vollständig aus dem Linsenbereich entfernt und dadurch die Dezentrierung des Diamanten ausgeglichen. Der benötigte Anstellwinkel hängt von der Höhe der Dezentrierung ab, allerdings kann der Anstellwinkel auch noch deutlich vergrößert werden. Es ist dabei nur zu beachten, dass es durch das Anstellen des Fräasers nicht zu einer Kollision des Fräasers mit dem Werkstück kommt.

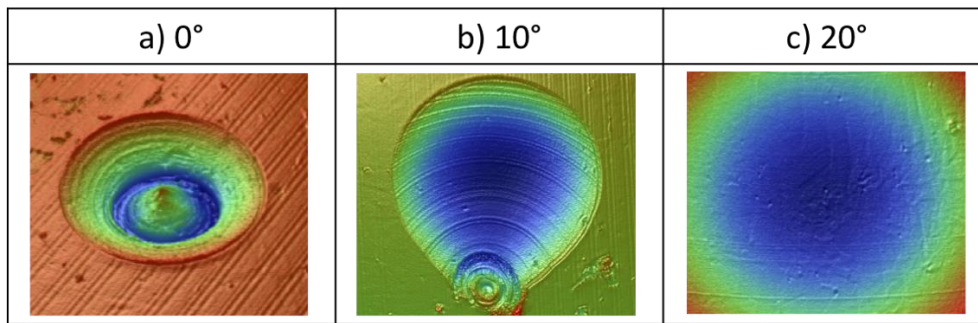


Abb. 5-8: Resultierende Mikrolinsenoberfläche in Abhängigkeit vom Anstellwinkel des Fräasers bei a) 0°, b) 10° und c) 20° gemessen mittels WLI

Aufgrund der sehr kurzen Bearbeitungszeit für eine einzelne Linse sowie der hohen Oberflächenqualität wurde die Frässtrategie „vertikales Eintauchen“ für die Herstellung des MLAs gewählt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, sind die Mikrolinsen des MLA in einem definierten Winkel von  $26,56^\circ$  angeordnet. Um die Anzahl der sich simultan bewegenden Fräsachsen gering zu halten, wurde der Werkzeugeinsatz in exakt diesem Winkel aufgespannt. Dadurch kann der Fräser so verfahren werden, dass die Mikrolinsen sich in einer horizontalen Bahn befinden. Somit werden während des Fräsens einer Bahn von Mikrolinsen nur zwei Achsen bewegt, die Z-Achse beim Eintauchen des Fräasers in das Material sowie die X-Achse beim Versetzen des Fräasers zur nächsten Mikrolinse. Die Y-Achse muss nur am Ende der Bahn bewegt werden, um eine neue Bahn von Mikrolinsen zu starten. Die verwendete Frässtrategie ist schematisch in Abb. 5-9 dargestellt. Der Fräser wird für die Bearbeitung, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, in einem Winkel von  $20^\circ$  zum Werkzeugeinsatz angestellt.

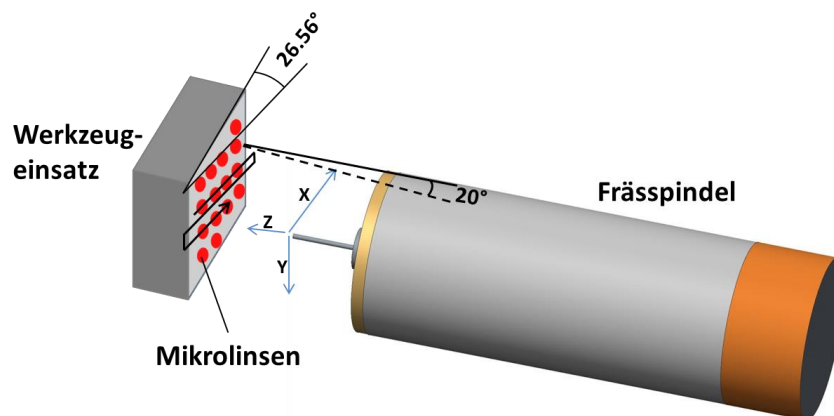


Abb. 5-9: Schematische Darstellung der Frässtrategie zur Herstellung eines MLA-Werkzeugeinsatzes

Wie bereits beschrieben ist bei der verwendeten Frässtrategie die Qualität des Diamantfräasers von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurde für die Herstellung des MLA-Werkzeugeinsatzes ein maßgenauer Diamantfräser hergestellt (Contour Fine Tooling, Niederlande). Der Fräser besitzt einen gemessenen Radius von 0,9993 mm (Soll-Radius

1 mm) bei einer Welligkeit < 50 nm. Für die Bearbeitung wurde eine Spindeldrehzahl von 70.000 1/min verwendet bei einer Zustellung von 9 µm. Der Vorschub während des Eintauchens betrug 2,5 mm/min und 50 mm/min beim Positionieren des Fräasers. Dadurch resultiert eine Bearbeitungszeit von ca. 1 s pro Mikrolinse und eine Gesamtbearbeitungszeit für alle 12.000 Mikrolinsen von 4,5 h. Die Frässpindel hatte für die Bearbeitung eine Vorlaufzeit von 1 min, um eine konstante Temperatur zu erreichen und eine thermische Ausdehnung der Spindel während des Fräsprozesses zu verhindern. Die Fräsparameter sind in Tab. 5-2 zusammengefasst.

**Tab. 5-2: Fräsparameter zur Herstellung des MLA-Werkzeugeinsatzes mittels UP-Fräsen**

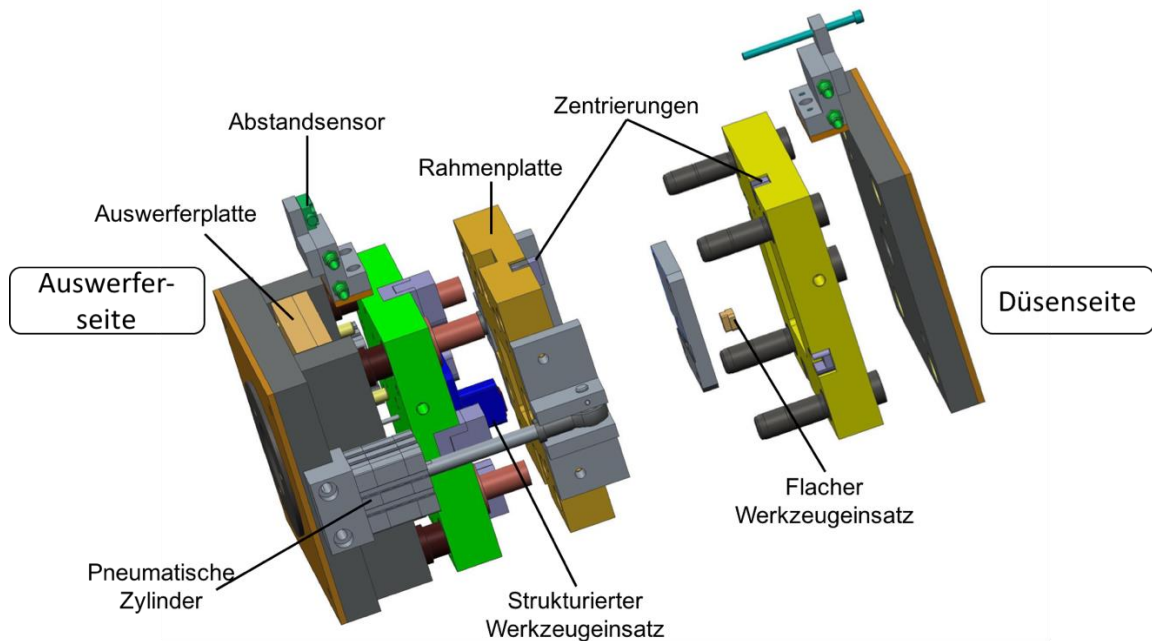
<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Drehgeschwindigkeit Spindel [1/min]	70.000
Zustellung [µm]	9
Vorschub [mm/min]	
• Eintauchen	2,5
• Schlichten	5
Vorlaufzeit [min]	10
Fräserradius [mm]	0,9993

## **5.2.2 Werkzeugbau/Integrationstechnik**

Zur Replikation der MLAs wurde ein Spritzprägewerkzeug hergestellt. Das Werkzeug ist dabei als Hauptachsen-Prägewerkzeug mit beweglicher Rahmenplatte aufgebaut und entspricht dem in den Grundlagen beschriebenen Werkzeugkonzept, welches in Abb. 3-19 b) dargestellt ist. Eine CAD-Darstellung des Werkzeuges ist in Abb. 5-10 dargestellt. Das Werkzeug besitzt zwei Werkzeugeinsätze, die mittels Ultrapräzisionsbearbeitung hergestellt wurden, einen flachen Werkzeugeinsatz, der die Rückseite des MLA bildet, welcher mittels Ultrapräzisions-Fly-Cutting hergestellt wurde, sowie den mikrostrukturierten Werkzeugeinsatz, der die MLA Struktur enthält. Dieser Einsatz bildet den beweglichen Prägestempel im Werkzeug, welcher im Prozess eingesetzt wird, um die Prägekraft aufzubauen. Der genaue Ablauf des Spritzprägeprozesses wird im nachfolgenden Kapitel (5.2.3) beschrieben. Wie bereits erwähnt, besitzt das Werkzeug eine Rahmenplatte, welche über pneumatische Zylinder betrieben wird. Diese Rahmenplatte ist nötig, um die Kavität im Spritzgusswerkzeug zu schließen und eine nachstehende Verdichtung der Kavität durch den Kompressionsstempel zu ermöglichen. Um den Prägeprozess exakt kontrollieren zu können, besitzt das Werkzeug einen zusätzlichen induktiven Abstandssensor (IWF 18U7504/S35A, Baumer GmbH, Deutschland) welcher mit der Spritzgussanlage verbunden ist. Dieser misst den Abstand der beiden Werkzeughälften zueinander. Der Sensor wird durch ein eigenständiges Temperiergerät gekühlt, um temperaturbedingte Änderungen des Abstandes zu verhindern. Die genaue Abstandsmessung ist notwendig, um einen präzisen und reproduzierbaren Spritzprägeprozess



zu gewährleisten. Weitere wichtige Komponenten des Werkzeuges sind Zentrierungen für ein exaktes Zusammenfahren der Werkzeughälften sowie die Auswerferplatte mit Auswerferstiften zum Auswerfen des fertigen MLAs. Insgesamt ist das Werkzeug mit vier unabhängigen externen Temperiergeräten ausgerüstet. Neben der Temperierung des Abstandssensors sind jeweils auch die beiden Werkzeughälften sowie der strukturierte Werkzeugeinsatz separat über Wasserkühlung temperiert.



**Abb. 5-10: CAD-Darstellung des Spritzprägewerkzeuges zur Herstellung eines MLA [32]**

Beim Zusammenbau des Werkzeuges ist insbesondere die Integration der beiden Werkzeugeinsätze von entscheidender Bedeutung. Die Positionierung der beiden Einsätze zueinander muss sehr präzise eingestellt sein. Für den beweglichen Werkzeugeinsatz ist es zusätzlich wichtig, dass dieser sich frei bewegen kann, um ein Verkleben des Einsatzes zu verhindern. Um die optischen Oberflächen beider Einsätze während der Integration in das Werkzeug zu schützen, werden diese mit einem Polymerfilm bedeckt (First Contact<sup>TM</sup>, Mountain Photonics, Deutschland). Die beiden Werkzeughälften im aufgebauten Zustand sind in Abb. 5-11 dargestellt.

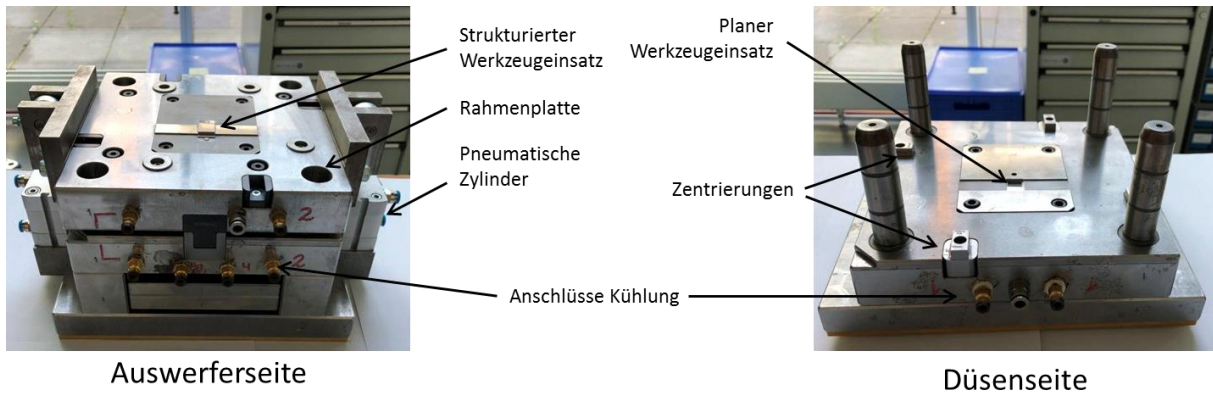


Abb. 5-11: Auswerferseite und Düsenseite des Spritzprägwerkzeuges zur Herstellung eines MLAs mit integrierten Werkzeugeinsätzen

### 5.2.3 Spritzprägen

Die Replikation der MLAs mittels Spritzprägen wurde auf einer Allrounder 370A Spritzgussanlage (Arburg GmbH & Co KG, Deutschland) durchgeführt. Das Werkzeug sowie die Plastifiziereinheit sind dabei horizontal angeordnet. Die Anlage besitzt eine maximale Zuhaltkraft von 60 t. Die Plastifiziereinheit verfügt über insgesamt fünf Temperaturzonen die getrennt voneinander über die Maschinensteuerung kontrolliert werden können. Zusätzlich ist der Materialeinzug temperiert. In Abb. 5-12 ist eine entsprechende Spritzgussanlage mit zwei Plastifiziereinheiten abgebildet.



Abb. 5-12: Arburg Allrounder 370A mit zwei Plastifiziereinheiten

Für die Herstellung der MLAs wurde das Material Zeonex COP 330R (Zeon Cooperation, Japan), verwendet. Neben den guten optischen Eigenschaften weist das Material eine geringe Eigenfluoreszenz auf. Dies ist ein entscheidender Faktor für den Einsatz des fertigen MLAs in einem hyperspektralen Kamerasystem. Zusätzlich besitzt das Material eine geringe Wasseraufnahme, geringe Doppelbrechung und eine hohe Abformgenauigkeit [150].

Tab. 5-3: Materialeigenschaften von Zeonex COP 330R [151,152]

Parameter	Wert
Optische Eigenschaften	
• Lichttransmission [%]	> 90
• Transmission bei 400 nm [%]	> 80
• Brechungsindex	1.509
• Eigenfluoreszenz [a.u.]	164 @270 nm
Verarbeitungskenndaten Spritzguss	
• Werkzeugtemperatur [°C]	90-125
• Schmelzetemperatur [°C]	230-260
• Einspritzdruck [bar]	490-1470

Der Prozessablauf beim Spritzprägen von optischen Komponenten ist komplex und bedarf präziser Kontrolle und Koordination aller Prozessparameter. Der Ablauf zur Herstellung des MLAs ist in Abb. 5-13 dargestellt. Der durchgeführte Ablauf kann in fünf größere Prozessschritte unterteilt werden. Zu Beginn des Spritzprägezyklus befindet sich das Werkzeug in einem geöffneten Zustand. Dabei sind die bewegliche Rahmenplatte und der strukturierte Werkzeugeinsatz (Prägestempel) in einer hinten stehenden Position. D.h. beide Komponenten haben noch keine Vorwärtsbewegung durchgeführt. Im zweiten Prozessschritt bewegt sich die Rahmenplatte nach vorne, d.h. die Platte wird mittels der pneumatischen Zylinder in Richtung Düsenseite bewegt. Der Prägestempel verbleibt dabei in einer hinten stehenden Position. Im dritten Prozessschritt wird das Werkzeug geschlossen. Die vorgeschobene Rahmenplatte schließt dabei die Kavität und ermöglicht so das Einspritzen von Material bei hinten stehendem Prägestempel. Dies ist notwendig, da das Bauteil nur eine Dicke von 500 µm besitzt. Dadurch kühlt das Material schnell ab und erstarrt, bevor die Kavität vollständig gefüllt ist. Um dies zu verhindern, wird die Kavität zu Beginn des Einspritzvorgangs vergrößert, indem der Prägestempel in einer hinten stehenden Position verbleibt. Im vierten Prozessschritt beginnt der Prägevorgang. D.h., nach einer definierten Verzögerung nach dem Beginn des Einspritzens wird der Prägestempel nach vorne bewegt. Dabei wird die Kavität verkleinert und das entstehende Bauteil auf das Soll-Maß von 500 µm komprimiert. Zusätzlich wird ein homogener Druck im eingespritzten Material erzeugt, was zu einer gleichmäßigen Dichteverteilung im Bauteil führt. Dadurch wird die Doppelbrechung reduziert [153]. Parallel dazu wird über die Einspritzeinheit ein Nachdruck aufgebracht. Dieser soll verhindern, dass die Schmelze durch die Prägekraft wieder aus der Kavität gedrückt wird und zusätzlich die Schwindung beim Abkühlen des Materials kompensieren. Im Anschluss beginnt die Kühlphase, in der das Bauteil so weit abgekühlt wird, bis es ausgeworfen werden kann, ohne durch den Prozess verformt zu werden. Im letzten Prozessschritt des Spritzprägezyklus wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil ausgeworfen.

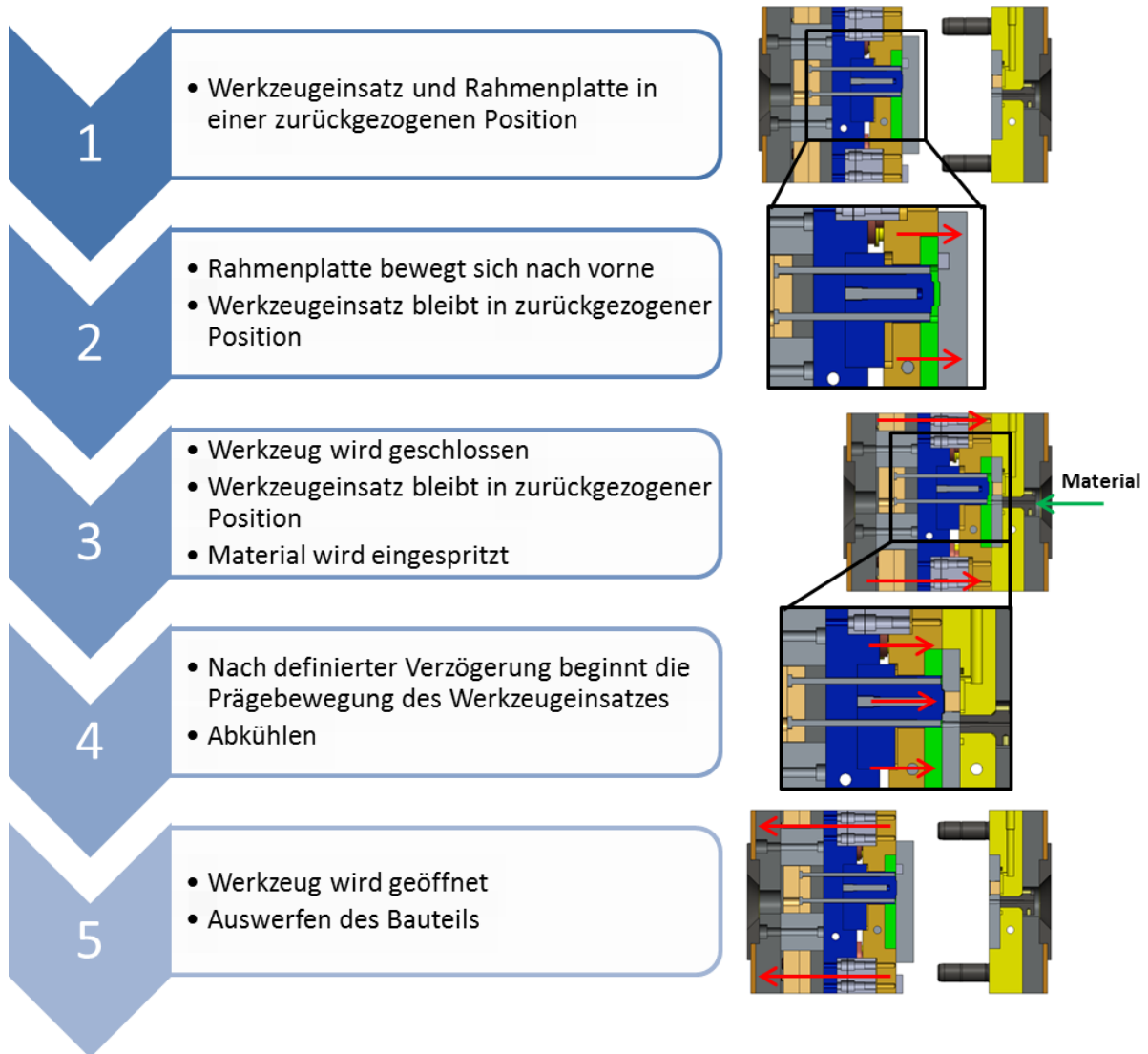


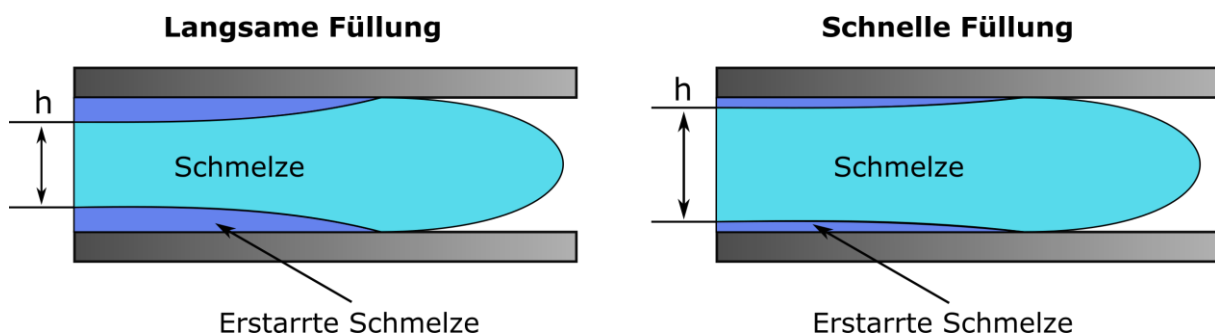
Abb. 5-13: Ablauf des Spritzprägeprozesses zur Herstellung des MLAs [32]

Die Zykluszeit betrug 28 s, wobei an dieser Stelle erwähnt werden muss, dass der Prozess nicht auf eine kurze Zykluszeit optimiert wurde. Der Fokus des Spritzprägeprozesses lag auf einer hohen Formgenauigkeit des Bauteils sowie einer vollständigen Abformung der Mikrostrukturen. Für den Prozess wurde eine Schmelztemperatur von 265 °C verwendet, was geringfügig über der empfohlenen maximalen Temperatur von 260 °C liegt. Die exakten Temperaturen in den fünf Zonen der Plastifiziereinheit sind in Tab. 5-4 aufgelistet.

**Tab. 5-4: Prozessparameter zur Herstellung von MLAs mittels Spritzprägen**

Parameter	Wert
Schmelzetemperatur [°C]	235/250/265/265/255/65
Werkzeugtemperatur [°C]	
• Düsenseite	120
• Auswerferseite	120
• Prägestempel	120
Nachdruck [bar]	300
Einspritzdruck [bar]	1250-1400
Einspritzzeit [s]	0,08
Prägekraft [kN]	15
Zykluszeit [s]	28

Der Materialeinzug wurde auf 65 °C temperiert, um konstante Bedingungen beim Aufschmelzen des Materials zu gewährleisten. Das Spritzprägewerkzeug wurde konstant auf 120 °C über eine externe Wasserkühlung temperiert. Die Einspritzzeit betrug 0,08 s bei einem Einspritzdruck von 1250-1400 bar. Eine schnelle Füllung der Kavität führt zu einem langsameren Erstarren der Schmelze in den Bereichen, an denen die Schmelze mit dem Werkzeug in Kontakt ist, da neben einer geringeren Zeit zum Erstarren durch die höhere Fließgeschwindigkeit Scherwärme entsteht, die den Abkühlprozess verlangsamt [154], wie in Abb. 5-14 dargestellt. Anschließend wurde ein Nachdruck von 300 bar aufgebracht. Die maximale Prägekraft betrug ca. 15 kN. Eine detaillierte Analyse des Spritzprägeprozesses wird in Kapitel 5.3.2 beschrieben.



**Abb. 5-14: Abkühlen der Schmelze an der Werkzeugwand in Abhängigkeit von der Füllgeschwindigkeit**

## 5.3 Ergebnisse

### 5.3.1 Charakterisierung der Werkzeugeinsätze für die Herstellung eines Mikrolinsenarrays

Für die Herstellung der Werkzeugeinsätze wurden zwei Fly-Cutting Prozesse durchgeführt. Für den Werkzeugeinsatz mit der Planfläche musste eine Fläche von 15 x 13 mm<sup>2</sup> bearbeitet werden. Dadurch, dass der Durchmesser des Fly-Cutting Werkzeugs größer ist als

der Werkzeugeinsatz, kann die gesamte Oberfläche mit einer Überfahrt bearbeitet werden. Die resultierende Oberfläche erzeugt später im Bauteil die Oberfläche auf der Rückseite des MLAs. Daher ist für diese Oberfläche eine optische Qualität notwendig. Der Werkzeugeinsatz nach der Fly-Cutting Bearbeitung ist in Abb. 5-15 a) dargestellt. Die Oberflächenrauheit wurde mittels WLI untersucht und auf  $R_a = 12 \text{ nm}$  bestimmt. Ein 2D-Profil der Messung ist in Abb. 5-15 b) zu sehen.

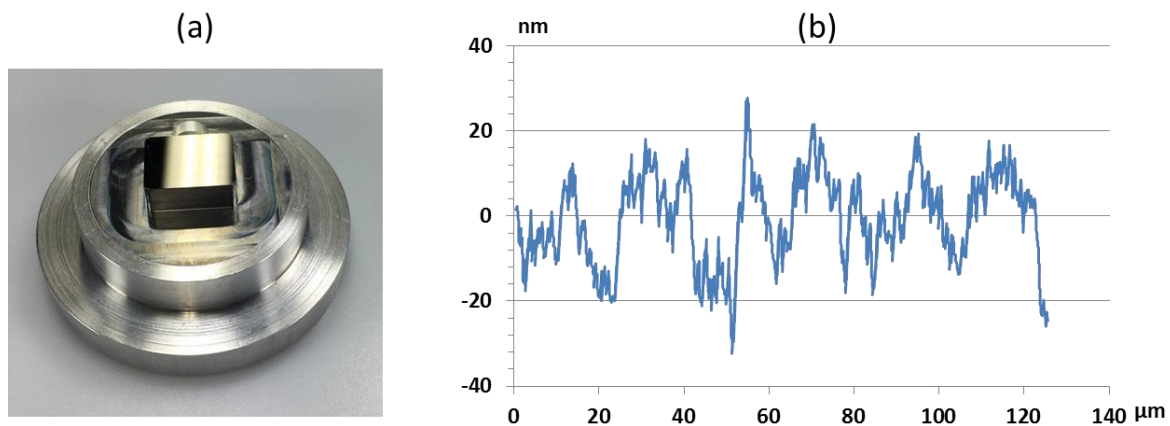


Abb. 5-15: a) Werkzeugeinsatz mit Planfläche nach dem Fly-Cutting-Prozess b) Rauheitsprofil gemessen mittels WLI [32]

Anschließend wurde auch der zweite Werkzeugeinsatz mittels Fly-Cutting bearbeitet. Dieser Bearbeitungsschritt ist die Vorbearbeitung des Werkzeugeinsatzes für die nachfolgende Mikrostrukturierung mittels UP-Fräsen, bei dem die Mikrolinsen eingebracht werden. Hierfür ist es notwendig, dass die zu strukturierende Fläche plan ist, um gleichmäßige Mikrolinsen über die gesamte Fläche zu erhalten. Eine unebene Fläche würde dazu führen, dass die Mikrolinsen unterschiedlich stark ausgeprägt wären, was die optische Funktionalität des späteren Bauteils beeinträchtigen würde. Für den Fly-Cutting-Prozess wurden dieselben Bearbeitungsparameter verwendet, wie bei dem vorherigen Prozess. Die genauen Bearbeitungsparameter sind in Tab. 5-1 aufgelistet. Wie zu erwarten, ist die resultierende Oberflächenqualität mit  $R_a = 12 \text{ nm}$  gleich wie beim ersten Werkzeugeinsatz. Die Oberflächenrauheit wurde mittels WLI vermessen. Die Messergebnisse sind in Abb. 5-16 abgebildet.

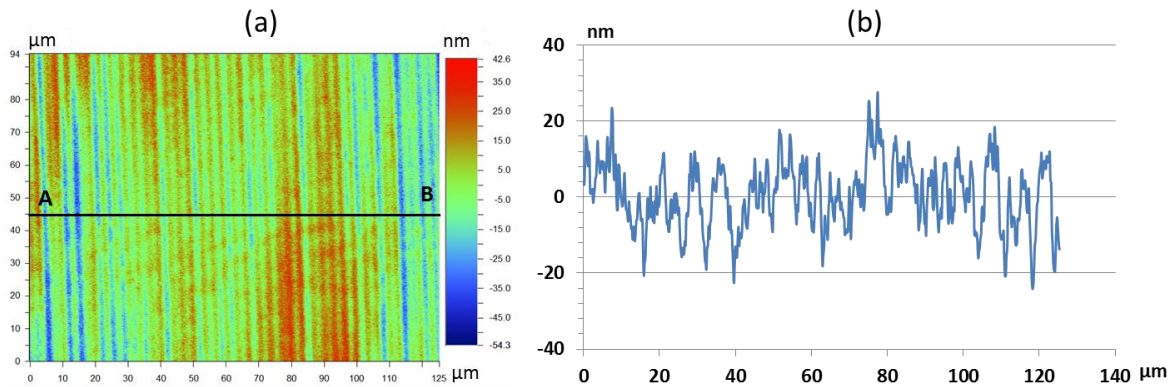


Abb. 5-16: a) Oberflächenmessung des Werkzeugeinsatzes nach der Fly-Cutting-Bearbeitung mittels WLI, b) extrahiertes 2D-Profil entlang von AB [32]

Im Anschluss an den Fly-Cutting-Prozess wurden die Mikrolinsen mittels UP-Fräsen in den Werkzeugeinsatz eingebracht. Die Frässtrategie sowie die Fräsparameter wurden bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Die Bearbeitungszeit für die Strukturierung der gesamten Fläche von  $13 \times 15 \text{ mm}^2$  betrug 4,5 h. Der strukturierte Werkzeugeinsatz ist in Abb. 5-17 a) abgebildet. Nach der Bearbeitung wurden die Mikrolinsen mittels WLI und Laser-Autofokus-Messung (LAM, MLP-3, Mitaka Kohki, Japan) vermessen. Abb. 5-17 b) zeigt einen Ausschnitt des MLAs, gemessen mittels WLI. Dabei ist zu sehen, dass die Mikrolinsen gleichmäßig verteilt sind und eine homogene Oberfläche besitzen. Zur Bestimmung der Rauheit einer einzelnen Mikrolinse ohne Einfluss der Linsenform wurde aus der Messung ein 2D-Profil extrahiert und die Krümmung sowie die Welligkeit mathematisch herausgerechnet. Die resultierende Rauheit beträgt  $R_a = 4 \text{ nm}$  mit einer Rautiefe von  $R_t = 28 \text{ nm}$  und ist in Abb. 5-17 c) dargestellt. Für die Bestimmung der Formgenauigkeit wurde der Radius einer einzelnen Mikrolinse mittels LAM gemessen und mit dem Soll-Radius von  $1 \text{ mm}$  verglichen. Die Formabweichung beträgt P-V  $39,5 \text{ nm}$  (Peak-Valley). Die Messung der Formabweichung erwies sich als aussagekräftiger als eine reine Messung des IST-Radius, da diese Messung von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, wodurch starke Ungenauigkeiten in die Berechnung des Radius einfließen. Insbesondere die Oberflächenrauheit und die Messungenauigkeiten beeinflussen das Ergebnis signifikant, da von einem kleinen Messausschnitt auf einen großen Radius rückgeschlossen wird. Dadurch kann es zu deutlichen Abweichungen vom Soll-Radius kommen, welche sich im realen Bauteil allerdings nicht so extrem abbilden.

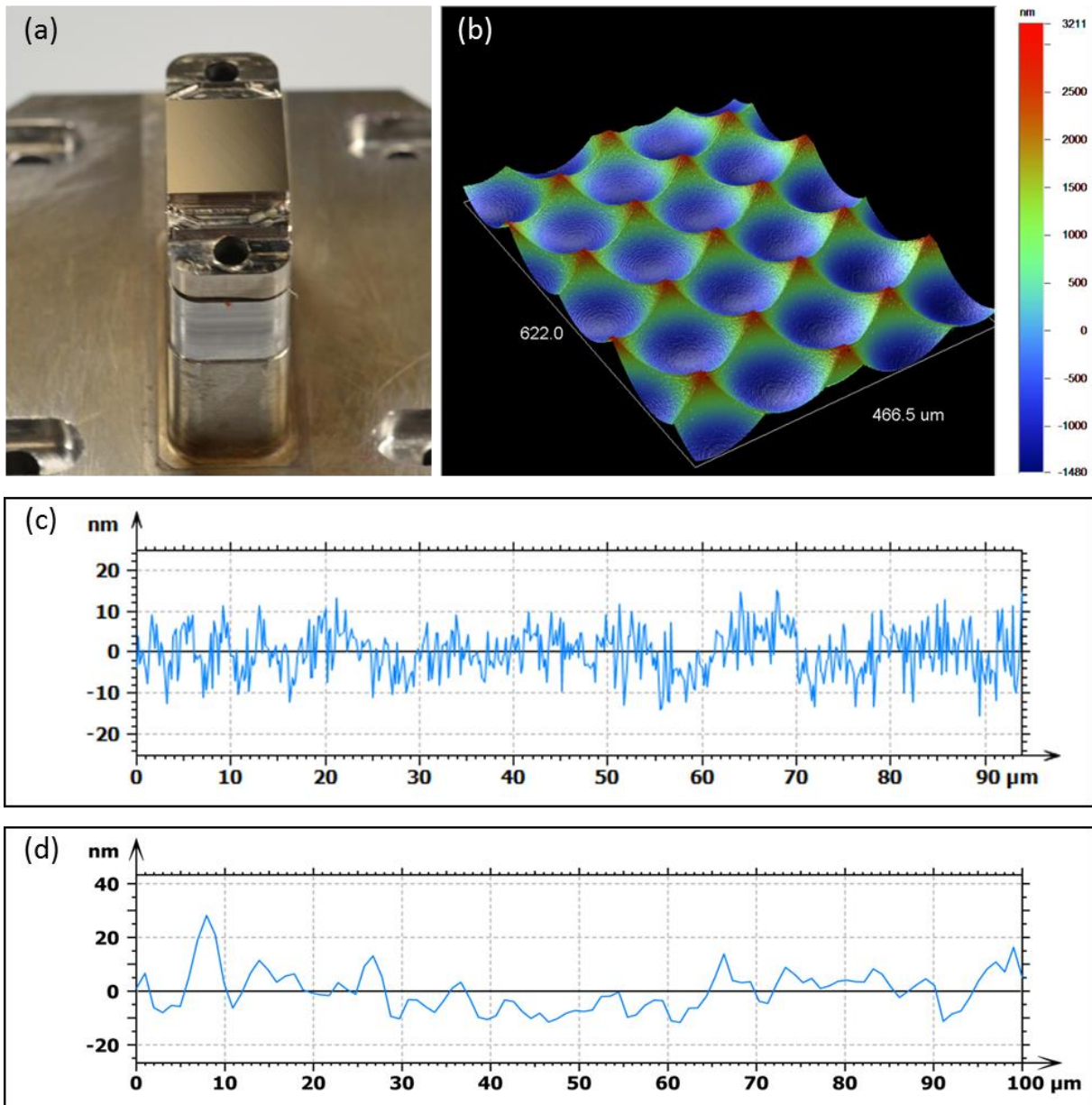


Abb. 5-17: a) Strukturierter Werkzeugeinsatz nach dem UP-Fräsen, b) WLI-Messung des MLA auf dem Werkzeugeinsatz, c) Rauheitsmessung einer einzelnen Mikrolinse mittels WLI mit einer resultierenden Rauheit von  $R_a = 4 \text{ nm}$  und d) Formabweichung einer einzelnen Mikrolinse vom Soll-Radius gemessen mittels LAM [32]

Der Abstand zwischen den einzelnen Mikrolinsen von  $127,5 \text{ }\mu\text{m}$  wurde erreicht. Der gemessene Abstand liegt bei  $127,3 \text{ }\mu\text{m}$ , wobei die Abweichung zwischen Soll und Ist allerdings im Bereich der Messungenauigkeit des Messgerätes liegt. Die Messung mittels WLI sowie ein extrahiertes 2D-Profil zur Bestimmung des Abstandes sind in Abb. 5-18 dargestellt.



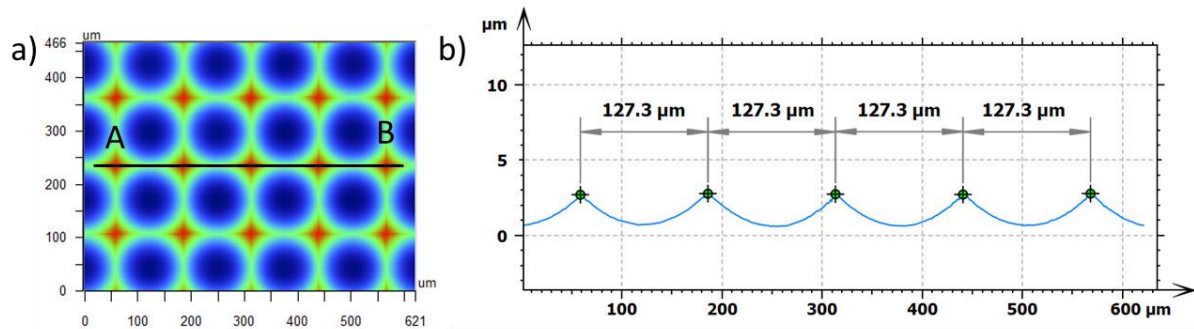
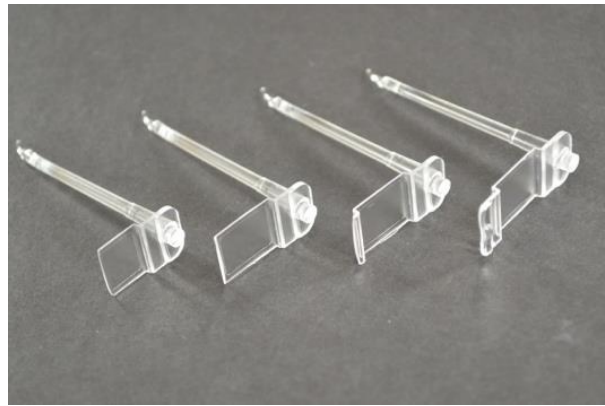


Abb. 5-18: a) WLI-Aufnahme der Mikrolinsen auf dem Werkzeugeinsatz, b) extrahiertes 2D-Profil an der Stelle AB zur Bestimmung des Linsenabstandes mit 127,3 µm

### 5.3.2 Ergebnisse des Spritzprägeprozesses zur Herstellung eines Mikrolinsenarrays

Zum Einrichten des Spritzprägeprozesses wurde zuerst mit einem regulären Spritzgussprozess ohne zusätzliche Prägebewegung gestartet. Dabei können das Füllverhalten der Kavität sowie erste Prozessparameter bestimmt werden. Im Anschluss wird die Prägebewegung mit in den Prozess integriert und die Prozessparameter angepasst. Diese Vorgehensweise hat sich bewährt, um einen Spritzprägeprozess schnell einzurichten, da die Qualität der Bauteile von sehr vielen Faktoren beeinflusst wird. Das Aufteilen der Prozesseinrichtung in zwei Phasen vereinfacht daher den Optimierungsprozess. Dabei wurden die Prozessparameter so optimiert, dass das Füllverhalten und die Abformgenauigkeit das bestmögliche Resultat ergaben. Die Optimierung der Zykluszeit war in dieser Arbeit keine Zielgröße. Anhand einer klassischen Füllstudie, die in einem reinen Spritzgussprozess erstellt wird, kann das Füllverhalten der Kavität analysiert werden. Dabei wird die Dosierung des Materials langsam gesteigert, wodurch ein immer größerer Teil der Kavität gefüllt wird. Eine Füllstudie wird durchgeführt, um das Fließverhalten der Schmelze in der Kavität zu analysieren. In Abb. 5-19 ist zu sehen, dass die Kavität von einer gleichmäßigen Fließfront in Form eines Quellflusses gefüllt wird. Dies entspricht dem gewünschten Fließverhalten. Allerdings besitzen die abgebildeten Bauteile noch nicht die geforderte Bauteildicke von 500 µm, sondern sind dicker. Die vollständige Füllung der Kavität bei gleichzeitigem Einhalten der Bauteildicke ist allerdings nur mit einem Spritzprägeprozess möglich.



**Abb. 5-19: Füllstudie MLA**

Der entscheidende Faktor für diesen Spritzprägeprozess ist die Koordination zwischen dem Einspritzvorgang und der Prägebewegung des Prägestempels. Durch die geringe Bauteildicke von 500  $\mu\text{m}$  kommt es zu einem schnellen Abkühlen und Erstarren der Schmelze. Der Prägeprozess ist aber nur erfolgreich, wenn die Schmelze komprimiert wird, bevor sie abgekühlt ist. Ansonsten wird teilweise erstarrtes Material bewegt und verformt, was zu ungleichmäßiger Materialdichte und Fließmarken im Bauteil führt. Dadurch sind die optischen Eigenschaften des Bauteils deutlich beeinträchtigt und die Qualität nicht ausreichend für eine abbildende Optik. Aus diesem Grund resultiert aus der geforderten dünnen Bauteildicke nur ein schmales Prozessfenster, in dem eine erfolgreiche Replikation der MLAs möglich ist. Der Prozessablauf des Spritzprägeprozesses ist in Kapitel 5.2.3 (Abb. 5-13) beschrieben.

Wie bereits erwähnt, ist das Füllen der Kavität durch die begrenzte Bauteildicke eingeschränkt. Aus diesem Grund wird der Prägestempel vor der Einspritzphase 900  $\mu\text{m}$  vor der Endposition in einer hinten stehenden Position positioniert. Dadurch vergrößert sich die Dicke der Kavität, was das Füllverhalten deutlich verbessert. Die Einspritzphase dauert nur 0,08 s. 0,7 s nach Beginn der Einspritzphase beginnt der Prägeprozess, d.h. das Material ist bereits vollständig eingespritzt. Dabei ist zu beachten, dass die Kavität dennoch noch nicht vollständig gefüllt ist. Erst durch die Prägebewegung wird das Material vollständig in der Kavität verteilt. Daher ist die Abstimmung zwischen Startposition des Prägestempels und Verzögerungszeit des Prägevorgangs entscheidend für die resultierende Bauteilqualität. Startet der Prägeprozess zu spät, kann der Prägestempel die gewünschte Endposition nicht mehr erreichen, da das Material bereits zu stark abgekühlt ist. Startet der Prägevorgang hingegen zu früh, wird die Kavität zu schnell verengt und die Schmelze kann nicht die komplette Kavität füllen. Um das Füllverhalten zu unterstützen, wurde das Material bei hohen Temperaturen aufgeschmolzen, wodurch es fließfähiger wird. Mit einer Temperatur von 265  $^{\circ}\text{C}$  liegt die Schmelzentemperatur 5  $^{\circ}\text{C}$  über der empfohlenen Temperatur (Tab. 5-3). Es konnte dadurch keine Beeinträchtigung des Materials festgestellt werden. Ebenso wurde die Werkzeugtemperatur mit 120  $^{\circ}\text{C}$  nahe der Obergrenze eingestellt, um den Abkühlprozess der Schmelze zu verlangsamen.

Im Gegensatz zur Füllung der Kavität und dem Einhalten der geforderten Bauteildicke stellt die Abformung der Mikrolinsen keine größere Herausforderung dar. Da die Mikrolinsen mit ca. 4  $\mu\text{m}$  Bauteiltiefe bei einem Durchmesser von 127,5  $\mu\text{m}$  relativ flach sind und ein geringes Aspektverhältnis besitzen, erweist sich die Abformung als einfach. Die reine Abformung der Mikrolinsen wäre in diesem Fall sogar ohne einen Spritzprägeprozess möglich. Ein abgeformtes MLA mit der geforderten Bauteildicke ist in Abb. 5-20 abgebildet. An diesem Bauteil ist der Anguss noch nicht entfernt worden. Hierfür ist eine Sollbruchstelle im Bauteil vorgesehen, um das Abtrennen des Angusses zu erleichtern.



Abb. 5-20: Spritzgeprägtes MLA, bevor der Anguss entfernt wurde [32]

### 5.3.3 Charakterisierung der spritzgeprägten Mikrolinsenarrays

Die spritzgeprägten MLAs wurden mittels WLI und LAM analysiert. Dabei wurde der Fokus insbesondere auf die Abformgenauigkeit und Rauheit der Mikrolinsen sowie die Formgenauigkeit des gesamten Bauteils gelegt.

Eine Vermessung der abgeformten Mikrostrukturen durch WLI zeigt eine gleichmäßige Verteilung der Mikrolinsen (Abb. 5-21). Dies war zu erwarten, da die Positionierung der Mikrolinsen maßgeblich vom Werkzeugeinsatz abhängig ist, bei dem die Positionierung schon als sehr gut nachgewiesen wurde (Kapitel 5.3.1).

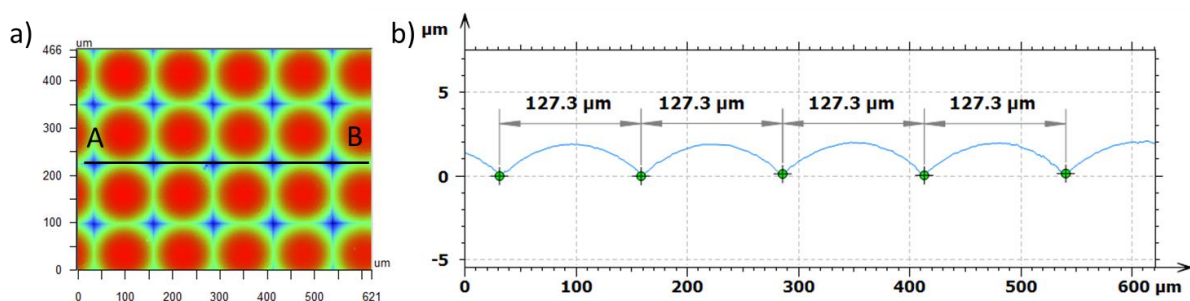


Abb. 5-21: a) Mikrolinsen auf einem spritzgeprägten MLA gemessen mittels WLI, b) extrahiertes 2D-Profil an der Stelle AB

Die Formgenauigkeit der einzelnen Mikrolinsen wurde mittels LAM analysiert. Eine beispielhafte Messung einer Einzellinse ist in Abb. 5-22 b) zu sehen. Die Strukturtiefe von ca.

4  $\mu\text{m}$  wird vollständig abgeformt. Aus der Messung einer einzelnen Mikrolinse wurde ein 2D-Profil extrahiert und damit die Formabweichung vom geforderten Soll-Radius (1 mm) gemessen. Die Formabweichung ist in Abb. 5-22 c) dargestellt und beträgt  $P-V = 80 \text{ nm}$ . Damit hat sich die Formabweichung im Vergleich zum Werkzeugeinsatz etwas verschlechtert, allerdings ist die Formabweichung im Sub-Mikrometerbereich nach wie vor sehr gut. Mit der gleichen Herangehensweise wie beim Werkzeugeinsatz wurde die Rauheit der einzelnen Mikrolinsen mittels WLI bestimmt. Die resultierende Rauheit beträgt  $R_a = 6 \text{ nm}$ . Das entsprechende Rauheitsprofil ist in Abb. 5-22 d) dargestellt. Durch einen Rauheitswert von  $< 10 \text{ nm}$  ist das Bauteil gut für eine Anwendung mit optischer Abbildung geeignet. Neben der Formgenauigkeit der Mikrolinsen und deren Rauheit ist insbesondere die Planarität des Gesamtbauteils für die spätere Anwendung von entscheidender Bedeutung. Krümmungen und Verzüge im Gesamtbauteil führen dazu, dass der Fokuspunkt der Mikrolinsen variiert, wodurch die Abbildung unscharf wird. Die Planarität des gesamten Bauteils wurde mittels LAM vermessen. Dabei wurde die Messung in drei Messabschnitte aufgeteilt und die Einzelmessungen anschließend zusammengesetzt. Dieses Vorgehen war notwendig, da bei der LAM das System nur in den einzelnen Teilabschnitten den Laserfokus aufrecht halten konnte. In den steil abfallenden Bereichen der Halterungen (vgl. Abb. 5-1) verliert das System den Fokuspunkt durch die Transparenz des Bauteils. Das Messergebnis ist in Abb. 5-22 e) zu sehen. Der Winkel zwischen den Halterungsflächen und dem Bereich des MLA wurde mit  $0,07^\circ$  gemessen, was einer geringen Abweichung entspricht. Durch den geringen Winkel wird keine Beeinflussung der optischen Funktionsfähigkeit erwartet.

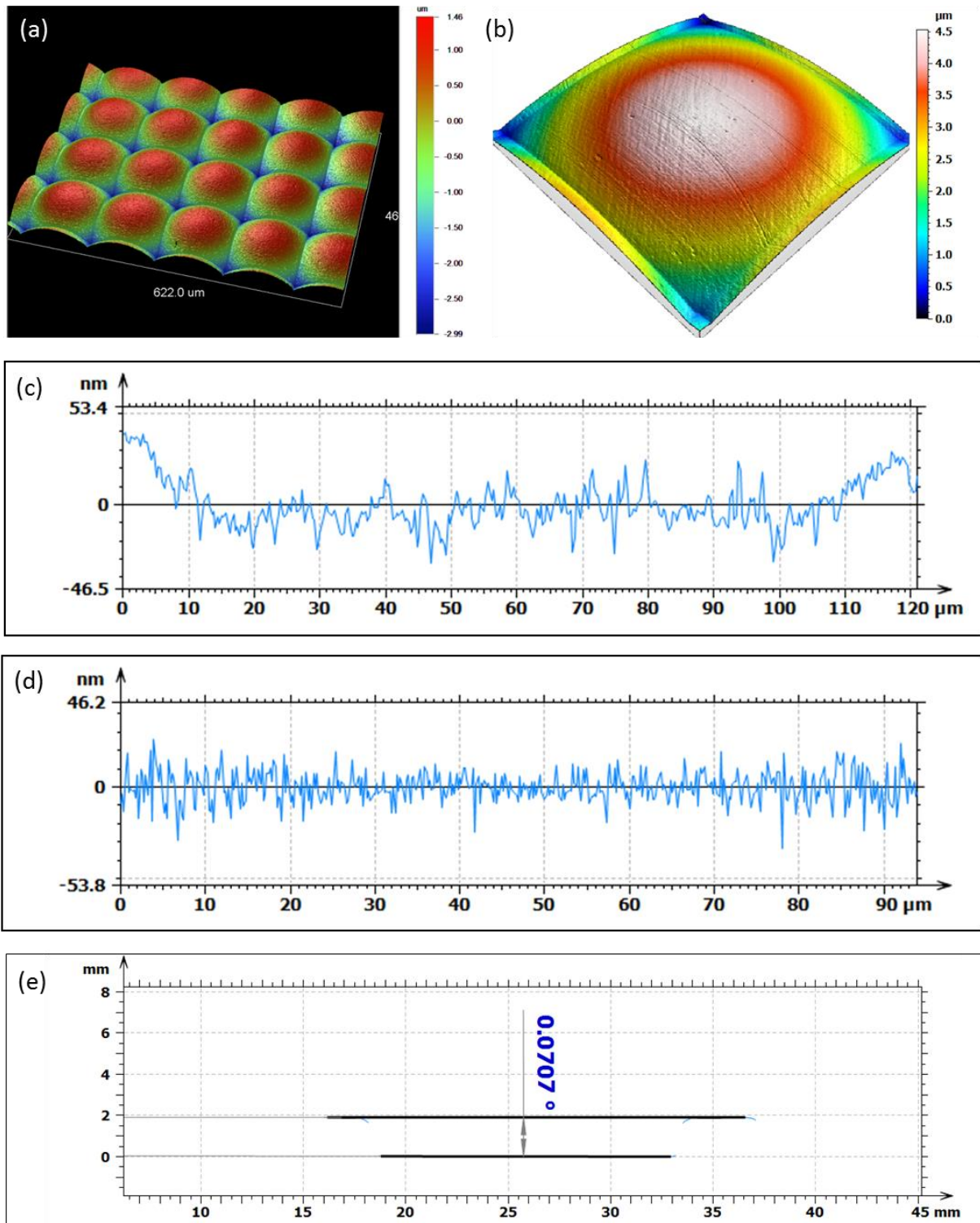


Abb. 5-22: a) WLI-Messung der abgeformten Mikrolinsen, b) 3D-Messung einer einzelnen Mikrolinse mittels LAM, c) Formabweichung einer einzelnen Mikrolinse vom Soll-Radius gemessen mittels LAM, d) Rauheitsmessung einer Mikrolinse durch WLI, e) Planarität zwischen strukturierter MLA-Fläche und Halterungsstrukturen eines spritzgeprägten MLAs [32]

### 5.3.4 Demonstration der Funktionsfähigkeit der Mikrolinsenarrays in einem hyperspektralen Kamerasystem

Die Funktionsweise des spritzgeprägten MLAs sollte in einem hyperspektralen Kamerasystem demonstriert werden. Hierzu wurde das MLA mit einem optischen Brechungsgitter versehen, um eine Aufspaltung des Lichtes zu erzeugen. Als Beugungsgitter wurde ein kommerzielles Transmissionsgitter aus Glas verwendet (GT13-06V, Thorlabs Inc., USA). Die zusammengesetzten Komponenten wurden anschließend in ein Kamerasystem integriert (Proscilica GE 1650, Allied Vision Technologies GmbH, Deutschland). Der Abstand des MLA zur Oberfläche des CCD-Chips durfte nur 325  $\mu\text{m}$  betragen. Da jedoch der CCD-Chip in der ausgewählten Kamera in einer Vertiefung positioniert ist, mussten die Halterungen des MLA so konzipiert sein, dass das MLA in die Vertiefung eintauchen konnte. Das Konzept des hyperspektralen Kamerasystems ist in Abb. 5-23 dargestellt. Das Optikdesign wurde dabei vom Institut für Laser in der Medizin in Ulm (ILM) erstellt.

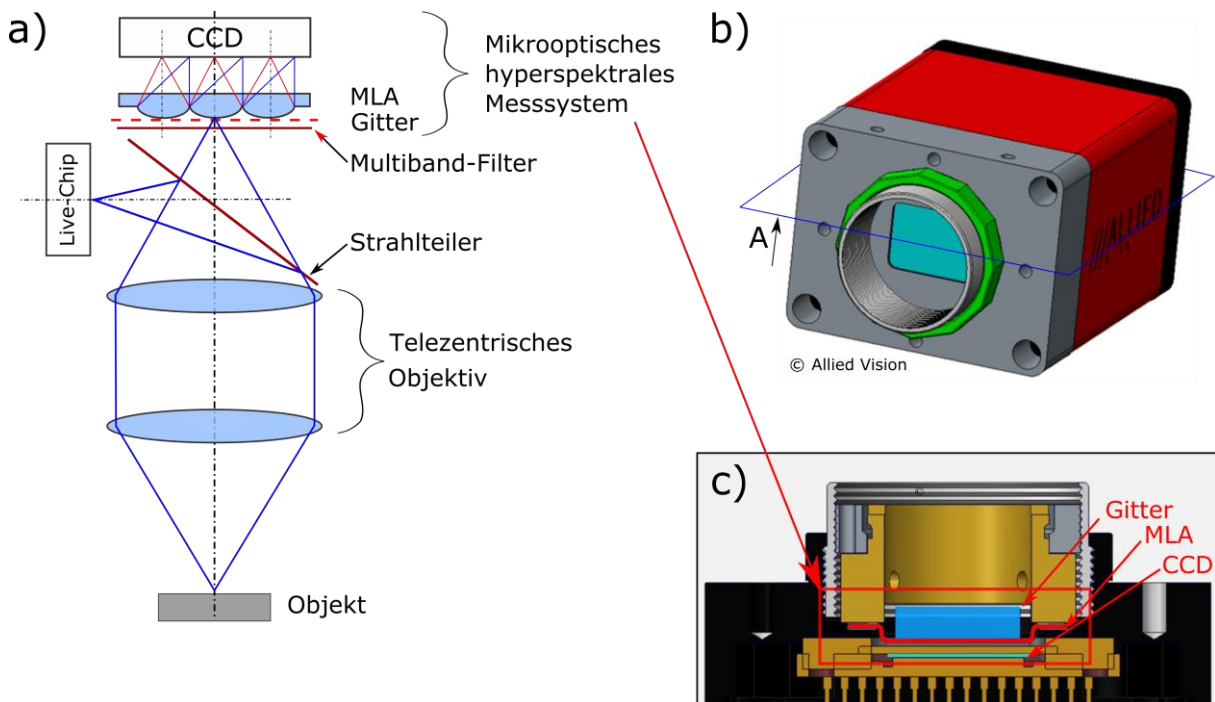


Abb. 5-23: a) Konzept des hyperspektralen Messsystems, b) CAD-Modell des verwendeten Kamerasystems, c) in das Kamerasystem integrierte mikrooptische Komponenten als Schnittansicht an der Ebene A

Die resultierenden Spektren, die durch die Abbildung mit dem MLA entstehen, sind in Abb. 5-24 zu sehen. Insbesondere in Abb. 5-24 b) ist deutlich zu erkennen, dass die Intensität der Spektren nicht homogen ist. Die hellen Bereiche sind die 0. Beugungsordnung des Transmissionsgitters, d.h. das Licht, welches nicht gebeugt wurde. Dies ist auf die Qualität des zugekauften Beugungsgitters zurückzuführen. Für die Anwendung in einem hyperspektralen Kamerasystem ist diese Ordnung nicht erwünscht und muss reduziert werden. Unabhängig von der Qualität des optischen Gitters zeigt Abb. 5-24, dass das MLA eine gute Abbildungs-

qualität besitzt und für das hyperspektrale Kamerasystem eingesetzt werden kann. Die Vorteile eines polymeren MLA gegenüber einem klassischen MLA aus Glas liegen insbesondere in den geringeren Stückkosten und der Gewichtsreduktion. Zusätzlich ermöglicht die Herstellungstechnologie mittels Spritzguss/Spritzprägen eine direkte Integration von Halterungssystemen am MLA. Dadurch kann die Integration des MLA in ein Kamerasystem vereinfacht und optimiert werden, was wiederum die Montagekosten in der Systemfertigung senkt.

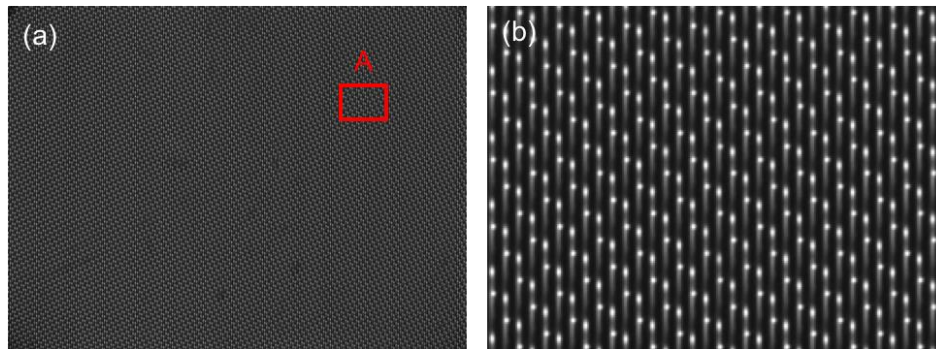


Abb. 5-24: a) Abgebildete Spektren auf einem CCD-Chip, b) vergrößerte Ansicht der Fläche A [32]

Die Anwendung dieses hyperspektralen Kamerasystems mit dem spritzgeprägten MLA ist in einem Detektionssystem für antibiotikaresistente Bakterien vorgesehen [155,156]. Weitere mögliche Anwendungsgebiete sind u.a. die Agrarwirtschaft zur Messung der Düngemittelverteilung, Lebensmittelkontrollen und Unterscheidung von Gewebe in der Medizintechnik.

## 5.4 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung

In den folgenden Abschnitten werden die Prozesskette sowie die Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte diskutiert. Außerdem sollen allgemeine Erkenntnisse abgeleitet werden, welche für andere Anwendungen eingesetzt werden können.

Die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse zeigen, dass die Kombination aus Ultrapräzisionsbearbeitung und Spritzprägen eine geeignete Prozesskette zur Herstellung von MLAs darstellt. Die Prozesskette, die insgesamt aus vier großen Phasen besteht (Abb. 5-2), ermöglicht die Herstellung von MLAs mit einer hohen Anzahl von Mikrolinsen (12.000 in dieser Arbeit). Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass der Fokus bei der Beschreibung der Prozesskette auf den letzten drei Prozessschritten lag (Ultrapräzisionsbearbeitung, Werkzeugintegration und Spritzprägen), da diese die größeren technischen Herausforderungen darstellen. Dennoch darf der erste Prozessschritt keines Falls unterschätzt werden, da Fehler in der Vorbereitung des Werkzeugeinsatzes sowie der Beschichtung später zu erheblichen Problemen im Herstellungsprozess führen können. Insbesondere die Maßhaltigkeit des Werkzeugeinsatzes und die Haftung der Beschichtung sind von entscheidender Bedeutung.

Ein entscheidender Nachteil der Ultrapräzisionsbearbeitung ist die Tatsache, dass die verwendeten Diamantwerkzeuge nicht in eisenhaltigen Materialien eingesetzt werden können,

da es zu sehr starkem Verschleiß der Schneide kommt. Die daher notwendige Beschichtung (meist Nickel-Phosphor) führt zu einem zusätzlichen Prozessschritt, welcher durchgeführt werden muss. Neben der Beschichtung muss außerdem ein beschichtetes Bauteil mittels regulärer Fräsbearbeitung nochmals nachgearbeitet werden, bevor die Ultrapräzisionsbearbeitung gestartet werden kann. Dies ist notwendig, da das Schichtwachstum der NiP-Beschichtung nicht gleichmäßig stattfindet und bei der Ultrapräzisionsbearbeitung nur sehr kleine Zustellungen möglich sind. Ein Vorteil der NiP-Beschichtung ist ihre hohe Härte (ca. 550 HV), wodurch diese sehr gut für den Replikationsprozess im Spritzguss/Spritzprägen eingesetzt werden kann [157]. Allerdings bieten andere Herstellungsmethoden wie LIGA, Elektronenstrahlschreiben, Laserbearbeitung oder EDM auch keine bessere Alternative. Für den LIGA-Prozess und das Elektronenstrahlschreiben ist eine Galvanoabformung von einem Mastersubstrat notwendig, wie sie in Kapitel 6.2.2 beschrieben ist, wodurch ebenfalls zusätzliche Arbeitsschritte entstehen. EDM hingegen ermöglicht die direkte Bearbeitung von Stahl, allerdings ist die erreichbare Strukturgröße und Oberflächenqualität nicht ausreichend für die optische Anwendung [93]. Die Herstellung von MLAs mittels Laserbearbeitung oder Elektronenstrahlschreiben ist insbesondere in der erzielbaren Rauheit begrenzt, die  $R_a < 10$  nm betragen sollte [158]. Aus diesem Grund stellt die Ultrapräzisionsbearbeitung die beste Herstellungstechnologie für diese Art von MLAs dar. Auch in der Bearbeitungszeit ist die Ultrapräzisionsbearbeitung in einer vergleichbaren Größenordnung wie alternative Herstellungsmethoden [25,159].

Die Anwendung des Fly-Cutting-Prozesses zur Herstellung von optischen Planflächen erwies sich als eine geeignete Methode. Die resultierenden Oberflächen sind spiegelnd und haben mit einer Rauheit von  $R_a = 12$  nm optische Qualität. Diese Werte entsprechen den Rauheitswerten, die auch in der Literatur gefunden werden können [33]. Entscheidende Faktoren für das Prozessergebnis sind die Qualität des Fly-Cutters sowie die Einspannung in der Frässpindel. Es muss darauf geachtet werden, dass der Fly-Cutter in einem exakten Winkel von  $90^\circ$  zum Werkstück positioniert ist, da ansonsten Riefen in der Bauteiloberfläche entstehen. Daher muss der Diamant auf dem Fly-Cutter sehr genau zum Schaft des Fly-Cutters ausgerichtet sein, da der Schaft zum Einmessen des Werkzeuges verwendet wird. Eine alternative Herstellungsmethode für die Planfläche wäre auch Ultrapräzisions-Drehen (UP-Drehen). Allerdings sind die Werkzeugeinsätze in dieser Arbeit nicht rotationssymmetrisch, wodurch beim Drehprozess Unterbrechung des Schneideprozesses erforderlich ist. Dies kann zu einer starken Belastung des Diamantwerkzeuges führen, wodurch es zu Ausbrüchen am Werkzeug kommen kann was die Oberflächenqualität negativ beeinflusst. Grundsätzlich ist die Bearbeitungszeit mittel UP-Drehen höher als bei einem Fly-Cutting-Prozess, jedoch ist die erreichbare Oberflächenqualität nochmals besser und kann  $R_a < 10$  nm betragen.

Die verwendete Frässtrategie zum Herstellen des MLA-Werkzeugeinsatzes mittels UP-Fräsen erwies sich als geeignet. Die erreichte Oberflächenqualität der einzelnen Mikrolinsen von  $R_a = 4$  nm und deren Positioniergenauigkeit erfüllen die Anforderungen für einen optischen Werkzeugeinsatz. Ein entscheidender Vorteil der Frässtrategie „vertikales Eintauchen“



ist die Bearbeitungszeit. Die kurzen Fräsbahnen ermöglichen eine sehr schnelle Bearbeitung, wodurch die Bearbeitungszeit „nur“ 4,5 h betrug, was in Anbetracht der großen Anzahl von Mikrolinsen sehr kurz ist. An dieser Stelle muss allerdings gesagt sein, dass die Frässtrategie einige Einschränkungen aufweist, welche eine Übertragung auf andere Anwendungen einschränken. Hierzu gehört zum einen die Form der Mikrolinsen. Es können ausschließlich MLAs mit sphärischen Mikrolinsen hergestellt werden, wenn die Frässtrategie „vertikales Eintauchen“ verwendet werden soll. Für MLAs mit asphärischen oder Freiform-Mikrolinsen kann diese Strategie nicht eingesetzt werden. Für asphärische Mikrolinsen ist der spiralförmige Verfahrensweg empfehlenswert. Bei Freiformflächen kann keine allgemeine Strategie benannt werden, da diese von Design zu Design unterschiedlich sein kann. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung des „vertikalen Eintauchens“ ist ein qualitativ sehr hochwertiger Diamantfräser. Der Radius muss möglichst exakt dem Soll-Radius entsprechen und auch die Welligkeit sollte möglichst gering sein, da die Abweichungen direkt in das Bauteil übertragen werden. Abweichungen können nicht wie bei anderen Frässtrategien (z.B. spiralförmiges Fräsen) durch eine Anpassung der Fräsbahnen korrigiert werden. Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben hat auch der Verschleiß der Diamantschneide starken Einfluss auf das Fräsergebnis. Aus diesem Grund muss der Verschleiß durch geeignete Prozessparameter und Kühlung so klein wie möglich gehalten werden. Ein Austauschen des Diamantwerkzeuges während der Bearbeitung ist aus mehreren Gründen nicht empfehlenswert. Zum einen besitzen die Diamantfräser nie den exakt gleichen Radius und zum anderen ist es nicht möglich, nach dem Fräserwechsel die Position des vorherigen Fräasers wieder exakt zu treffen. Dadurch kommt es zu einem Versatz der nachfolgenden Mikrolinsen, wodurch die optische Funktionsfähigkeit beeinträchtigt wird.

Der mittels UP-Fräsen hergestellte mikrostrukturierte Werkzeugeinsatz erfüllte die Anforderungen, die für die Herstellung der spritzgeprägten MLAs nötig waren. Oberflächenrauheit, Positioniergenauigkeit der Mikrolinsen sowie die Formabweichung sind allesamt sehr gut. Die Formabweichung von nur 40 nm ist sehr gut und ein Resultat der hohen Qualität des Diamantfräasers. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass eine reine Messung des Linsenradius mit der verfügbaren Messtechnik keine zuverlässigen Ergebnisse liefert und es daher empfehlenswert ist, die Formabweichung vom Soll-Radius als Qualitätsmerkmal zu verwenden.

Die Replikation der MLAs durch Spritzprägen erzielte gute Ergebnisse. Die größte Herausforderung stellte die Dicke des Bauteils von 500  $\mu\text{m}$  dar, welche das Prozessfenster für den Abformungsprozess stark einschränkte. Für eine vollständige Abformung musste die Kavität schnell gefüllt werden, um ein vorzeitiges Erstarren der Schmelze zu verhindern. Die Möglichkeiten, die der Spritzprägeprozess bietet, waren hierfür die Voraussetzungen. Nur durch eine Vergrößerung der Kavität durch den hinten stehenden Prägestempel sowie den anschließenden Prägeprozess konnte das Bauteil vollständig abgeformt werden. Ein reiner Spritzgussprozess wäre hierfür nicht geeignet gewesen. Versuche mit einem reinen Spritzgussprozess erzielten keine vollständig abgeformten Bauteile. Eine Alternative wäre, die

Bauteildicke zu erhöhen, wodurch sich der Spritzguss/Spritzprägeprozess deutlich vereinfachen würde. Dies war in dieser Arbeit nicht möglich, da die Bauteildicke durch das Optikdesign vorgegeben war. Bei einer Neuauslegung wäre diese herstellungsbedingte Einschränkung allerdings stärker zu beachten. Die resultierende Oberflächenqualität der Mikrolinsen beträgt  $R_a = 6 \text{ nm}$  und ist dadurch nur marginal höher als die gemessene Rauheit im Werkzeugeinsatz. Diese optische Oberflächenqualität ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung in einem optischen System. Die gemessene Formabweichung von dem  $1 \text{ mm}$  Soll-Radius der Mikrolinsen betrug  $\pm 40 \text{ nm}$ , was ein sehr geringer Wert ist. Im Vergleich zum Werkzeugeinsatz hat sich damit die Formabweichung verdoppelt, allerdings befindet sie sich noch auf einem sehr geringen Niveau, welches die Funktionalität des Bauteils nicht beeinträchtigt. Ein möglicher Grund für die höhere Formabweichung ist die Schwindung und der Verzug, die im Bauteil auftreten, wenn die Schmelze erstarrt. Neben der Formabweichung der einzelnen Mikrolinsen ist auch die Planarität des Gesamtbauteils von entscheidender Bedeutung für die Funktionalität. Diese wurde mittels LAM gemessen und ein Winkel von  $0,07^\circ$  berechnet. Auch hierdurch wird die Qualität des optischen Systems nicht beeinträchtigt.

Aus den in diesem Prozess erarbeiteten Ergebnissen können die folgenden allgemeinen Erkenntnisse abgeleitet werden, die auch für andere Anwendung von Bedeutung sind:

- Bei der Herstellung eines MLA mittels UP-Fräsen ist es empfehlenswert, den Fräser in einem definierten Winkel zum Werkstück zu positionieren. Dadurch können Zentrierfehler des Diamanten in Bezug zum Fräaserschaft ausgeglichen werden. Die Größe des benötigten Winkels ist dabei vom Zentrierfehler des Diamanten sowie der zu fräsenden Geometrie abhängig. Der benötigte Winkel kann daher entweder experimentell bestimmt werden oder alternativ einfach sehr hoch gewählt werden (z.B.  $45^\circ$ ). Beim Verwenden eines solchen Anstellwinkels gilt es zu beachten, dass es durch das Anstellen der Frässpindel nicht zu einer Kollision mit dem Werkstück kommt. Des Weiteren muss der Diamantfräser den Radius über einen ausreichenden Bereich aufweisen, da sich durch das Anstellen der Kontaktpunkt der Schneide mit dem Werkstück weg von der Fräterspitze bewegt.
- Für komplexe Bauteile bietet Spritzprägen mehr Möglichkeiten als Spritzgießen, um optimale Prozessparameter zu finden, da durch die zusätzliche Prägebewegung mehr Freiheitsgrade entstehen. Neben optischen Bauteilen ist die Prozessvariante insbesondere auch für dünne Bauteile gut geeignet und vorteilhaft gegenüber regulärem Spritzgießen, da das Füllverhalten der Kavität besser gesteuert werden kann.
- Wie in diesem Kapitel bereits ausführlich beschrieben, war die Bauteildicke ein stark einschränkender Faktor für den Herstellungsprozess. Daher kann allgemein abgeleitet werden, dass eine größere Bauteildicke gewählt werden sollte, wenn dies möglich ist, insbesondere wenn die Bauteilgeometrie durch

zusätzliche Strukturen (z.B. Halterungen) komplexer wird und dadurch das Füllverhalten im Replikationsprozess erschwert wird.

- Das Aspektverhältnis der Mikrostrukturen ist für das Füllverhalten im Spritzguss-/Spritzprägeprozess von entscheidender Bedeutung. Bei geringem Aspektverhältnis wie im Falle des hier beschriebenen MLAs ist die vollständige Abformung der Strukturen leicht und auch ohne Spritzprägeprozess möglich. In Kapitel 6 wird die Abformung von Strukturen mit höherem Aspektverhältnis beschrieben, bei denen das Füllverhalten deutlich schlechter ist.

## **6 Mikrostrukturierung durch Laserdirektschreiben**

In diesem Kapitel wird die Prozesskette zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken mittels Laserdirektschreiben, Galvanokopieren und Spritzprägen beschrieben. Laserdirektschreiben stellt dabei ein Beispiel für ein mögliches Strukturierungsverfahren dar, bei dem zuerst ein Mastersubstrat hergestellt wird, welches anschließend mittels Galvanokopieren in einen festen Werkzeugeinsatz überführt wird. Dadurch können die Erkenntnisse auch für andere Strukturierungsverfahren übernommen werden, bei denen zuerst ein Mastersubstrat hergestellt werden muss. Die Besonderheit des hier vorgestellten Prozesses stellt die gekrümmte Form des Glasmasters dar, welche speziell mit dem LDW-Prozess strukturiert werden kann. Als Beispielanwendung wird ein gekrümmtes DOE hergestellt. Neben der Herstellung des Werkzeugeinsatzes wird dabei auch insbesondere das verwendete Werkzeugkonzept beschrieben sowie die Einflussfaktoren beim Replizieren der DOE mittels Spritzprägen. Am Ende des Kapitels werden zuerst die Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte dargestellt und anschließend diskutiert.

### **6.1 Einleitung**

Laserdirektschreiben (LDW) ist ein Strukturierungsverfahren, bei dem ein Laserstrahl zur Strukturierung eines Fotolacks verwendet wird, vergleichbar mit einem Lithographieprozess. Der Prozess darf nicht mit einer Laserbearbeitung verwechselt werden, bei der ein direkter Materialabtrag durch den Laser entsteht. Bei dem LDW-Prozess wird ein Substrat mit einem Fotolack beschichtet, meist durch Spin-Coating, und anschließend selektiv mit dem Laser strukturiert. Der teilweise strukturierte Fotolack wird in einem nachfolgenden Prozessschritt entwickelt, d.h. nicht ausgehärtete Bereiche des Lacks werden entfernt. In dieser Arbeit wird ein Positiv-Fotolack verwendet, d.h. die durch den Laser strukturierten Bereiche werden beim Entwicklungsprozess wieder entfernt. Der LDW-Prozess wird häufig für die Herstellung von diffraktiven oder Fresnel-Strukturen eingesetzt.

In dieser Arbeit wird das LDW-Verfahren eingesetzt, um einen gekrümmten Glasmaster für ein diffraktives optisches Element (DOE) herzustellen. DOE sind mikrostrukturierte optische Elemente, an denen Licht gebeugt wird. DOE werden häufig eingesetzt, um Laserstrahlen zu formen oder Abbildungsfehler zu korrigieren. Die Herstellung solcher Elemente kann mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. UP-Drehen kann eingesetzt werden, um Werkzeugeinsätze mit diffraktiven Strukturen herzustellen oder direkt DOE aus Glas oder Kunststoff herzustellen. Die direkte Herstellung von DOE ist allerdings teuer und zeitaufwendig. Für die Herstellung von Werkzeugeinsätzen ist das UP-Drehen sehr gut geeignet [160], jedoch entstehen an den Kanten immer Verrundungen, da diese durch die verfügbaren Diamantwerkzeuge auf ca. 5  $\mu\text{m}$  begrenzt sind [27]. Ein weiterer Vorteil des

UP-Drehens ist die Möglichkeit, diffraktive Strukturen auf gekrümmten Flächen aufzubringen [64]. Ein geeignetes Herstellungsverfahren für DOE ist das Elektronenstrahlschreiben (E-Beam Writing). Dabei wird wie beim LDW-Prozess ein Fotolack strukturiert. Allerdings hat dieses Verfahren Probleme beim Strukturieren von tiefen Strukturen ( $> 1 \mu\text{m}$ ), aufgrund der Streuung der Elektronen [117]. LDW bietet im Gegensatz zu den beschriebenen Verfahren die Vorteile, dass die Verrundung der Kanten geringer ist als beim UP-Drehen und auch ohne Probleme tiefere Strukturen im Fotolack erzeugt werden können als beim Elektronenstrahlschreiben. Zusätzlich ermöglichen neueste LDW-Systeme auch einen Schreibprozess auf gekrümmten Strukturen [119,161,162]. Dadurch entsteht ein größerer Spielraum für das Optikdesign durch die Kombination von diffraktiven und refraktiven Funktionen in einem Bauteil.

Das DOE, das im Rahmen dieser Arbeit hergestellt wird, ist als Nullbrechkraftelement ausgelegt wie in Kapitel 3.1 (Abb. 3-2) beschrieben. Dabei ist das optische Design des Elementes so gewählt, dass bei einer Wellenlänge von 840 nm die Brechung der Linse durch die diffraktiven Strukturen ausgeglichen wird. Die laterale Größe der diffraktiven Mikrostrukturen variiert von 140  $\mu\text{m}$  im Zentrum bis 5,6  $\mu\text{m}$  im Außenbereich des DOE. Die Mikrostrukturen sind als kontinuierliche diffraktive Strukturen ausgeführt mit einer Stufenhöhe von 1,65  $\mu\text{m}$ . Diese Stufenhöhe ist vergleichsweise hoch, da das DOE für eine Wellenlänge (840 nm) im IR-Bereich optimiert ist. Im Bereich des sichtbaren Lichtes sind Stufenhöhen von  $\sim 1 \mu\text{m}$  üblich [65]. Eine Besonderheit des DOE ist, dass die diffraktiven Strukturen auf einer gekrümmten Oberfläche aufgebracht sind. Die Fläche ist dabei sphärisch mit einem Soll-Radius von 51,5 mm. Die Oberfläche gegenüber der diffraktiven Struktur besitzt eine asphärische Form. Dadurch entstehen in der Transmission planare Wellenfronten nicht nur bei Lichtwellen auf der optischen Achse, sondern auch bei Lichtwellen bis zu einem Winkel von  $2^\circ$ . Das DOE besitzt einen Durchmesser von 22,4 mm mit einer Mittendicke von 4,3 mm. Die strukturierte Fläche weist einen Durchmesser von 18 mm auf. Die Funktionsfähigkeit des spritzgeprägten DOE soll in einem chromatisch konfokalen Messaufbau demonstriert werden. Hierfür sind die Dimensionen des gekrümmten DOE optimiert. Eine Skizze des DOE sowie die mathematische Beschreibung der Asphäre sind in Abb. 6-1 dargestellt.

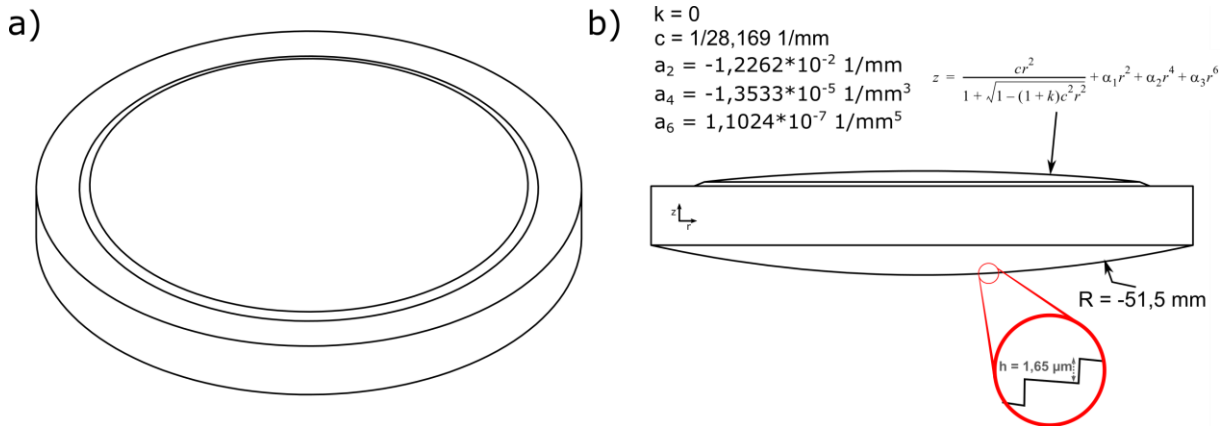


Abb. 6-1: a) 3D-Design des gekrümmten DOE, b) exakte Beschreibung der Asphäre sowie der strukturierten diffraktiven Fläche

## 6.2 Methoden

Die Prozesskette zur Herstellung von gekrümmten DOE mittels LDW und Spritzprägen besteht aus vier großen Prozessschritten, welche in Abb. 6-2 dargestellt sind. In einem ersten Schritt wird ein Glasmaster mit der diffraktiven Struktur hergestellt [163]. Hierfür wird ein kommerzielles Glassubstrat mit einem Fotolack beschichtet und anschließend die Mikrostrukturen mittel LDW eingebracht. Die Schichtdicke des Fotolacks beträgt dabei nur 3  $\mu\text{m}$ . Die Herstellung des Glasmasters wurde am Institut für technische Optik der Universität Stuttgart (ITO) durchgeführt. Nach dem Entwickeln kann der Glasmaster im zweiten Prozessschritt genutzt werden, um einen festen Werkzeugeinsatz mittels Galvanokopieren zu erzeugen. Im dritten Prozessschritt wird der Werkzeugeinsatz in einen Spritzprägeeinsatz integriert. Für das Werkzeug wird in diesem Schritt ein weiterer Werkzeugeinsatz mittels UP-Drehen hergestellt, welcher im Spritzprägeprozess als Prägestempel eingesetzt wird und die asphärische Fläche des DOE formen soll. Im letzten Prozessschritt werden die gekrümmten DOE mittels Spritzprägen repliziert. Dabei ist es wichtig, die feinen Mikrostrukturen hochpräzise abzuformen.

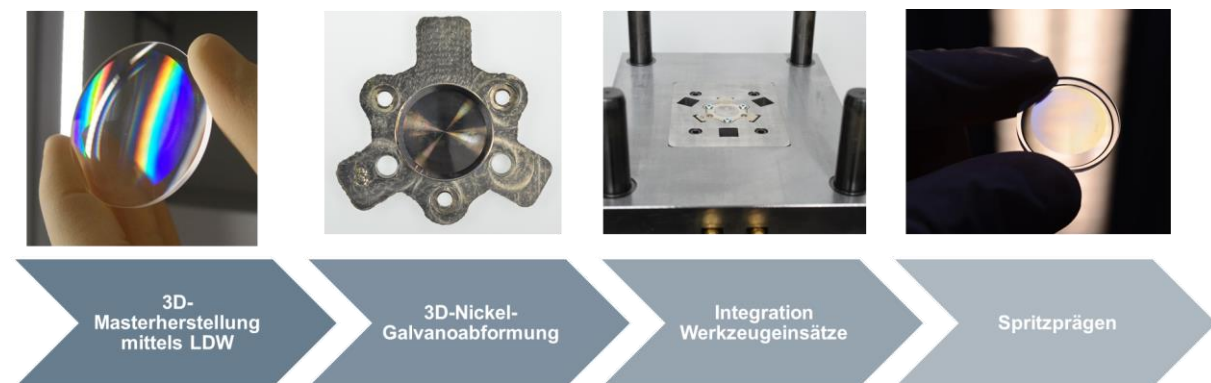


Abb. 6-2: Prozesskette zur Herstellung gekrümmter DOE mittels LDW, Galvanoabformung, Werkzeugintegration und Spritzprägen

## 6.2.1 Herstellung von Glasmastern mittels Laserdirektschreiben

Für die Herstellung der Glasmaster wurde der LDW-Prozess verwendet. Die Besonderheit des verwendeten Prozesses besteht darin, dass auf gekrümmten Flächen (bis  $15^\circ$ ) kontinuierliche diffraktive Strukturen erzeugt werden können, wodurch sich der Prozess von herkömmlichen LDW-Prozessen unterscheidet. Das System arbeitet mit einem Laser mit 405 nm Wellenlänge und nutzt für den Schreibprozess eine Interferenzmethode, bei der sich zwei kohärente Laserstrahlen kreuzen und ein Interferenzmuster bilden (Scanning Beam Interference Lithography) [162]. Das System nutzt einen Autofokusstrahl zur Z-Positionierung. Die exakte Positionierung ist von entscheidender Bedeutung, um auf einer gekrümmten Oberfläche arbeiten zu können. Das Substrat ist für den LDW-Prozess auf einer rotierenden Spindel aufgebracht. Der Schreibkopf verfährt lateral und passt dabei die Positionierung in Z-Richtung an. Um die Substrate vor Verunreinigungen zu schützen, wird das gesamte System in einem Reinraum betrieben. Das Funktionsprinzip des verwendeten LDW-Prozesses sowie ein Bild der Anlage sind in Abb. 6-3 dargestellt.

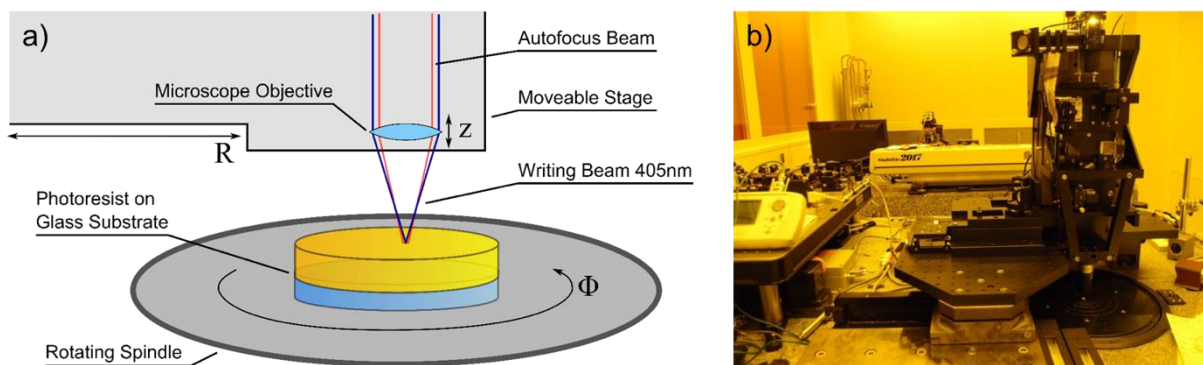


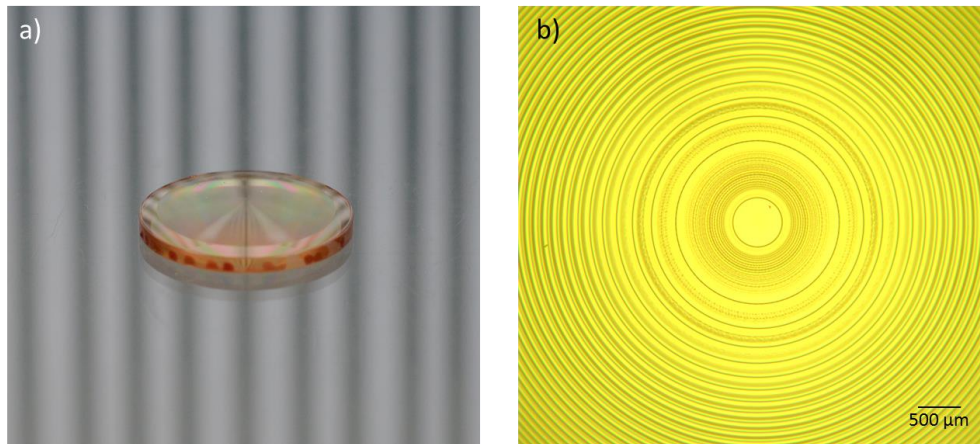
Abb. 6-3: a) Funktionsprinzip des verwendeten LDW-Prozesses, b) Bild des LDW-Systems [163]

Als Trägermaterial für den Fotolack wurden plankonvexe Glaslinsen (LA1509, Thorlabs Inc., USA) verwendet, welche einen Krümmungsradius von 51,5 mm besitzen. In einem ersten Prozessschritt wurde ein Fotolack (AZ 1805, MicroChem, USA) über einen Spin-Coating-Prozess auf die Glassubstrate aufgebracht. Die Schichtdicke des Fotolacks betrug  $3 \mu\text{m}$  mit einer Schichtdickenvariation  $<1\%$  (20 nm), was den anschließenden Lithographieprozess mittels LDW nicht beeinträchtigt. Vor dem LDW-Prozess wurde der Lack bereits vorbelichtet. Für den LDW-Prozess waren die folgenden Qualitätsmerkmale entscheidend:

- Stufenhöhe der diffraktiven Strukturen sollte  $1,65 \mu\text{m}$  betragen
- Hohe Flankensteilheit der Stufen
- Geringe Oberflächenrauheit
- Homogenität der genannten Parameter über die gesamte strukturierte Fläche mit Durchmesser  $D = 18 \text{ mm}$

Nach dem LDW-Prozess wurde der Fotolack entwickelt. Dabei wurden die Bereiche chemisch entfernt, die mit dem Laser abgefahren wurden. In Abb. 6-4 ist ein strukturierter

Glasmaster nach dem Entwicklungsschritt abgebildet sowie eine Mikroskopaufnahme der diffraktiven Struktur. Insgesamt wurden neun Glasmaster strukturiert.

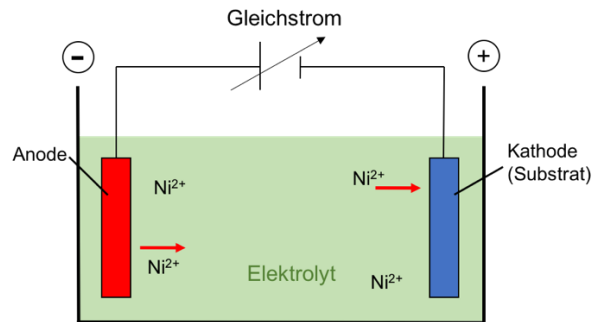


**Abb. 6-4: a) Glasmaster nach dem LDW-Prozess, b) Mikroskopaufnahme der diffraktiven Struktur**

### **6.2.2 Galvanokopieren**

Da mit dem LDW-Prozess nur ein Fotolack strukturiert werden kann und kein Material, das direkt als Spritzgusswerkzeug verwendet werden kann, muss der strukturierte Master durch einen Galvanokopierprozess abgeformt werden. Dadurch entsteht ein Werkzeugeinsatz aus Nickel, auch Stamper genannt (eng. Nickel Shim), welcher in ein Spritzgusswerkzeug integriert werden kann. Die vorausgehende Mikrostrukturierung muss dabei nicht zwingendermaßen mit dem LDW-Prozess geschehen, sondern andere Mikrostrukturierungstechnologien wie beispielsweise Elektronenstrahlschreiben oder Lithographieprozesse können ebenfalls eingesetzt werden. Durch den Galvanokopierprozess ist es möglich, feinste Strukturen, die in einem anderen Material hergestellt wurden (z.B. Fotolack), in ein hartes Material zu überführen und anschließend in hoher Stückzahl durch Verfahren wie Heißprägen oder Spritzgießen/Spritzprägen zu replizieren. Das Funktionsprinzip eines Galvanokopierprozesses ist in Abb. 6-5 dargestellt. Für den Prozess wird ein elektrisch leitfähiges Substrat in ein Elektrolytbad eingebracht und als Kathode in einen Gleichstromkreislauf eingeführt. Die Nickelanode wird während des Prozesses aufgelöst und erzeugt dabei Nickel-Ionen ( $\text{Ni}^{2+}$ ), welche zur Kathode wandern, um dort als Schicht aufzuwachsen. Eine detaillierte Beschreibung des Prozesses kann in der Literatur gefunden werden [164].





**Abb. 6-5: Prinzip Galvanokopieren**

Die neun strukturierten Glasmaster wurden für den Galvanokopierprozess in einen Substrathalter integriert, um alle Substrate gleichzeitig in einem Prozess abzuformen. Hierfür wurde ein Substratteller mit neun Aussparungen hergestellt, in denen die Glasmaster eingebracht wurden. Die Glasmaster werden für den Galvanokopierprozess mittels eines UV Klebstoffs im Substratteller befestigt. Der entsprechende Prozessablauf ist Abb. 6-6 a) dargestellt. Zuerst wird der Klebstoff in die Aussparung dosiert und anschließend der Glasmaster eingeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Spalt zwischen Glasmaster und Substratteller gleichmäßig ist. Im Anschluss wird der Klebstoff mittels UV-Belichtung ausgehärtet, wodurch die Glasmaster fest im Substratteller fixiert werden. Abb. 6-6 b) zeigt den Substratteller mit eingeklebten Glasmastern. Im Substratteller wurden neben den Aussparungen für die Substrate zusätzlich noch Schrauben und Referenzstrukturen eingebracht, die für die spätere Entformung aus dem Substratteller und Integration der vereinzelt Stämper in das Spritzgusswerkzeug genutzt wurden.

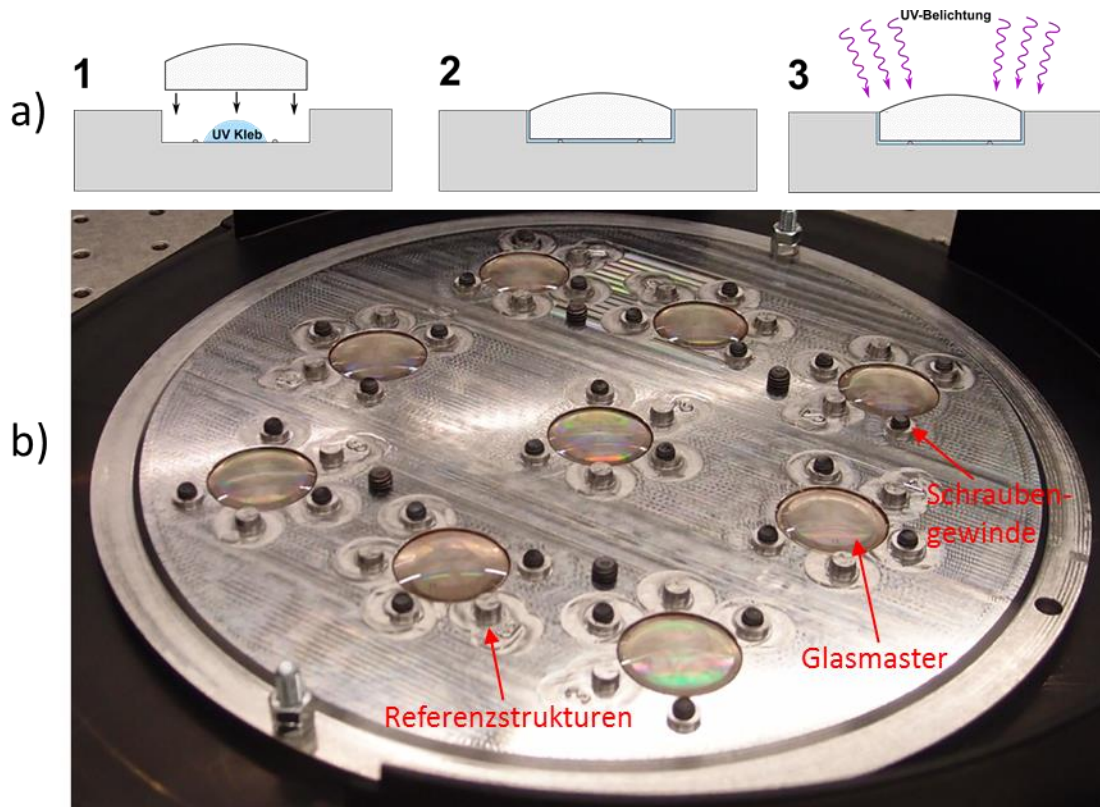


Abb. 6-6: a) Prozessablauf zum Einkleben der Glassubstrate in den Substratteller, b) Substratteller mit eingeklebten Glasmastern [165]

Die Voraussetzung für den Galvanokopierprozess ist eine elektrisch leitfähige Startschicht auf der das Nickel galvanisch aufwachsen kann. Hierfür wurde der gesamte Substratteller mit eingeklebten Glasmastern in einem PVD-Prozess (Physical Vapour Deposition) mit einer dünnen Schicht aus Nickel-Vanadium (NiV) beschichtet. Diese Schicht ist nur einige Nanometer dick und wird ausschließlich als leitfähige Startschicht für den Galvanoprozess benötigt. Nach der NiV-Beschichtung wurde der gesamte Substratteller in ein Nickelbad eingeführt und das Nickel galvanisch aufgewachsen. Die Ziel-Schichtdicke betrug 3 mm um einen ausreichend mechanisch stabilen Werkzeugeinsatz für den Spritzprägeprozess zu erhalten. Nach dem Galvanoprozess muss der entstandene Nickel-Stamper von der Masterstruktur entfernt werden. Dabei wird die Masterstruktur zerstört und kann nicht nochmals verwendet werden. Bevor der entstandene Stamper für einen Spritzgussprozess genutzt werden kann, muss dieser noch chemisch gereinigt werden, um Reste des Fotolacks aus der Struktur zu entfernen. Die Prozessschritte des Galvanokopierprozesses sind schematisch in Abb. 6-7 dargestellt.

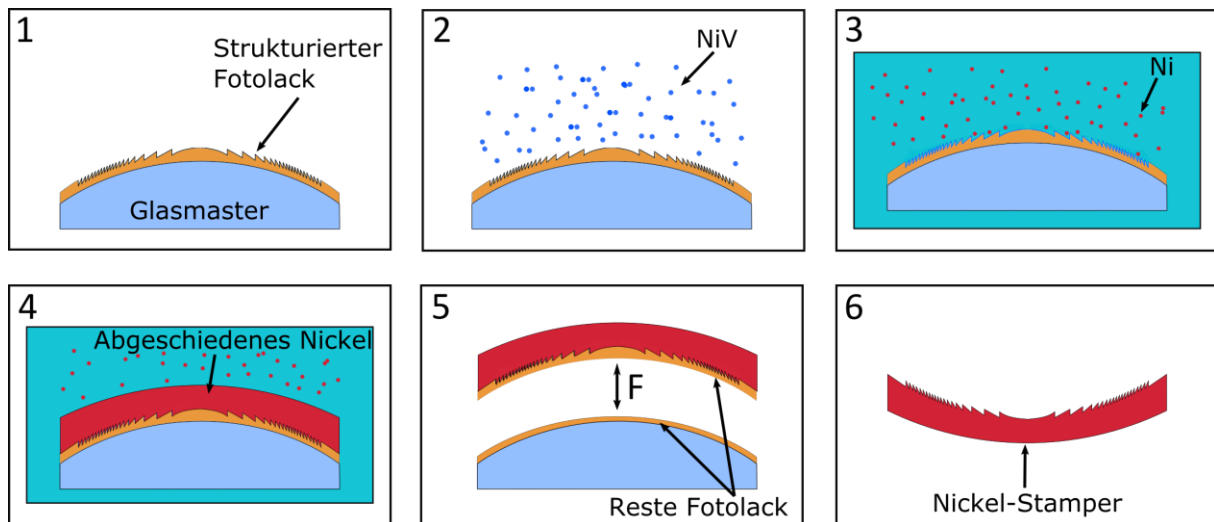


Abb. 6-7: Prozessschritte des Galvanokopierprozesses mit (1) strukturiertem Glasmaster als Substrat (2) NiV-Beschichtung als leitfähige Startschicht (3) Einbringen in ein Elektrolytbad (4) Abscheiden von Nickel (5) Entformen von Substrat und Stamper (6) resultierender Nickel Stamper

Die Geschwindigkeit, in der die Nickelabscheidung stattfindet, ist stark von der Stärke des elektrischen Feldes abhängig. Durch die unebene Geometrie des Substrattellers kam es daher zu einer ungleichmäßigen Abscheiderate des Nickels. Aus diesem Grund musste der Substratteller mechanisch bearbeitet werden, bevor die einzelnen Stamper entformt werden konnten. In Abb. 6-8 a) ist der Substratteller mit blumenkohlartigen Strukturen zu sehen, welche an den Schraubengewinden und Referenzstrukturen entstanden sind, da an diesen Stellen eine erhöhte Feldliniendichte vorhanden war. In Abb. 6-8 b) ist der Substratteller nach der mechanischen Bearbeitung zu dargestellt. Dabei wurden mittels Fräsen und Schleifen die ungewollten Materialanhäufungen entfernt. Im Anschluss wurden die neun entstandenen Nickel-Stamper mittels Fräsen vereinzelt und entformt. Bei der Entformung verblieben die Glasmaster auf dem Substratteller, allerdings hafteten in den Stampen Teile des Fotolacks, die anschließend in einem Reinigungsprozess entfernt wurden.

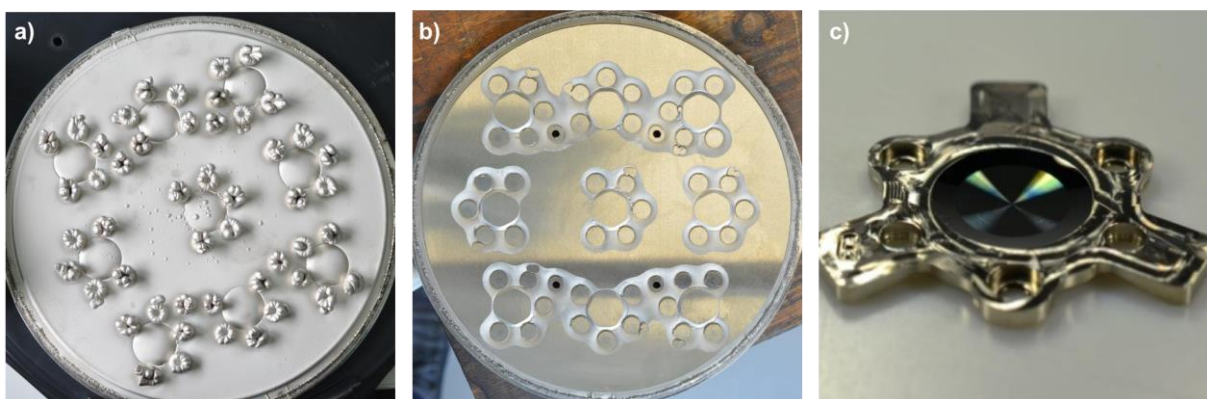


Abb. 6-8: a) Substratteller nach dem Galvanokopierprozess, b) Substratteller nach der mechanischen Bearbeitung, c) vereinzelter Nickel-Stamper mit diffraktiver Struktur [42]

### 6.2.3 Werkzeugbau/Integration

Für die Herstellung der gekrümmten DOE mittels Spritzprägen wurde ein Werkzeug angefertigt in das die Nickel-Stamper integriert werden konnten. Das Werkzeug besitzt eine Kavität, d.h., dass nur ein Stamper pro Prozess abgemustert werden kann. Das Werkzeug ist als Spritzprägewerkzeug mit Prägestempel ausgeführt (Abb. 3-19 c). Im Gegensatz zu dem Spritzprägewerkzeug das in Kapitel 5 beschrieben wird, wird für dieses Werkzeug ein Prozess mit Nebenachsenprägen eingesetzt. Dabei wird das Auswerferpaket der Spritzgussanlage dafür verwendet, die Prägekraft während des Spritzprägeprozesses zu erzeugen. Als Prägestempel wird dabei ein Werkzeugeinsatz genutzt, der mittels UP-Drehen hergestellt wird und eine konkave asphärische Fläche besitzt. Der mikrostrukturierte Nickel-Stamper ist in der Düsenseite des Werkzeuges integriert. Beide Werkzeughälften sowie der Prägestempel besitzen Kühlkanäle, die einzeln über externe Temperiergeräte kontrolliert werden. Dadurch wird eine hochgenaue Steuerung der Werkzeugtemperatur ermöglicht. Eine Besonderheit des Werkzeuges ist die Tatsache, dass das Material nicht horizontal über die feste Düsenseite eingespritzt wird, sondern vertikal über ein zusätzliches Einspritzmodul direkt in die Trennebene. Im Laufe des Spritzgussprozesses wird die Einspritzeinheit nach dem Einspritzen des Materials vom Spritzgusswerkzeug abgehoben, damit dieses sich am Ende des Prozesses öffnen lässt und das Bauteil ausgeworfen werden kann. Das Angussystem ist dabei so ausgelegt, dass direkt vor der Kavität wechselbare Angusseinsätze eingebracht werden können. Dadurch ist es möglich, die Form des Angusses zu ändern. Mögliche Angussvarianten sind Filmanguss, Tunnelanguss oder halbmondförmige Angüsse. Auf verschiedene Angussvarianten und deren Einfluss auf das Füllverhalten der Kavität wird später noch genauer eingegangen. Eine schematische Darstellung des Spritzprägewerkzeuges ist in Abb. 6-9 abgebildet.

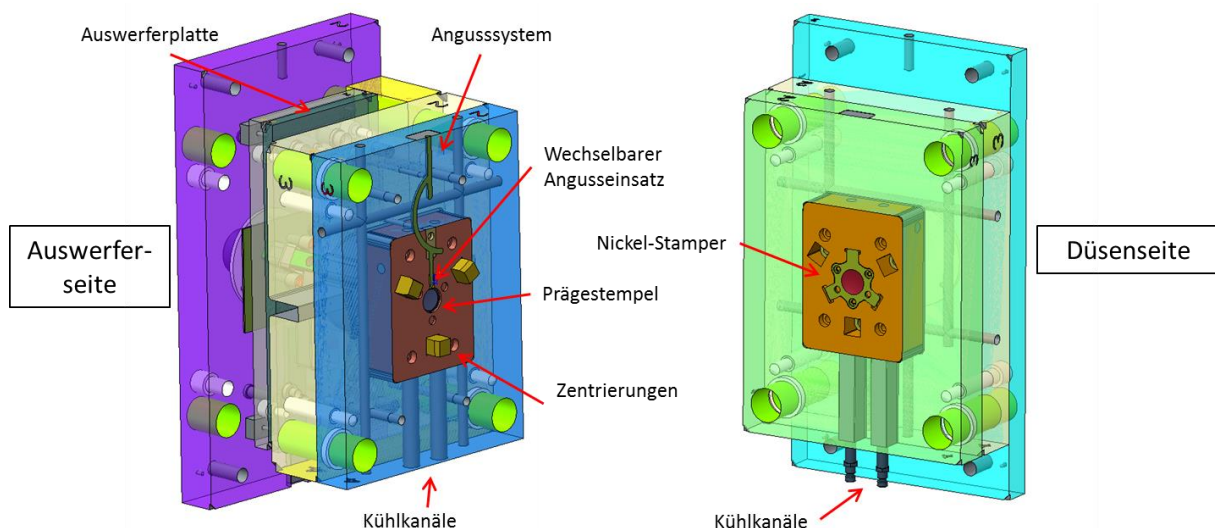


Abb. 6-9: CAD-Darstellung des Spritzprägewerkzeuges zum Herstellen der gekrümmten DOE

Wie bei der Beschreibung des Spritzprägewerkzeuges dargestellt, ist in das Werkzeug ein UP-gedrehter Prägestempel integriert. Der Prägestempel formt dabei im Spritzprägeprozess die

asphärische Rückseite des DOE und benötigt daher höchste Formgenauigkeit und optische Oberflächenqualität. Für das UP-Drehen wurde die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Anlage der Firma Precitech verwendet (Abb. 5-3). Im Gegensatz zur Herstellung des MLAs wird für diesen Prägestempel die Anlage in einer Dreh-Konfiguration betrieben, d.h., dass die Frässpindel nicht benötigt wird. Das Design des Prägestempels ist Abb. 6-10 a) zu entnehmen. Die Grundform des Prägestempels wurde mittels Erodiertechnik hergestellt. Im Anschluss wurde der Bereich für die optische Fläche mit NiP (SuNiCoat<sup>®</sup>, CZL Tilburg, Niederlande) beschichtet, um eine Diamantbearbeitung durch UP-Drehen zu ermöglichen (siehe Abb. 6-10 b)).

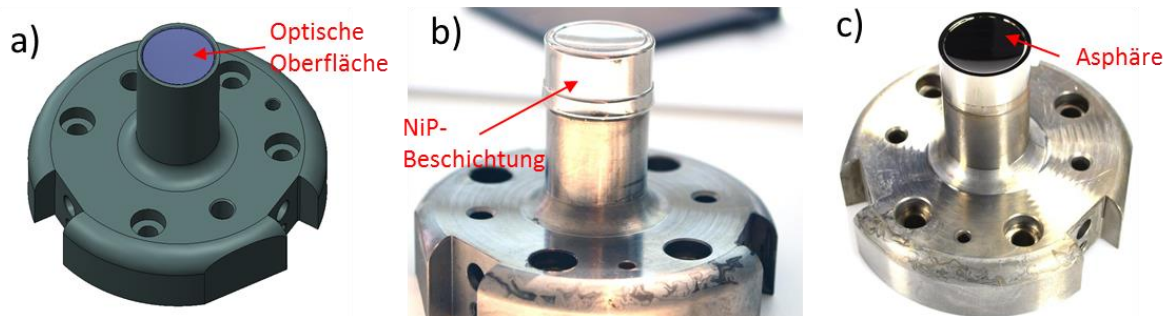


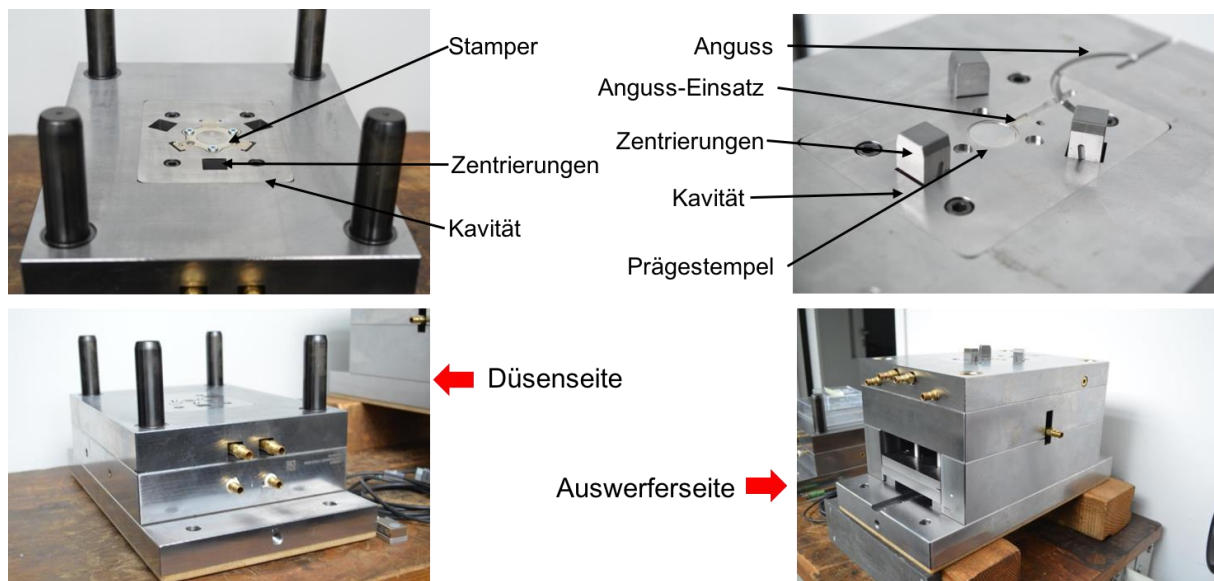
Abb. 6-10: a) Design des Prägestempels für die Herstellung eines DOE, b) Prägestempel mit NiP-Beschichtung, c) Prägestempel mit asphärischer Oberfläche nach dem UP-Drehen [165]

Für die UP-Bearbeitung wurde ein Diamantwerkzeug mit einem Radius von  $R = 0,097$  mm verwendet (Diatec, Deutschland). Die verwendete Asphärengleichung für die Erstellung des Verfahrwegs ist in Abb. 6-1 enthalten. Der UP-Drehprozess wurde in zwei Phasen durchgeführt. In einer ersten Schrupp-Phase wurde bei einer Zustellung von  $5 \mu\text{m}$  mit einem Vorschub von  $5 \text{ mm/min}$  gearbeitet. In der zweiten Phase wurde ein letzter Schlichtspan abgetragen mit einer Zustellung von  $2 \mu\text{m}$  und einem Vorschub von  $2,5 \text{ mm/min}$ . Die Spindeldrehzahl betrug  $2.000 \text{ 1/min}$ . Während des gesamten Prozesses wurde der Bearbeitungsbereich mittels Minimalmengen-Kühlung gekühlt. Dabei wurde über zwei Sprühdüsen Isoparaffin auf den Arbeitsbereich gesprüht, um die Temperatur konstant zu halten und den Verschleiß des Diamantwerkzeuges zu verhindern. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tab. 6-1 aufgelistet.

**Tab. 6-1: Prozessparameter für das UP-Drehen des Prägestempels**

Parameter	Wert
Drehgeschwindigkeit Spindel [1/min]	2.000
Zustellung [ $\mu\text{m}$ ]	
• Schruppen	5
• Schlichten	2
Vorschub [mm/min]	
• Schruppen	5
• Schlichten	2,5
Vorlaufzeit [min]	10
Radius Diamantwerkzeug [mm]	0,097

Nach der Herstellung des Prägestempels konnte dieser, sowie einer der Nickel-Stamper, in das Spritzgusswerkzeug eingebaut werden. Für den späteren Spritzprägeprozess wurde der „Stamper 7“ in das Werkzeug integriert, da dieser das beste Ergebnis des Galvanokopierprozesses darstellt. Eine genauere Analyse der Stamper wird in Kapitel 6.3 durchgeführt. Für die Integration des Nickel-Stampers in das Werkzeug werden die Schraubengewinde genutzt, die bei dem Galvanokopierprozess eingefügt wurden. Dadurch ist eine feste Verankerung des Stampers im Werkzeug gewährleistet. In Abb. 6-11 sind die Düsen- und Auswerferseite des Spritzprägewerkzeuges abgebildet. In der Abbildung ist zu sehen, wie der Nickel-Stamper und der Prägestempel in das Werkzeug integriert sind. Die verwendeten Zentrierungen sind Sonderanfertigungen mit einer Toleranz von nur  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Die Zentrierungen werden benötigt, um beim Schließen der beiden Werkzeughälften ein präzises Zusammenführen zu gewährleisten.



**Abb. 6-11: Düsen- und Auswerferseite des Spritzprägewerkzeuges zur Herstellung von gekrümmten DOE mit integriertem Nickel-Stamper und Prägestempel**

## 6.2.4 Spritzprägen gekrümmter DOE

Für die Replikation der gekrümmten DOE wurde eine Spritzgussanlage mit vertikaler Einspritzeinheit (Allrounder 520A, Arburg GmbH und Co. KG, Deutschland) verwendet. Der Aufbau der Anlage entspricht der in Abb. 5-12 abgebildeten Spritzgussanlage. Die vertikale Einspritzeinheit war notwendig, da beim verwendeten Spritzprägewerkzeug in die Trennebene eingespritzt werden musste. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Spritzgussanlage ist ein hydraulisch betriebenes Auswerferpaket. Da in dem verwendeten Spritzprägewerkzeug der Prägestempel über das Auswerferpaket verfahren wird, muss dieses ausreichend Kraft aufbringen können, um die Prägebewegung auszuführen. Elektrische Auswerferpakete können hohe Kräfte nur über einen begrenzten Zeitraum aufbringen, bevor der Motor in den Störungsmodus schaltet. In Abb. 6-12 ist die maximale Prägelaufzeit einer Spritzgussanlage mit elektrischem Auswerferpaket (Allrounder 370A, Arburg GmbH & Co. KG, Deutschland) in Abhängigkeit von der Auswerferkraft dargestellt. Zum Abformen von Mikrostrukturen können Kräfte von deutlich über 20 kN benötigt werden. Bei diesen Kräften reduziert sich die Prägelaufzeit auf wenige Sekunden, was für den Prägeprozess nicht ausreicht. Aus diesem Grund wurde für die Abmusterung der gekrümmten DOE auf eine Anlage mit hydraulischem Auswerferpaket gesetzt.

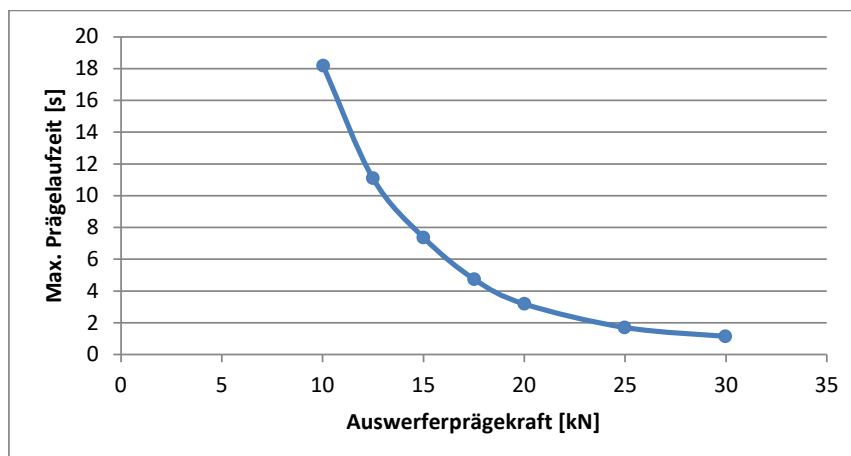


Abb. 6-12: Max. Prägelaufzeit eines elektrischen Auswerfermotors bei unterschiedlichen Prägekräften

Wie bereits in Kapitel 5.2.3 beschrieben, ist die Temperaturkontrolle in der Plastifiziereinheit von entscheidender Bedeutung für einen erfolgreichen und stabilen Spritzprägeprozess, insbesondere wenn es um die Replikation von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken geht. Aus diesem Grund besitzt die Plastifiziereinheit fünf getrennt kontrollierbare Temperaturzonen. Zusätzlich wird der Materialeinzug temperiert, um gleichmäßig temperiertes Material in die Plastifiziereinheit einzubringen. Die Positionen der beiden Werkzeughälften werden über einen zusätzlich angebrachten induktiven Abstandssensor (IWF 18U7504/S35A, Baumer GmbH, Deutschland) am Werkzeug kontrolliert und gesteuert. Dies ist für ein präzises Positionieren der Werkzeugkomponenten beim Spritzprägen von entscheidender Bedeutung.

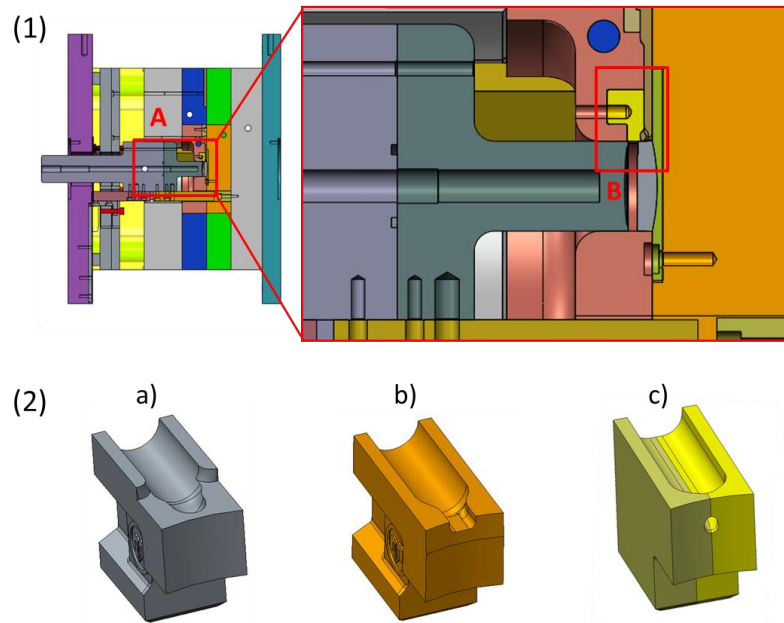
Für die Herstellung der spritzgeprägten DOE wurde das Material Trogamid myCx (Evo-nik Industries AG, Deutschland) verwendet. Dieses auf Basis von Polyamid 6 (PA6) hergestellte Material ist im sichtbaren Wellenlängenbereich transparent obwohl es einen teilkristallinen Aufbau besitzt. Das Material bietet eine hervorragende Kombination aus optischen Eigenschaften und Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse. Durch den teilkristallinen Aufbau ist Trogamid myCx sehr witterungsbeständig, was es auch für viele industrielle Anwendungen interessant macht. Die Materialeigenschaften des verwendeten Trogamid myCx sind in Tab. 6-2 aufgeführt.

Tab. 6-2: Materialeigenschaften von PA6 Trogamid myCx [166]

Parameter	Wert
Optische Eigenschaften	
• Lichttransmission [%]	92
• Brechungsindex	1,516
Verarbeitungskenndaten Spritzguss	
• Werkzeugtemperatur [°C]	60-100
• Schmelzetemperatur [°C]	260-300

Ein wichtiger Faktor bei der Herstellung von Kunststoffoptiken mittels Spritzguss/Spritzprägen ist das Füllverhalten der Schmelze in der Kavität des Werkzeuges. Neben den Spritzgussparametern wird das Füllverhalten entscheidend vom Anguss beeinflusst. Aus diesem Grund wurde das Füllverhalten der Kavität zur Herstellung der gekrümmten DOE mit drei unterschiedlichen Angussvarianten getestet. Der erste Anguss ist als Filmanguss (Abb. 6-13 a) mit einer Abmessung von 6 x 1 mm ausgelegt. Der zweite Anguss besitzt eine halbmondförmige Struktur mit einem Durchmesser von 2 mm (Abb. 6-13 b). Die dritte Angussvariante beruht auf einem Tunnelanguss mit einem Durchmesser von 0,8 mm (Abb. 6-13 c). Der Vorteil der beiden ersten Angussvarianten liegt im großen Querschnitt der Öffnung, wodurch ein schnelles Einspritzen der Schmelze in die Kavität möglich ist und gleichzeitig ein Quellfluss erzeugt wird. Allerdings bringt der große Querschnitt des Angusses den Nachteil mit sich, dass der Anguss nach dem Spritzgussprozess manuell entfernt werden muss. Im Gegensatz dazu bietet ein Tunnelanguss die Möglichkeit, den Anguss während des Spritzgussprozesses automatisch zu entfernen [154]. Die Öffnung des Angusses befindet sich bei dieser Variante im Werkzeug versenkt und nicht in der Trennebene, wodurch das automatische Abtrennen ermöglicht wird. Aus diesem Grund muss der Querschnitt jedoch so gering wie möglich gehalten werden. Der kleine Öffnungsquerschnitt des Tunnelangusses kann allerdings bei einem schnellen Einspritzen zu einem Freistrahler beim Füllvorgang führen [167]. Dabei entstehen im Bauteil ungewollte Fließmarken, die für optische Bauteile nicht geduldet werden können.





**Abb. 6-13: (1) Werkzeugmodell mit vergrößerter Darstellung des Bereiches A, (2) Angussvarianten in Form von Einsätzen an der Position B zur Herstellung der gekrümmten DOE mittels Spritzprägen mit a) Filmanguss, b) halbmondförmiger Anguss und c) Tunnelanguss [168]**

Der Spritzprägeprozess zur Herstellung der gekrümmten DOE kann in fünf Hauptschritten unterteilt werden. Zu Beginn des Spritzprägezyklus ist das Werkzeug geöffnet und der Prägestempel befindet sich in einer zurückgezogenen Position. Im zweiten Prozessschritt wird das Werkzeug geschlossen und der Prägestempel nach vorne gefahren. Der Prägestempel befindet sich dabei auf Höhe des Angusses. Im dritten Prozessschritt wird das Material in die Kavität eingespritzt. Durch den entstehenden Druck in der Kavität wird der Prägestempel nach hinten gedrückt, wodurch sich die Kavität vergrößert. Durch das Zurückdrücken des Prägestempels wird verhindert, dass am Angusspunkt ein Freistrahler entsteht und das Material in einem Quellfluss die Kavität füllt [169]. Nach einer definierten Zeitverzögerung beginnt der vierte Prozessschritt. Dabei wird die Prägebewegung gestartet und der Prägestempel nach vorne geschoben. Dadurch steigt der Druck in der Kavität und das Bauteil wird auf sein Zielmaß komprimiert. Zusätzlich unterstützt der hohe Druck in der Kavität das Füllen der feinen diffraktiven Strukturen. Der Druck wird aufrechterhalten, bis das Material vollständig abgekühlt ist. Im letzten Prozessschritt wird das Werkzeug wieder geöffnet und das Bauteil entnommen. Das Bauteil verweilt dabei auf dem Prägestempel und wird von Hand entnommen. Der gesamte Prozessablauf ist in Abb. 6-14 dargestellt.

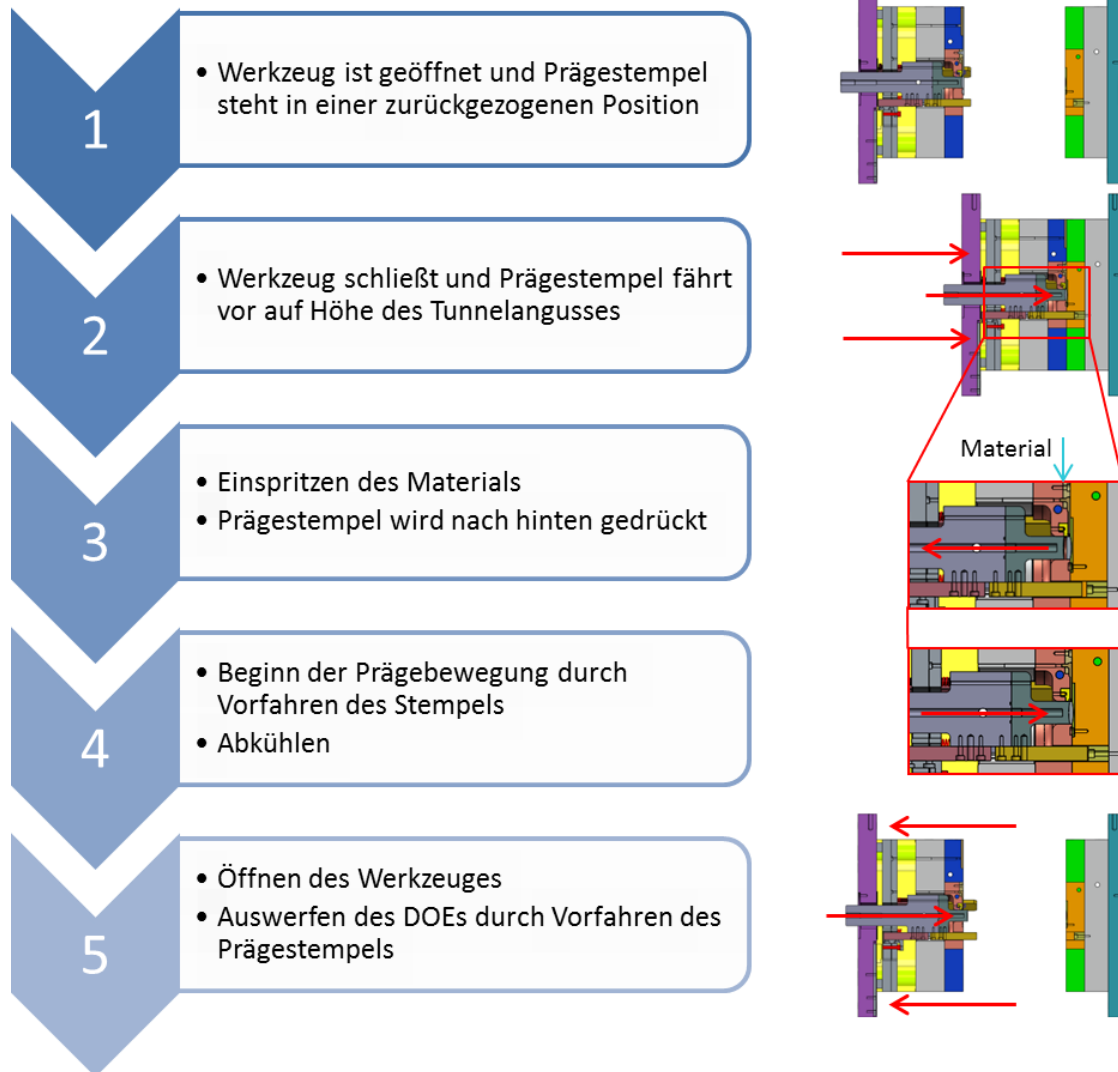


Abb. 6-14: Ablauf des Spritzprägeprozesses zur Herstellung der gekrümmten DOE

Die Verwendung einer vertikalen Einspritzeinheit ist mit einem signifikanten Nachteil verbunden. Durch die Schwerkraft wird das Material aus der Düse „gezogen“, wenn die Schmelze zu dünnflüssig ist. Aus diesem Grund muss die Temperatur in der Plastifiziereinheit so angepasst werden, dass das Material in der Düse verbleibt. Ansonsten kommt es zu einer Fadenbildung des Materials. Dieses erstarrte Material wird im nachfolgenden Zyklus in die Kavität mit eingespritzt, was zu einem inhomogenen Materialfluss und zu Fließlinien führt. Daher wurde für den Spritzprägeprozess in der Plastifiziereinheit ein negatives Temperaturprofil eingestellt. D.h. die Temperatur war in der Zone nahe dem Materialeinfluss am höchsten und wurde in Richtung Düsenspitze reduziert. Dadurch wurde verhindert, dass das Material an der Düsenspitze zu flüssig war. Das Spritzprägewerkzeug wurde in diesem Prozess mit zwei unterschiedlichen Temperaturen betrieben. Auf der Auswerferseite betrug die Temperatur des Werkzeuges sowie des Prägestempels 90 °C. Die Temperatur wurde auf dieser Seite nicht weiter erhöht, um zu verhindern, dass es bei höheren Temperaturen durch Materialausdehnung zu einer Verklebung des Prägestempels kommt. Die Düsenseite des Werkzeuges

mit dem Nickel-Stamper wurde auf 150 °C temperiert. Diese Temperatur überstieg die empfohlene Werkzeugtemperatur des Materialherstellers um 50 °C, allerdings war die hohe Temperatur notwendig, um die vollständige Abformung der Mikrostrukturen zu erreichen. Die Prägekraft während des Prozesses betrug > 25 kN bei einem Nachdruck von 570 bar. Die Prozessparameter sind in Tab. 6-3 zusammengefasst. Die Ergebnisse des Spritzprägeprozesses sowie die Ergebnisse bei der Variation der Prozessparameter werden in Kapitel 6.3 beschrieben. Die Zykluszeit zur Herstellung eines spritzgeprägten DOE betrug 120 s, wobei an dieser Stelle anzumerken ist, dass der Prozess nicht auf eine kurze Zykluszeit hin optimiert wurde.

**Tab. 6-3: Prozessparameter des Spritzprägeprozesses zur Herstellung von gekrümmten DOE**

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Schmelzetemperatur [°C]	265/260/280/285/290/73
Werkzeugtemperatur [°C]	
• Düsenseite	150
• Auswerferseite	90
• Prägestempel	90
Nachdruck [bar]	570
Einspritzdruck [bar]	1200
Einspritzzeit [s]	0,5
Prägekraft [kN]	> 25
Zykluszeit [s]	120

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Charakterisierung der durch Laserdirektschreiben hergestellten Glasmaster

Mit dem LDW-Prozess auf gekrümmten Glasmastern wurden diffraktive Strukturen mit hoher Qualität erzeugt (siehe Abb. 6-15). Die Messung des strukturierten Fotolacks mittels konfokaler Messtechnik (µsurf expert, NanoFocus AG, Deutschland), ergab eine gute Übereinstimmung der Strukturen mit dem Zieldesign. Die gemessene Rauheit auf den kontinuierlichen diffraktiven Strukturen betrug etwa  $R_a = 18 \text{ nm}$ . Die Rauheit auf den diffraktiven Strukturen führt zu Streulicht, wodurch die optische Qualität der DOE beeinträchtigt wird. Die entstandene Rauheit ist auf stehende Wellen beim LDW-Prozess zurückzuführen. Dadurch entsteht eine Art Welligkeit auf den diffraktiven Strukturen, die in der unerwünschten Rauheit resultiert. Die Flankenwinkel zwischen den einzelnen diffraktiven Strukturen betragen ca.  $65^\circ$  bei einer Kantenverrundung von ca.  $1 \text{ }\mu\text{m}$ . Diese Kantenverrundung ist signifikant kleiner als bei DOE, die mittels UP-Drehen hergestellt werden, bei denen die Verrundung  $> 5 \text{ }\mu\text{m}$  ist. Die Stufenhöhe der diffraktiven Strukturen von  $1,65 \text{ }\mu\text{m}$  wurde gut erreicht.

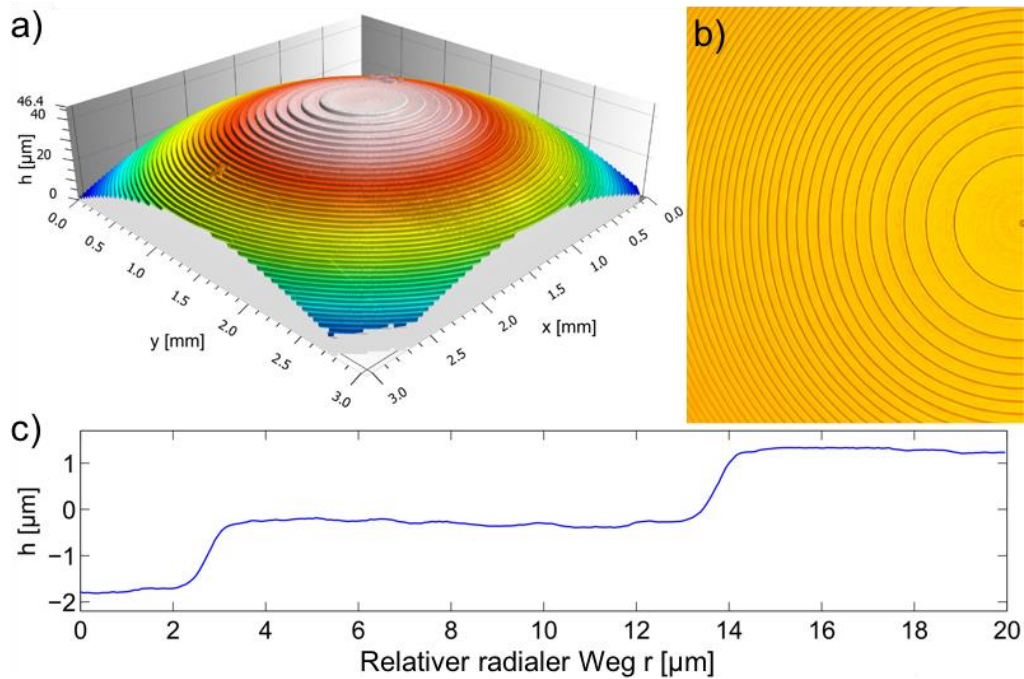
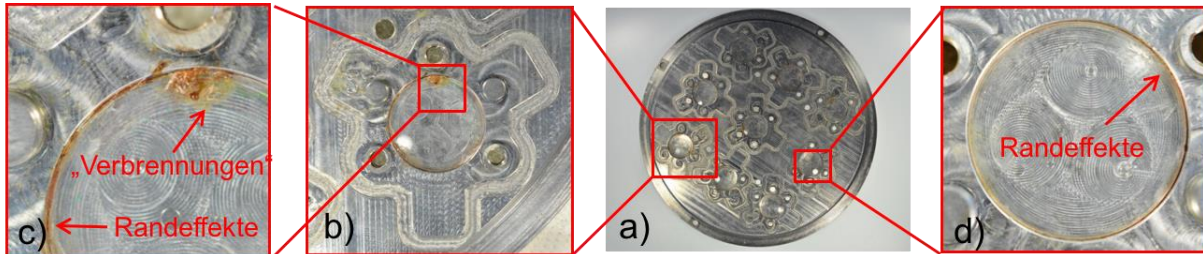


Abb. 6-15: a) Konfokale Messung eines Glasmasters nach dem LDW-Prozess, b) Mikroskopaufnahme der Oberfläche und c) AFM-Messung der Oberfläche mit gleich skalierten Achsen [42]

### 6.3.2 Ergebnisse des Galvanokopierprozesses

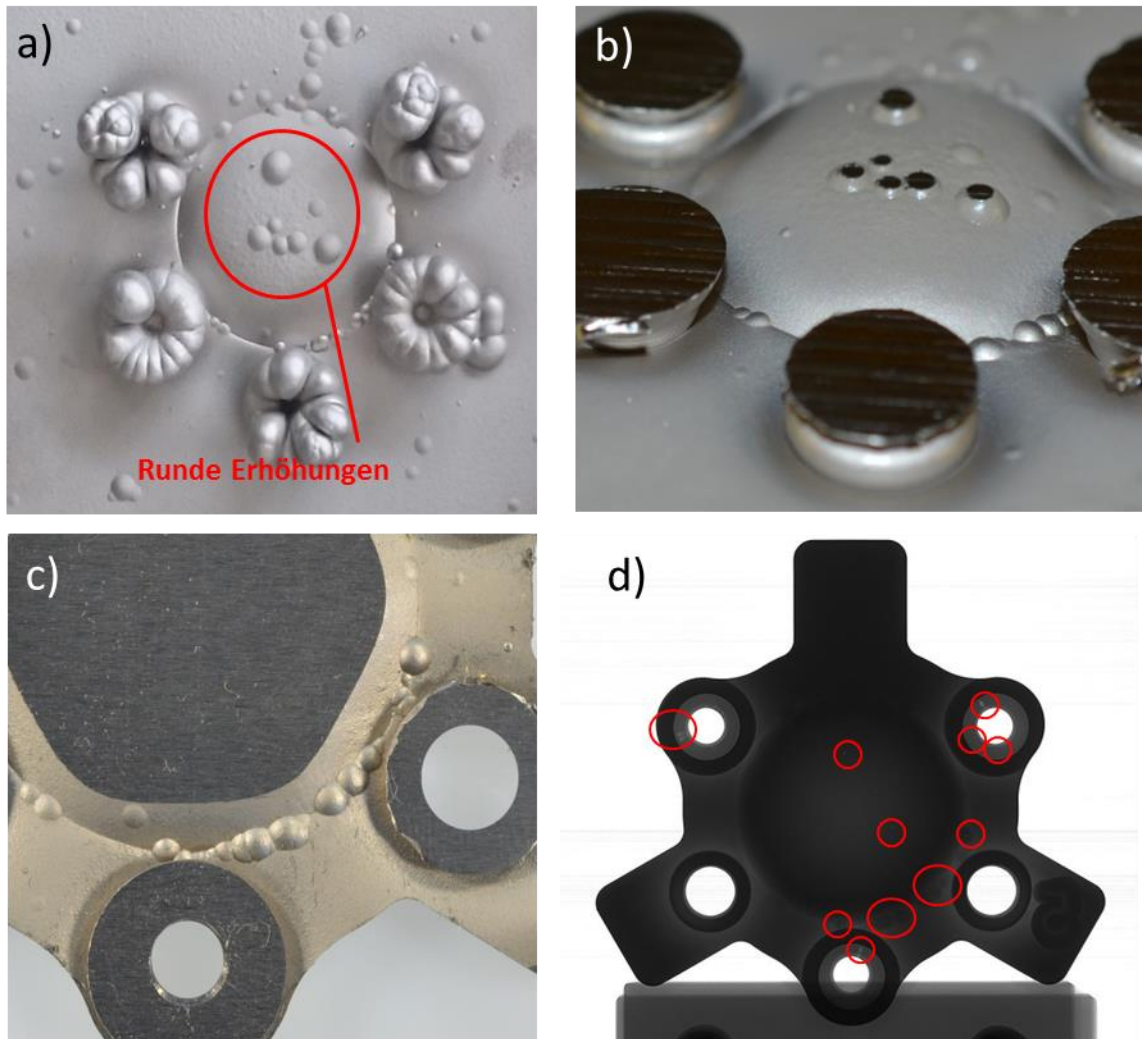
Die Analyse des verwendeten Substrattellers nach der Entformung der Nickel-Stamper zeigt bereits interessante Ergebnisse, welche Rückschlüsse auf die Qualität der Nickel-Stamper zulassen. Neben den bereits in Kapitel 6.2.2 beschriebenen blumenkohlartigen Materialanhäufungen an den Schraubengewinden und Referenzstrukturen sind am Substratteller weitere ungewollte Strukturen erkennbar. In Abb. 6-16 ist der Substratteller nach dem Entformen der Nickel-Stamper abgebildet. Die eingeklebten Glasmaster verbleiben dabei im Substratteller. Die Detailansichten in Abb. 6-16 zeigen dabei, dass es im Spalt zwischen den Glasmastern und dem Substratteller zu Randeffekten kam. Der UV-Klebstoff sieht in diesen Bereichen verbrannt aus, obwohl die Prozessstemperatur bei der Galvanoabformung nur  $52\text{ }^\circ\text{C}$  betrug. Es ist erkennbar, dass diese Randeffekte mit verbranntem UV-Klebstoff nicht gleichmäßig ausgeprägt sind, was darauf schließen lässt, dass die Glasmaster nicht exakt zentriert in die vorgesehenen Aussparungen im Substratteller eingebracht wurden (Abb. 6-16 d). Dies wurde allerdings bereits vorab vermutet. Aus diesem Grund wurde die Prozesskette für das Vereinzeln so ausgelegt, dass im Nachgang die Mitte der diffraktiven Struktur ermittelt wurde und die Dimension der Nickel-Stamper daran ausgerichtet werden konnte. Neben den Verbrennungen im Spalt kam es auch zu Verbrennungen des strukturierten Fotolacks auf der optischen Funktionsfläche. Dadurch wurde die Qualität der resultierenden Stamper deutlich beeinträchtigt. Ein Beispiel einer solchen Verbrennung ist in Abb. 6-16 c) zu sehen. Eine Ursache für die Verbrennungen könnten erhöhte Temperaturen sein, die durch Spannungsspitzen während des Galvanoprozesses entstanden sind. Ursache hierfür ist die Topographie des Substrattellers, der aufgrund der Schraubengewinde und Referenzstrukturen sehr uneben

ist. Eine weitere Möglichkeit für die Verbrennungen sind chemische Reaktionen zwischen dem UV-Klebstoff und dem Elektrolyt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass sich die Qualität der neun hergestellten Nickel-Stamper deutlich unterschied. Nicht alle Stamper wiesen die hier beschriebenen Fehlerbilder auf. Aus diesem Grund wurde für den späteren Replikationsprozess der Nickel-Stamper mit der höchsten Qualität eingesetzt.



**Abb. 6-16:** a) Substratteller nach Entformung der Nickel-Stamper, b) Detailaufnahme einer einzelnen Glasmaster-Position, c) entstandene Randeffekte und Verbrennungen des Fotolacks und d) Nahaufnahme eines eingeklebten Glasmasters mit Randeffekten nach dem Galvanokopieren [165]

Neben dem Substratteller wurden auch die abgeformten Nickel-Stamper analysiert. Dabei konnten verschiedene Defekte und Fehlstellen identifiziert werden. Die Schichtdicke des aufgewachsenen Nickels variierte von 1,7 mm bis 3,3 mm, betrug im Durchschnitt jedoch 2,9 mm, was der angestrebten Schichtdicke von 3,0 mm ausreichend nahe kam. Diese Schichtdicke war nötig, um eine ausreichende Stabilität des Stampers zu gewährleisten. Auf der Rückseite der Nickel-Stamper waren runde Erhöhungen sichtbar. Diese sind in Abb. 6-17 a) abgebildet. Diese Erhöhungen befanden sich auf dem gesamten Substratteller, d.h. sowohl in den Bereichen, in denen sich die Glasmaster befanden, als auch in den Bereichen außerhalb. Eine Anhäufung der Erhöhungen war im Bereich des Spaltes zwischen Glasmaster und Substratteller festzustellen. Das lässt darauf schließen, dass der Spalt einen negativen Einfluss auf den Galvanokopierprozess hat. Auch nach der mechanischen Bearbeitung der Rückseite des Substrattellers waren die Bereiche mit den Erhöhungen noch erkennbar (siehe Abb. 6-17 b). Insbesondere im Spaltbereich bestand keine Möglichkeit, diese Erhöhungen zu entfernen (Abb. 6-17 c). Da diese Zone jedoch außerhalb des im Spritzprägeprozess replizierten Bereichs lag, beeinflussten diese Fehlstellen die Qualität der DOE nicht. Die Analyse der runden Erhöhungen mit einer CT-Anlage (HMX ST 160, Nikon, Japan) ergab, dass es sich bei den Erhöhungen um Lufteinschlüsse, auch Lunker genannt, handelt, welche bei dem Galvanokopierprozess entstanden. In Abb. 6-17 d) ist eine CT-Messung zu sehen, bei der die Bereiche mit Lufteinschlüssen rot markiert wurden. Die Ursache für diese Lufteinschlüsse konnten zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht geklärt werden. Eine mögliche Ursache könnten Ausgasungen des Klebstoffes sein, die zu Gasblasen im Nickelstamper führen.



**Abb. 6-17: a) Rückseite eines Nickel-Stampers nach dem Galvanokopieren mit blumenkohlartigen Materialanhäufungen und runden Erhöhungen, b) Rückseite des Nickel-Stampers nach der mechanischen Bearbeitung, c) Draufsicht der runden Erhöhungen und d) CT-Aufnahme, in der die runden Erhöhungen als Lufteinschlüsse erkennbar sind [165]**

Nach der Rückseite der Nickel-Stamper wurde auch die Vorderseite analysiert. Dort befinden sich die abgeformten diffraktiven Strukturen, welche für die Qualität der DOE von entscheidender Bedeutung sind. Die auf dem Substratteller identifizierten Fehlstellen konnten auch auf den Nickel-Stampfern wiedergefunden werden. In Abb. 6-18 a) ist eine Abbildung des Nickel-Stampers mit der Bezeichnung „Stamper 5“ zu sehen. Dieser besitzt alle Fehlerbilder, die bei der Abformung aufgetreten sind und bildet somit den Nickel-Stamper mit der schlechtesten Qualität. In der Abbildung ist zu sehen, dass es neben den Lufteinschlüssen noch zu der Bildung einer Kohlenstoffschicht und zu Delaminationen kam. Diese Fehlerbilder werden im Folgenden genauer beschrieben.

Die Delamination der diffraktiven Struktur trat ausschließlich bei „Stamper 5“ auf (Abb. 6-18 b und c). Daher ist die Ursache für die Delamination mit großer Wahrscheinlichkeit auf Verunreinigungen zurückzuführen und nicht prozessbedingt. Für Testzwecke wurde dieser

Nickel-Stamper auch in einem Spritzprägewerkzeug getestet, wodurch sich die Delamination weiter ausbreitete, was in Abb. 6-18 d) zu sehen ist.

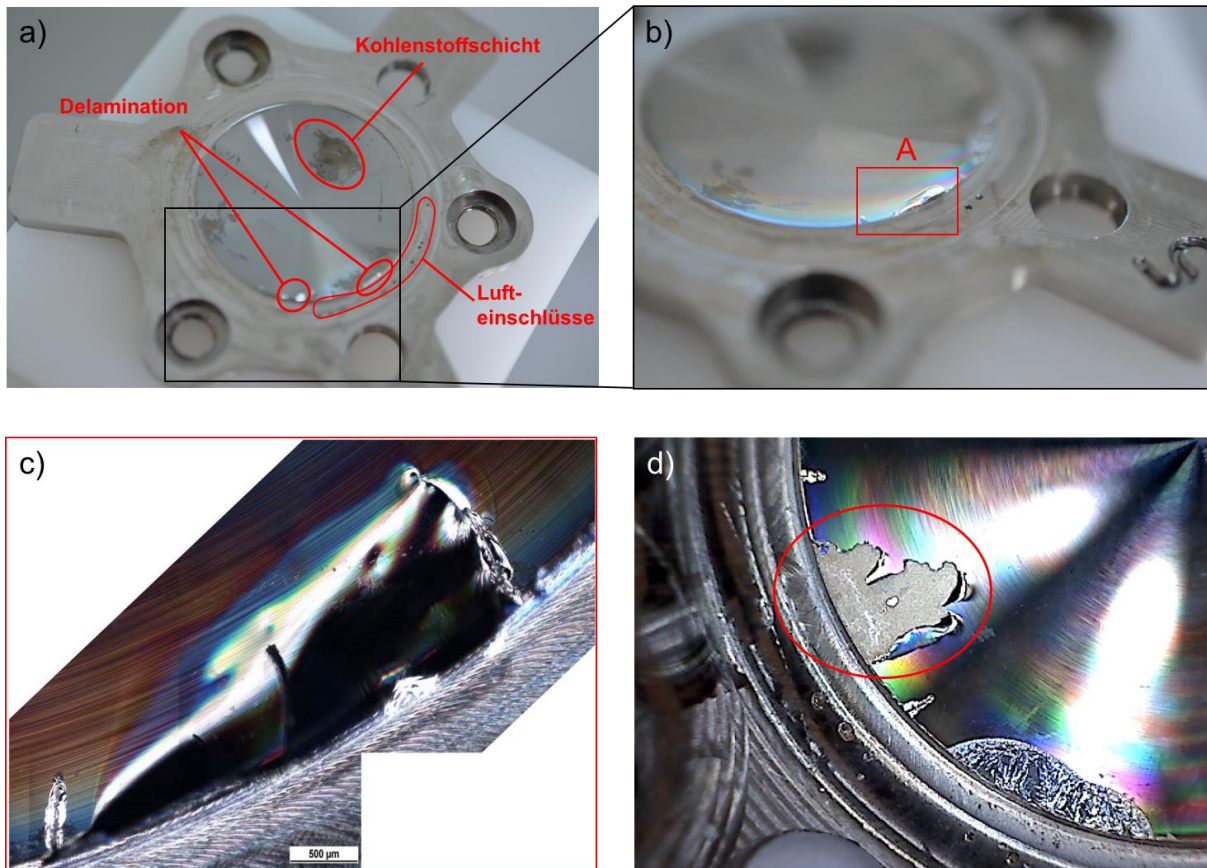


Abb. 6-18: a) Nickel-Stamper mit verschiedenen Fehlstellen, b) vergrößerte Ansicht des Nickel-Stampers, c) mikroskopische Aufnahme der Delamination im Bereich A und d) Ausbreiten der Delamination durch Spritzprägen

Eine weitere Delamination ist bei „Stamper 5“ im Bereich B erkennbar (Abb. 6-19 a), wodurch es zu einem ungleichmäßigen Materialaufbau im Galvanoprozess kam (Abb. 6-19 b). Die diffraktiven Strukturen wurden an dieser Stelle nicht abgeformt. Dies ist auch in der REM-Aufnahme deutlich zu erkennen (Abb. 6-19 c). Auch diese Art von Delamination ist auf keinem anderen Stamper zu finden und kann daher auf eine Verunreinigung zurückgeführt werden.

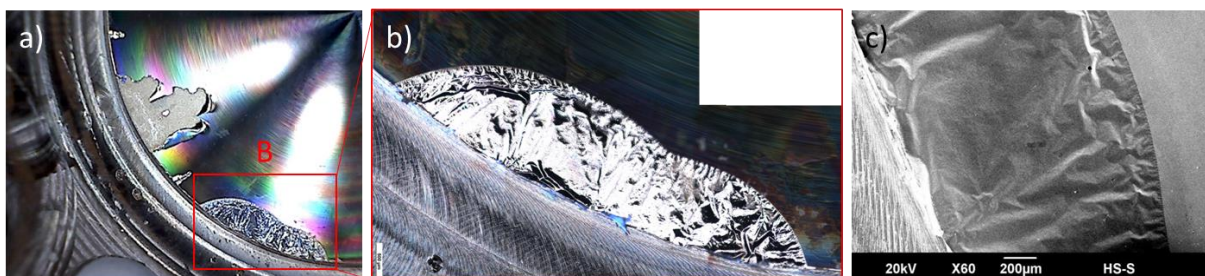


Abb. 6-19: a) Nickel-Stamper mit Delaminationen, b) vergrößerte Aufnahme der Delamination im Bereich B und c) REM-Aufnahme der Delamination

Wie bereits in Abb. 6-18 a) gekennzeichnet, sind auf der diffraktiven Struktur Zonen mit Kohlenstoffablagerungen zu erkennen. Diese Ablagerungen traten auf mehreren Stampfern auf. Eine REM Aufnahme der Ablagerungen ist in Abb. 6-20 a) zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass die Schicht sehr dünn ist und die diffraktiven Strukturen auch in diesen Bereichen vorhanden sind. Eine XPS-Analyse der Ablagerungen bestätigte, dass es sich um reinen Kohlenstoff handelt (Abb. 6-20 b). Die Ursache für diese Ablagerungen ist mit großer Wahrscheinlichkeit das Verbrennen von Fotolack, da es sonst keine anderen Quellen für Kohlenstoff während des Galvanoprozesses gab. Nicht alle Nickel-Stamper zeigten diese Ablagerungen. Durch Reinigungsprozesse nach dem Galvanoprozess konnten die Ablagerungen zwar reduziert werden, ein vollständiges Entfernen war allerdings nicht möglich.

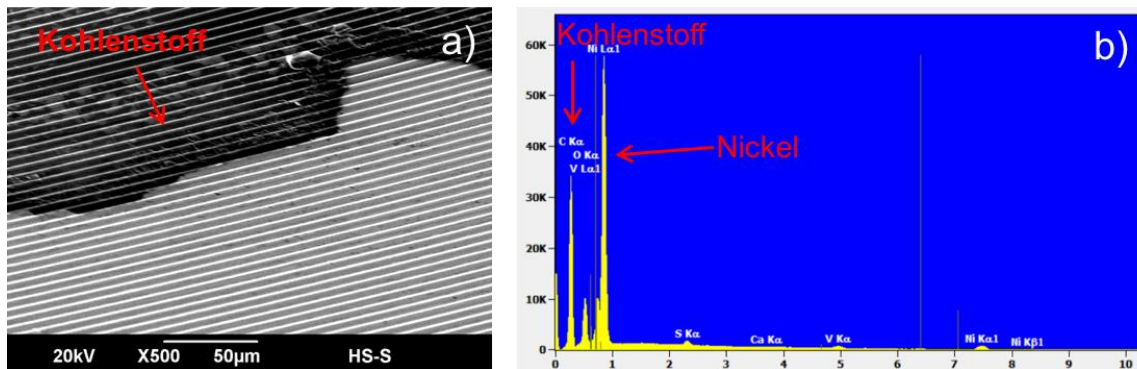


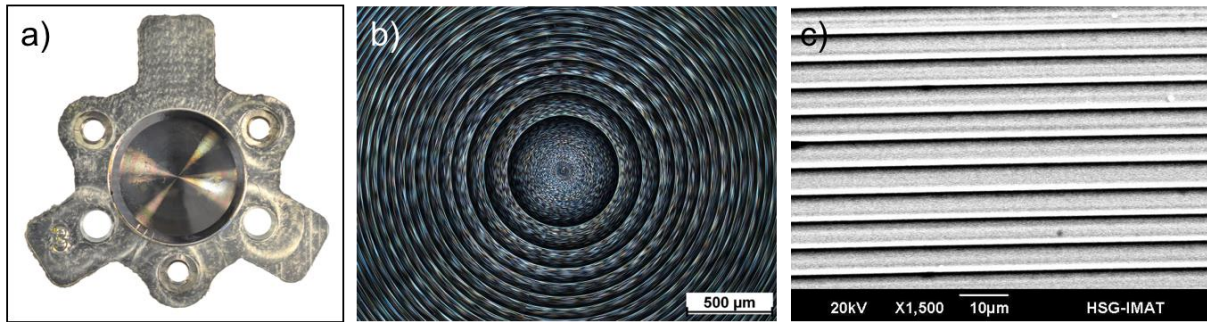
Abb. 6-20: a) REM-Aufnahme der Kohlenstoff-Ablagerungen auf der diffraktiven Struktur eines Nickel-Stamper und b) XPS-Messung der Kohlenstoffschicht

### 6.3.3 Charakterisierung der Nickel-Stamper

Neben der reinen Analyse des Galvanokopierprozesses wurden die Nickel-Stamper auch charakterisiert. D.h., dass die Qualität der Abformung der diffraktiven Strukturen auf einer gekrümmten Oberfläche untersucht wurde. Dabei waren zwei Faktoren von besonderer Bedeutung: Die Abformgenauigkeit der diffraktiven Strukturen sowie die Abformgenauigkeit der gesamten gekrümmten Fläche. Diese beiden Faktoren sind entscheidend für die spätere Qualität der hergestellten DOE. Abweichungen, die bereits im Nickel-Stamper auftreten, können während des Spritzprägeprozesses nicht mehr korrigiert werden. Ein Fokus bei der Analyse wurde auf den „Stamper 7“ gelegt, da dieser das beste Ergebnis des Galvanokopierprozesses lieferte und daher für den späteren Spritzprägeprozess ausgewählt wurde.

In Abb. 6-21 ist ein Nickel-Stamper abgebildet sowie vergrößerte Aufnahmen der diffraktiven Struktur. Der rein optische Eindruck zeigt sehr gleichmäßig abgeformte Strukturen ohne signifikante Fehlstellen.





**Abb. 6-21:** a) Bild eines abgeformten Nickel-Stampers, b) Mikroskopaufnahme des zentralen Bereiches der diffraktiven Struktur und c) REM-Aufnahme der diffraktiven Struktur

Die diffraktive Strukturen auf dem Stamper wurden mit verschiedenen Messmethoden analysiert. In Abb. 6-22 a) ist eine WLI-Messung abgebildet. Die Messung zeigt deutlich, dass die diffraktiven Strukturen abgeformt wurden. Auch die durch den LDW-Prozess entstandene Rauheit aufgrund von stehenden Wellen wurde durch den Galvanokopierprozess mit übertragen. Daraus lässt sich schließen, dass der Galvanokopierprozess eine sehr hohe Auflösung hat. Die Rauheit der diffraktiven Strukturen wurde mit einem konfokalen Messsystem ( $\mu$ Surf expert, NanoFocus AG, Deutschland) gemessen. Die resultierende Rauheit wurde mit  $RMS = 27 \text{ nm}$  gemessen, was einem  $Ra$ -Wert von  $24 \text{ nm}$  entspricht. Die Rauheit hat sich daher im Vergleich zum Glasmaster nur geringfügig geändert. Eine Messung mit dem AFM wie bei dem Glasmaster war nicht möglich, da es durch die konkave Form des Stampers zu einer Kollision des Messkopfes mit dem Stamper kommen würde. Die Stufenhöhe im Stamper wurde ebenfalls mittels WLI analysiert. Die resultierende Stufenhöhe von  $1,65 \mu\text{m}$  entspricht exakt der im Optikdesign definierten Höhe und wurde daher vollständig aus dem Glasmaster übertragen. Insgesamt kann die Übertragung der diffraktiven Strukturen vom gekrümmten Glasmaster als sehr präzise bezeichnet werden.

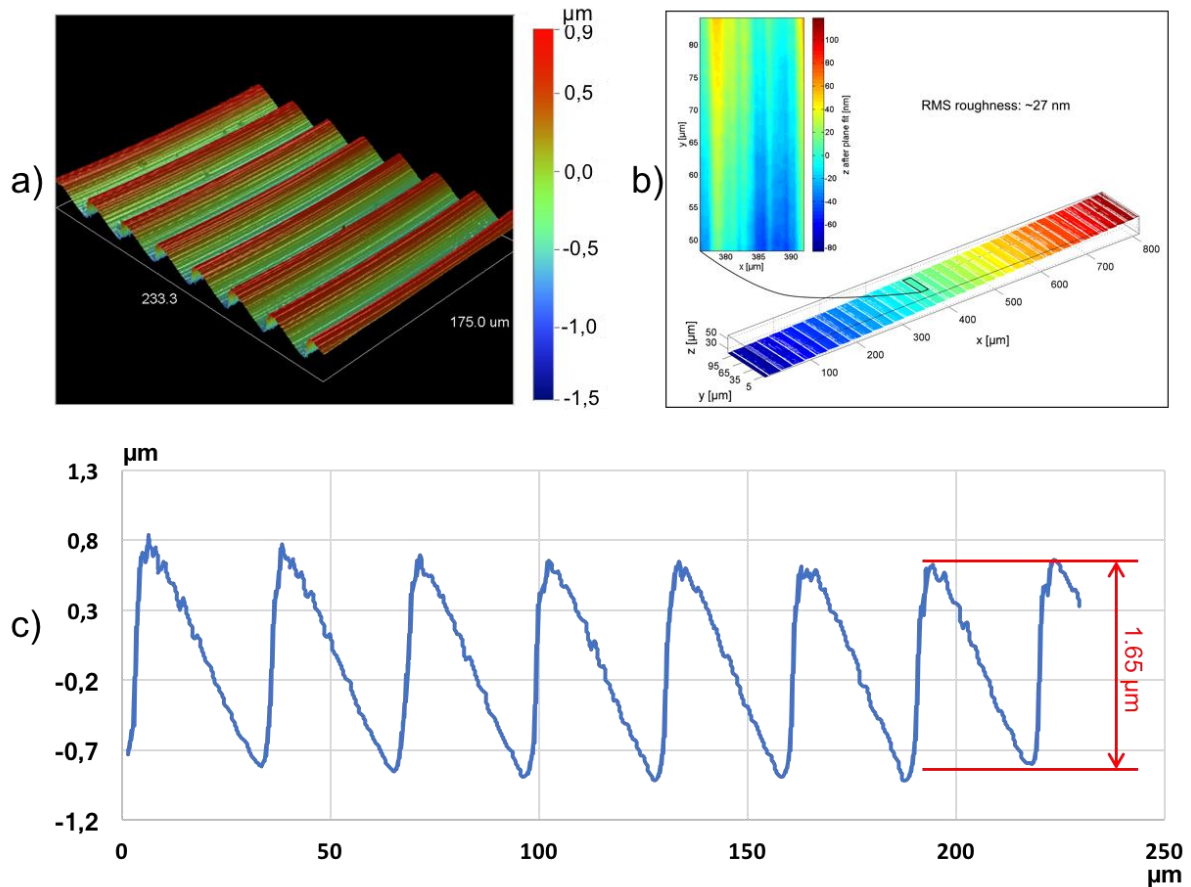


Abb. 6-22: a) WLI-Messung der diffraktiven Strukturen auf einem Stamper [42], b) Rauheitsmessung auf den diffraktiven Strukturen mittels konfokaler Messtechnik und c) extrahiertes 2D-Profil aus WLI-Messung

Neben der Abformgenauigkeit der diffraktiven Struktur ist auch die Formgenauigkeit des Gesamtradius der Fläche wichtig. Durch die Entformung der Stamper vom Substratteller nach dem Galvanokopierprozesses kann es zu Verzügen der Stamper kommen. Die Formgenauigkeit wurde durch eine Profilmessung mittels LAM überprüft. Die Schwierigkeit bei der Messung liegt dabei in der Tatsache, dass die Radiusmessung durch die diffraktiven Strukturen überlagert wird und dadurch Messfehler erzeugt werden. Eine reine Messung des Formradius ist nicht möglich. Abb. 6-23 zeigt die gemessene Formabweichung des Stampers vom Soll-Radius  $R = 51,5 \text{ mm}$ . Dabei ist die hohe „Rauheit“ in der Messung erkennbar, die durch die diffraktiven Strukturen entsteht. Dennoch ist eine übergeordnete Formabweichung erkennbar in einer Größe von  $+2,5 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $-3,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Es ist zu erwarten, dass diese Formabweichung des Stampers die Qualität der später abgeformten DOE negativ beeinflusst.

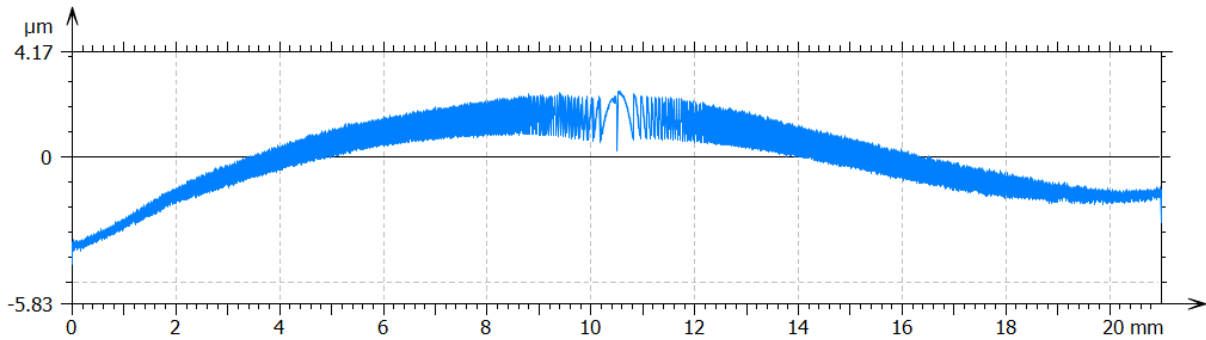


Abb. 6-23: Formabweichung vom Sollradius  $R = 51,5$  mm gemessen mittels LAM [42]

### 6.3.4 Charakterisierung des UP-gedrehten Prägestempels

Wie in Kapitel 6.2.3 (Abb. 6-10) beschrieben, wurde für das Spritzprägewerkzeug ein Prägestempel mit asphärischer Fläche hergestellt. Für die Herstellung der optischen Fläche wurde das Verfahren des UP-Drehens eingesetzt. Für die optische Fläche sind die Oberflächenrauheit und Formabweichung von der asphärischen Form die entscheidenden Kriterien. Die Oberflächenrauheit wurde mittels WLI bestimmt und betrug  $R_a = 6$  nm. Das Messergebnis ist in Abb. 6-24 dargestellt. Für die Kalkulation der Rauheit wurde aus der Messung ein 2D-Profil extrahiert und die Krümmung mathematisch entfernt.

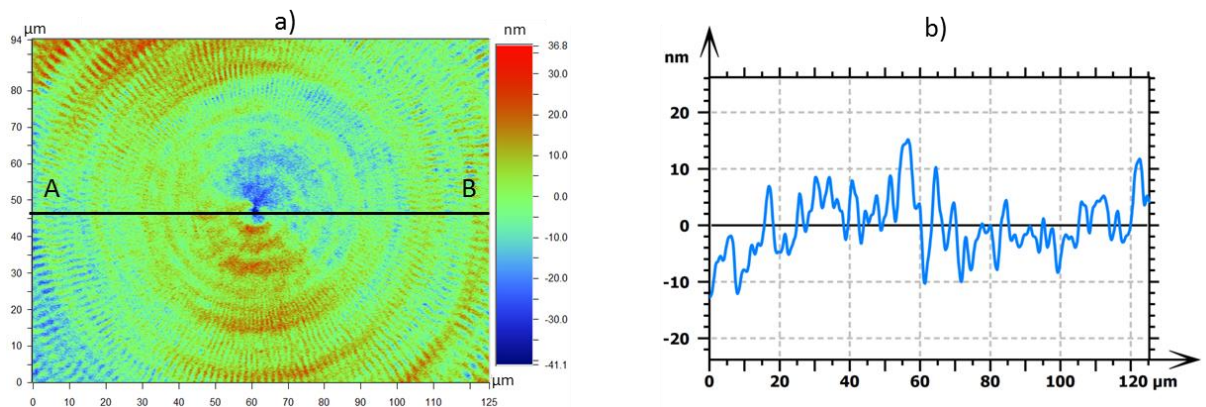


Abb. 6-24: a) Oberfläche des UP-gedrehten Prägestempels, gemessen mittels WLI, b) Extrahiertes Rauheitsprofil entlang AB

Für die Formabweichung von der Soll-Asphäre (vgl. Abb. 6-1) wurde das Profil des Prägestempels mit einem taktilen Messgerät (SURFCOM 5000, Carl Zeiss AG, Deutschland) gemessen. Anschließend wurde das gemessene Profil mit der Soll-Asphäre verglichen. In Abb. 6-25 a) ist das gemessene Profil mit der überlagerten Soll-Asphäre dargestellt. In der überlagerten Ansicht ist keine Formabweichung zu erkennen. In Abb. 6-25 b) ist die berechnete Formabweichung des gemessenen Profils dargestellt. Die gemessene Abweichung liegt bei  $< 0,4$   $\mu\text{m}$ . Dies ist eine sehr geringe Formabweichung, welche die optische Funktionsfähigkeit des Bauteils nicht beeinträchtigen sollte.

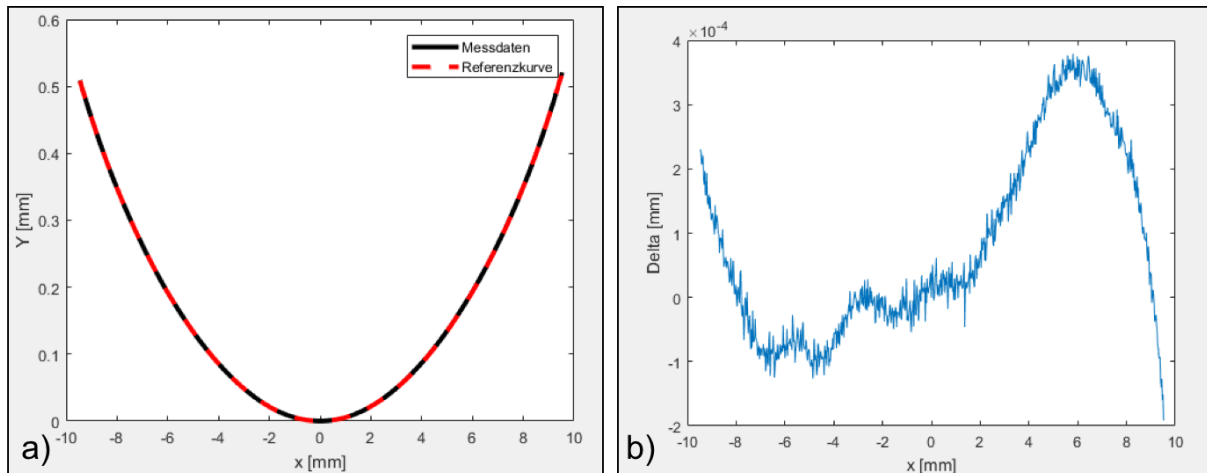


Abb. 6-25: a) Gemessene Asphäre mittels taktiler Messung mit überlagelter Referenzkurve, b) Formabweichung des gemessenen Profils von der Soll-Asphäre

### 6.3.5 Ergebnisse des Spritzprägeprozesses zur Herstellung gekrümmter DOE

Die Ergebnisse des Spritzprägeprozesses zur Herstellung der gekrümmten DOE werden in drei Unterkapitel untergliedert. In Kapitel 6.3.5.1 wird beschrieben, wie das Füllverhalten bei der Herstellung der DOE durch Anpassung der Angussgeometrie und der Prägebewegung optimiert werden konnte. In Kapitel 6.3.5.2 wird dargestellt, wie die nötige Prozessstabilität erreicht werden konnte und welchen Einfluss dabei insbesondere die Temperaturführung besitzt. In Kapitel 6.3.5.3 werden dann die Ergebnisse der Abformung der DOE geschildert. Die Aufteilung des Kapitels stellt also eine Art „Vorgehensweise“ dar, wie eine erfolgreiche Abmusterung von mikrooptischen Komponenten umgesetzt werden kann.

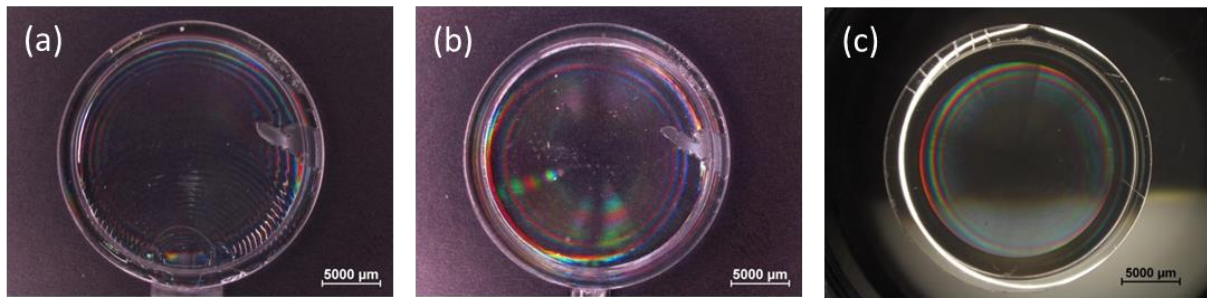
#### 6.3.5.1 Optimiertes Füllverhalten durch Anpassung der Angussgeometrie und Prägebewegung

Wie bereits in Kapitel 6.2.4 beschrieben, ist das Füllverhalten während des Spritzprägeprozesses entscheidend für die resultierende Qualität der herzustellenden optischen Komponenten. Insbesondere bei transparenten Bauteilen, wie z.B. dem gekrümmten DOE, führt ein schlechtes Füllverhalten zu unerwünschten Defekten, welche die optische Funktionsfähigkeit beeinträchtigen. Aus diesem Grund wurde für die Herstellung der gekrümmten DOE neben den Prozessparametern auch die Geometrie des Angusses variiert. Hierfür wurde der Anguss in Form eines wechselbaren Einsatzes umgesetzt, um verschiedene Geometrien ohne großen Umbau im Spritzprägewerkzeug zu realisieren. Die eingesetzten Angussgeometrien sind in Kapitel 6.2.4 beschrieben (Abb. 6-13). Für die Optimierung des Füllverhalten wurde teilweise Werkzeugeinsatz „Stamper 5“ eingesetzt, welcher insgesamt die schlechteste Qualität nach dem Galvanokopieren aufwies (vgl. Abb. 6-18). Dieser wurde allerdings bewusst zum Einfahren des Prozesses gewählt, da die schlechte Abformung der diffraktiven Strukturen in diesem Stamper keinen Einfluss auf das Füllverhalten ausübt. Die in Stamper 5 aufgetretene Delami-

nation der diffraktiven Struktur ist daher in Abb. 6-26 a) und b) sichtbar. Die anderen Stamper konnten somit für andere Versuche geschont werden.

Beim Verwenden des Filmangusses sind deutliche Fließlinien im abgemusterten Bauteil zu sehen (Abb. 6-26 a). Diese konnten auch durch Änderung der Prozessparameter nicht vollständig entfernt werden. Die Fließlinien im DOE zeugen von einem ungleichmäßigen Füllen der Kavität [167]. Die Fließlinien im Bauteil führen zu einer inhomogenen Materialbeschaffenheit, wodurch die optische Abbildungsqualität negativ beeinflusst wird. Aus diesem Grund eignet sich der Filmanguss nicht zur Herstellung der gekrümmten DOE. Die Verwendung des halbmond-förmigen Angusses ermöglicht eine homogene Füllung der Kavität. Im gesamten DOE sind kleine Fließmarken erkennbar, welche die optische Qualität beeinträchtigen könnten (Abb. 6-26 b). Allerdings haben beide der genannten Angussgeometrien einen entscheidenden Nachteil: Durch den großen Querschnitt der beiden Angussvarianten ist eine direkte Abtrennung des Angusses während des Spritzprägeprozesses nicht möglich. Hierfür muss ein zusätzlicher Arbeitsschritt durchgeführt werden. Dies ist neben der zusätzlichen Arbeitszeit auch daher nicht optimal, da durch das Abtrennen das DOE beschädigt werden kann und insbesondere die diffraktiven Strukturen sehr anfällig sind.

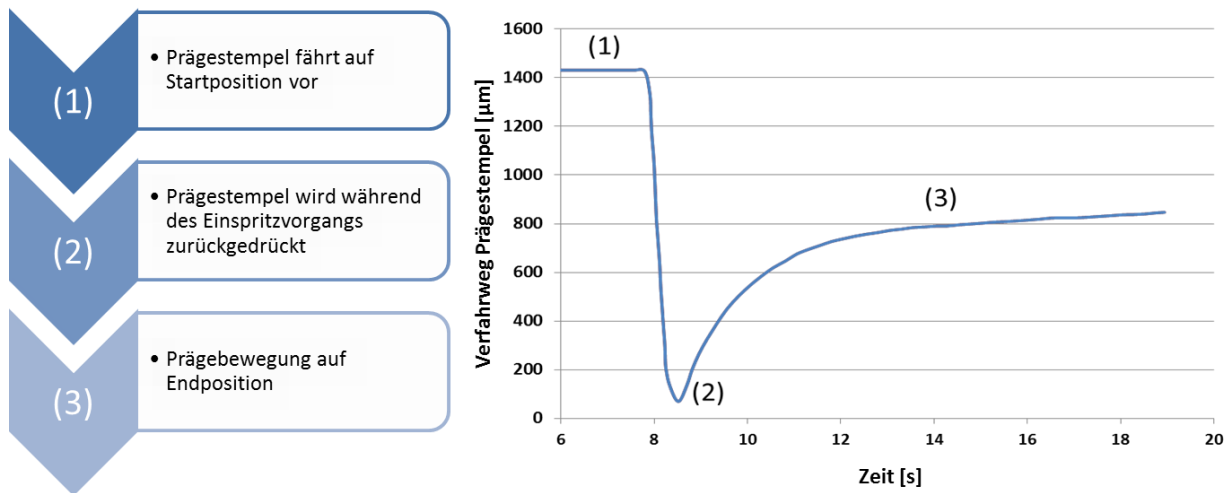
Die Verwendung eines Tunnelangusses hingegen ermöglicht ein direktes Abtrennen des Anguss während des Spritzprägeprozesses. Dabei wird der Anguss während des Auswerfens abgebrochen, sodass kein zusätzlicher Prozessschritt nötig ist. Allerdings verursacht der geringe Querschnitt eines Tunnelanguss ein Freistahlverhalten. Dabei füllt das Material die Kavität nicht in einem Quellfluss, sondern strahlförmig, wodurch es zu Fließlinien und Lufteinschlüssen kommen kann [154]. Um dies zu verhindern, sollte das Material nach dem Eindringen in die Kavität gegen eine Wand fließen, wodurch der Schmelzfluss aufgestaut und somit die Freistahlbildung verhindert wird [169]. In dem hier vorgestellten Prozess kann das so gelöst werden, dass der Prägestempel während des Füllvorganges in einer vorgefahrenen Position nahe des Angusses steht (vgl. Abb. 6-14). In Abb. 6-26 c) ist ein gekrümmtes DOE dargestellt, welches mit einem Tunnelanguss hergestellt wurde. Dabei sind keine Fließmarken oder anderen Defekte erkennbar, welche die optischen Eigenschaften beeinträchtigen würden. Aufgrund der Möglichkeit zum direkten Abtrennen des Angusses und der Tatsache, dass bei Verwendung geeigneter Prozessparameter ein gutes Füllverhalten erzielt werden kann, wurde im weiteren Verlauf der Spritzprägeprozess mit einem  $D = 0,8$  mm großen Tunnelanguss durchgeführt.



**Abb. 6-26: Spritzgeprägte DOE hergestellt mit unterschiedlichen Angussgeometrien a) 6 x 1 mm Filmanguss mit deutlichen Fließlinien, b) halbmond-förmiger Anguss mit homogenem Füllverhalten ohne Fließmarken und c) Tunnelanguss mit homogenem Füllverhalten ohne Freistrahleffekt [168]**

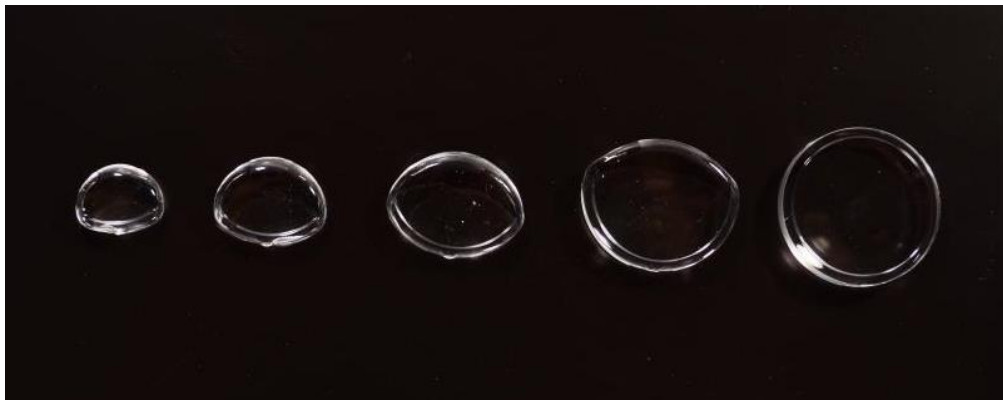
Wie bereits im Spritzprägeprozess zur Herstellung des MLAs beschrieben, ist der Verfahrensweg des Prägestempels von entscheidender Bedeutung für das Füllverhalten. Der Verfahrensweg muss exakt mit dem Einspritzvorgang koordiniert werden, um einen stabilen Prägeprozess zu erhalten. Es ist dabei wichtig, den Prägeprozess so zu starten, dass die eingespritzte Schmelze noch nicht erstarrt ist und somit noch komprimiert werden kann.

Für die Herstellung der gekrümmten DOE bei Verwendung eines Tunnelangusses kann der Verfahrensweg des Prägestempels in drei Abschnitte unterteilt werden (Abb. 6-27). Zu Beginn des Prozesses wird der Prägestempel auf die Startposition vorgefahren. Dabei steht der Stempel direkt vor der Öffnung des Tunnelangusses, um eine Freistrahlbildung zu verhindern. Die Schmelze wird dabei direkt auf die Stempeloberfläche eingespritzt, wodurch diese verwirbelt wird und ein homogenes Füllverhalten erzielt werden kann. Mit Beginn der Einspritzphase wird der Prägestempel in der zweiten Phase des Verfahrensweges durch den Einspritzdruck nach hinten gedrückt. Dabei legt der Prägestempel einen Weg von etwa 1,3 mm zurück. In der letzten Phase des Verfahrensweges wird die eigentliche Prägebewegung durchgeführt. Diese startet mit einer Zeitverzögerung von 0,7 s nach dem Beginn des Einspritzvorganges. Bei dieser Bewegung wird die eingestellte Prägekraft aufgewendet, um den Prägestempel nach vorne zu bewegen. Dadurch wird die Schmelze gleichmäßig verdichtet und es entsteht eine homogene Druckverteilung im Bauteil. Da für den Prozess die Prägebewegung mit einem hydraulischen Auswerferpaket durchgeführt wurde, fährt der Prägestempel nicht auf eine definierte Endposition, sondern ist kraftgesteuert. D.h., dass eine definierte Prägekraft aufgebracht wird und der Prägestempel auf die daraus resultierende Endposition fährt. Um diese zu beeinflussen, kann das Dosiervolumen oder der Nachdruck angepasst werden.



**Abb. 6-27: Verfahreweg des Prägestempels in drei Phasen (1) Prägestempel auf Startposition (2) Prägestempel wird während des Einspritzvorgangs nach hinten gedrückt (3) Prägebewegung auf Endposition**

Um das Füllverhalten in der Kavität bewerten zu können, wurde eine Füllstudie angefertigt. Dabei wurde das Dosiervolumen langsam gesteigert, um zu sehen, ob die Kavität in Form eines Quellflusses gefüllt wird, um ein homogenes Ergebnis zu erhalten. Die bei der Füllstudie hergestellten Bauteile sind in Abb. 6-28 abgebildet. Dabei ist zu sehen, dass sich das Material gleichmäßig in der Kavität verteilt, ohne dass Fließmarken oder Schlieren entstehen. Freistrahleffekte sind ebenfalls nicht erkennbar.



**Abb. 6-28: Füllstudie des Füllverhaltens bei der Herstellung der gekrümmten DOE bei Verwendung eines Tunnelangusses [165]**

### 6.3.5.2 Erhöhte Prozessstabilität durch präzise Temperaturkontrolle

Für die Herstellung von Kunststoffoptiken mit reproduzierbar hoher Qualität ist ein hoher Grad an Prozessstabilität wichtig. Durch die transparenten Eigenschaften der Komponenten sind Bauteilfehler direkt sichtbar und beeinflussen die Funktionsfähigkeit der Komponenten negativ. Wie bereits im Kapitel 6.2.3 (Abb. 6-9) beschrieben, wird für dieses Projekt ein Spritzprägewerkzeug verwendet, bei dem die Schmelze vertikal in die Trennebene eingespritzt wird. Dadurch ist die Gefahr eines sogenannten „kalten Pfropfens“ stark erhöht, da

durch die vertikale Anordnung bei ungeeigneter Parameterwahl Material aus der Düse fließen kann. Ein kalter Pfropfen entsteht durch erkaltete Schmelze im Bereich der Düsen Spitze, welche beim Einspritzen in die Kavität eingebracht wird [167]. Dieser Pfropfen beeinflusst das Fließverhalten der Schmelze negativ und führt zu deutlich sichtbaren Markierungen an der Bauteiloberfläche und verschlechterten mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Daher sind kalte Pfropfen unbedingt zu vermeiden. Ein entscheidender Faktor, um die Entstehung von kalten Pfropfen zu verhindern, ist das Temperaturmanagement in der Plastifiziereinheit und der Düsen Spitze. Die gesamte Einspritzeinheit wird nach dem Einspritzvorgang vom Werkzeug abgehoben, um zum Einen das Öffnen des Werkzeuges zu ermöglichen und zum Anderen das Abkühlen der Schmelze im Bereich der Düsen Spitze zu verhindern, da die Temperatur des Werkzeuges (90-150 °C) deutlich unter der Düsentemperatur liegt (265 °C).

Um ein ungewolltes Austreten von Schmelze aus der Düse zu unterbinden, wurde in der Plastifiziereinheit ein negatives Temperaturprofil eingestellt (265/260/280/285/290/73 °C). Dabei ist die Temperatur im Bereich des Materialeinzugs mit 290 °C höher als an der Düsen Spitze, bei der die Temperatur nur noch 265 °C beträgt. Mit diesem Temperaturprofil konnte vermieden werden, dass Schmelze während des Prozesses aus der Düsen Spitze austritt und es zu einer Fadenbildung kommt. Höhere Temperaturen in der Düsen Spitze sowie auch der gesamten Schmelze führten zu einer Fadenbildung beim Abheben der Einspritzeinheit. Dieses erstarrte Material würde dann beim nachfolgenden Einspritzprozess mit in die Kavität eingespritzt, was zu deutlich sichtbaren Markierungen an der Bauteiloberfläche sowie einem inhomogenen Füllverhalten führt.

Für die Verhinderung von kalten Pfropfen in den Bauteilen war im genannten Prozess neben den Temperaturen in der Plastifiziereinheit und der Düsen Spitze auch bereits die Temperatur am Materialeinzug wichtig. Hierfür wurde ein zusätzliches Heizband am Materialeinzug angebracht. Nur wenn die Temperatur am Materialeinzug präzise reguliert wird, kann das Temperaturprofil so beherrscht werden, dass der entstehende kalte Pfropfen aus der Düsen Spitze entfernt wird, indem er am Anguss des vorherigen Bauteils hängen bleibt. Dies ist in Abb. 6-29 a) dargestellt. 73 °C entsprechen dabei der ermittelten Temperatur am Materialeinzug, wenn der Prozess kontinuierlich für ca. 2 Stunden läuft. Wenn die Temperatur bewusst geringer gehalten wird, z.B. bei 50 °C, wird der kalte Pfropfen beim Abheben der Düse vom Werkzeug nicht vollständig aus der Düse entfernt, wie in Abb. 6-29 b) zu sehen ist. In diesem Fall sind in den folgenden Bauteilen Fließmarken und Oberflächendefekte erkennbar. Zu Beginn des Spritzprägeprozesses wird der kalte Pfropfen ebenfalls nicht entfernt da der Temperatureinzug zu diesem Zeitpunkt noch kalt ist (siehe Abb. 6-29 c). Dadurch entstehen ebenfalls Fließmarken und Oberflächendefekte in den Folgebauteilen. Dieses Ergebnis zeigt, wie wichtig eine vollständige Kontrolle der Parameter für die Replikation ist. Die Qualität der entstehenden optischen Komponenten ist von einer Vielzahl an Faktoren und Parametern abhängig und kann nur konstant gehalten werden, wenn diese Faktoren und Parameter kontrolliert und geregelt werden. Erst dadurch kann eine hohe Prozessstabilität gewährleistet werden.



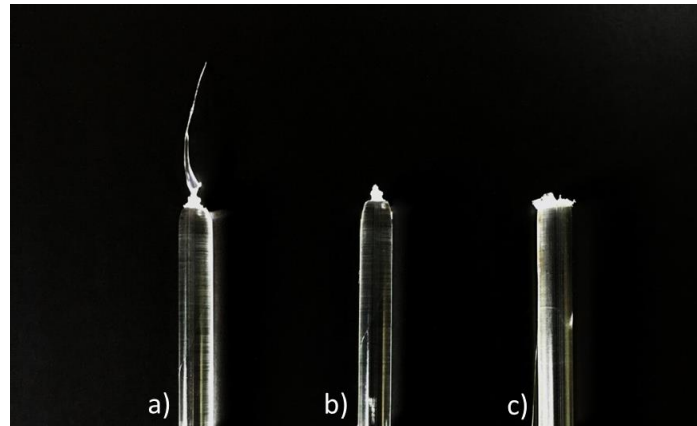


Abb. 6-29: Entfernen eines kalten Pfropfens in Abhängigkeit von der Temperierung am Material-einzug auf a) 73 °C, b) 50 °C und c) ohne Temperierung [168]

Die hier vorgestellte Lösung stellt eine Kompromisslösung dar, da die Entstehung von kalten Pfropfen nicht vollständig verhindert werden kann. Das Prozessfenster für die Temperaturführung in der Plastifiziereinheit ist durch die vertikale Anordnung stark eingeschränkt, da bei höheren Temperaturen Material aus der Düse fließt. Aus diesem Grund kann die Pfropfenbildung nicht vollständig verhindert werden sondern nur durch ein „Propfziehen“ durch den Anguss des vorherigen Bauteils beherrscht werden. Dadurch kommt es zu keiner negativen Beeinflussung der Qualität bei der Herstellung von gekrümmten DOE mittels Spritzprägen.

### 6.3.5.3 Abformung der diffraktiven Mikrostrukturen

Eine der größten Herausforderungen für die Herstellung der gekrümmten DOE ist die Abformung der diffraktiven Mikrostrukturen. Es ist empfehlenswert, die vorab beschriebenen Optimierungen des Füllverhaltens und der Prozessstabilität durchzuführen, bevor die Abformungsgenauigkeit optimiert wird. Andernfalls sind Änderungen der Spritzprägeparameter überlagert von peripheren Einflüssen, wodurch keine direkten Rückschlüsse von Parameteränderungen auf Bauteilergebnis gezogen werden können. In diesem Abschnitt soll daher explizit darauf eingegangen werden, wie die Prozessparameter optimiert werden können, um die diffraktiven Strukturen bestmöglich abzuformen. Für die Herstellung der gekrümmten DOE und insbesondere die Abformqualität der diffraktiven Strukturen waren drei Spritzprägeparameter von entscheidender Bedeutung:

- Schmelzetemperatur
- Werkzeugtemperatur
- Prägekraft

Insbesondere für optische Bauteile mit Mikrostrukturen spielen diese Parameter eine wichtige Rolle. Da die Schmelzetemperatur, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, nur bedingt angepasst werden konnte, musste die Abformqualität insbesondere durch Anpassen der Werkzeugtemperatur und der Prägekraft optimiert werden. Hierfür wurde die Werkzeug-

temperatur in einem Bereich von 90 – 150 °C variiert und die Prägekraft im Bereich 25 – 40 kN angepasst. Die verwendeten Spritzprägeparameter sind in Tab. 6-4 aufgelistet.

**Tab. 6-4: Prozessparameter beim Spritzprägeprozess zur Herstellung der gekrümmten DOE**

Parameter	Wert
Schmelzetemperatur [°C]	265/260/280/285/290/73
Werkzeugtemperatur [°C]	90 - 150
Prägekraft [kN]	20 - 40
Nachdruck [bar]	450 - 800
Theoretischer Innendruck [bar]	629 - 1007

Die vom Hersteller empfohlene Werkzeugtemperatur gemäß des Datenblattes beträgt 60 – 100 °C (vgl. Tab. 6-2) [166]. Für die Herstellung von optischen Bauteilen sind hohe Werkzeugtemperaturen empfehlenswert, um eine homogene Materialverteilung in der Kavität zu erreichen. Zu Beginn wurde die Werkzeugtemperatur variiert in einem Bereich von 90 – 150 °C, was signifikant höher ist als vom Hersteller empfohlen. Dabei wurde die Schmelzetemperatur in der Plastifiziereinheit nicht verändert und die Prägekraft konstant auf 25 kN gehalten. Es ist zu beachten, dass die Temperatur ausschließlich auf der festen Düsenseite mit dem Stamper erhöht wurde. Die Auswerferseite wurde konstant auf 90 °C gehalten, um ein flüssiges Verfahren des Prägestempels zu ermöglichen und ein „Verklebmen“ zu verhindern. Für die Bewertung der Abformgenauigkeit wurden die diffraktiven Strukturen auf den spritzgeprägten gekrümmten DOE mittels WLI vermessen und die Stufenhöhe anhand von extrahierten 2D-Profilen ermittelt. Die Profile bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen sind in Abb. 6-30 dargestellt.

Bei einer Werkzeugtemperatur von 90 °C betrug die Stufenhöhe der abgeformten diffraktiven Strukturen auf den gekrümmten DOE nur knapp 0,4 µm (Abb. 6-30 a). Dieser Wert liegt deutlich unter den geforderten 1,65 µm, die durch das Optikdesign vorgegeben sind. Die diffraktiven Strukturen wurden demzufolge nicht vollständig vom Stamper abgeformt, da das Material die Mikrostrukturen nicht vollständig füllte. Bei einer leicht erhöhten Werkzeugtemperatur von 110 °C konnte die Abformqualität schon deutlich verbessert werden. Die Stufenhöhe der diffraktiven Strukturen betrug dabei ungefähr 1,2 µm, was allerdings noch immer keiner vollständigen Abformung entspricht (Abb. 6-30 b). Bei einer Erhöhung der Werkzeugtemperatur auf 150 °C konnte eine Stufenhöhe von 1,5 µm erzielt werden. Das entsprechende Profil ist in Abb. 6-30 c) dargestellt. Die Werkzeugtemperatur von 150 °C stellte das Limit der verfügbaren Temperiergeräte dar. Aus diesem Grund konnte die Werkzeugtemperatur nicht weiter erhöht werden, um die Abformqualität weiter zu verbessern. Bei den drei beschriebenen Prozessen betrug der Nachdruck jeweils 450 bar. Der Nachdruck spielt bei diesem Prozess eine entscheidende Rolle, da er als Gegenspieler zur Prägekraft fungiert und somit genutzt werden kann, um die gewünschte Bauteildicke von 4,3 mm zu erzielen.

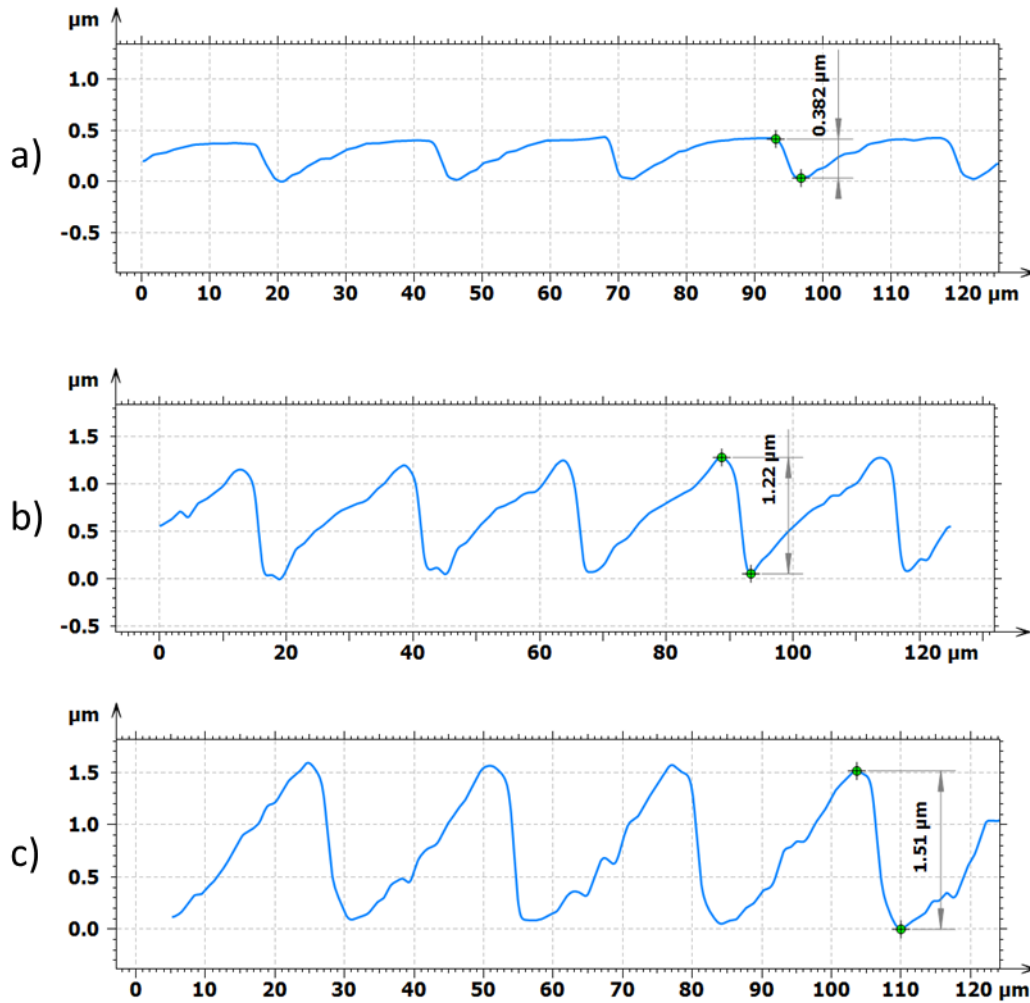


Abb. 6-30: Resultierende Stufenhöhe der spritzgeprägten DOE bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen von a) 90 °C, b) 110 °C und c) 150 °C, gemessen mittels WLI

Da die Werkzeugtemperatur nicht auf über 150 °C erhöht werden konnte, wurde bei dieser Temperatur die Prägekraft im Prozess gesteigert. Bei einer Erhöhung der Prägekraft von 25 kN auf 30 kN musste der Nachdruck auf 570 bar erhöht werden, um die gewünschte Bauteildicke von 4,3 mm zu erzielen. Durch die Erhöhung der Prägekraft konnte die abgeformte Stufenhöhe auf die gewünschten 1,65 μm verbessert werden. Eine Vermessung der Stufenhöhe mittel LAM ist in Abb. 6-31 abgebildet. Die Abweichung der Messung (1,67 μm) in Höhe von 20 nm von der Soll-Höhe kann durch die Messungenauigkeit des Messsystems sowie die manuelle Positionierung der Messpunkte im Profil erklärt werden. Eine weitere Erhöhung der Prägekraft auf 35 kN und 40 kN ergab keine Verbesserung der Abformqualität.

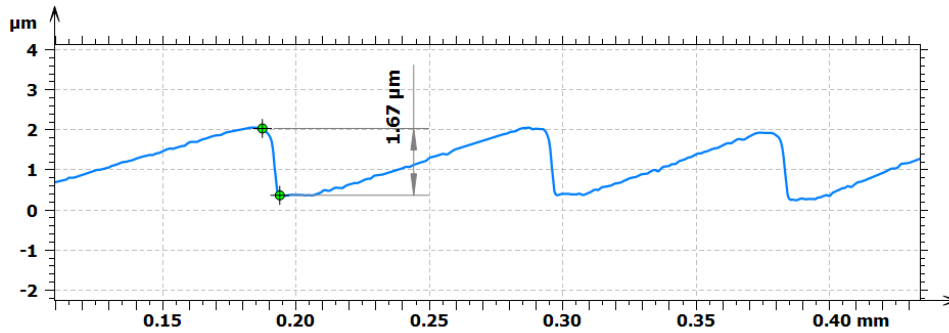


Abb. 6-31: Resultierenden Stufenhöhe der spritzgeprägten DOE bei 150 °C Werkzeugtemperatur und 30 kN Prägekraft, gemessen mittels LAM

An dieser Stelle ist auch zu erwähnen, dass keine sichtbaren Beeinträchtigungen des Materials erkennbar waren, obwohl die Werkzeugtemperatur deutlich über der empfohlenen Temperatur durch den Hersteller lag. Eine ausführlichere Charakterisierung der spritzgeprägten gekrümmten DOE wird im folgenden Kapitel beschrieben.

### 6.3.6 Charakterisierung der spritzgeprägten DOE

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits gezeigt, dass die geforderte Stufenhöhe der diffraktiven Struktur in Höhe von 1,65 µm vollständig abgeformt werden konnte. In Abb. 6-32 a) ist ein spritzgeprägtes gekrümmtes DOE abgebildet. Ein Ausschnitt der diffraktiven Struktur ist in Abb. 6-32 b) dargestellt. Darauf ist deutlich zu sehen, dass, wie im Design vorgesehen, die laterale Strukturgröße nach außen immer kleiner wird. Die Oberfläche der diffraktiven Strukturen weist eine geringe Welligkeit/Rauheit auf. Diese wurde bereits im Glasmaster und in den Stampfern gemessen und ist ein Resultat von stehenden Wellen während des LDW-Prozesses bei der Herstellung der Glasmaster. Eine WLI-Messung der diffraktiven Strukturen auf einem spritzgeprägten DOE ist in Abb. 6-32 c) dargestellt. Die dabei gemessene Rauheit auf den diffraktiven Strukturen beträgt  $R_a = 18$  nm. Wie bereits beschrieben wird erwartet, dass die Rauheit auf der Oberfläche zu Streulicht führt, wodurch die Effizienz reduziert wird.

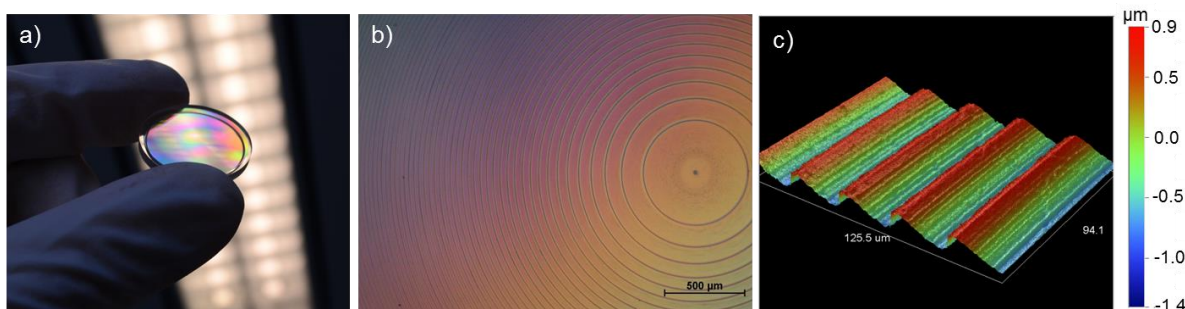
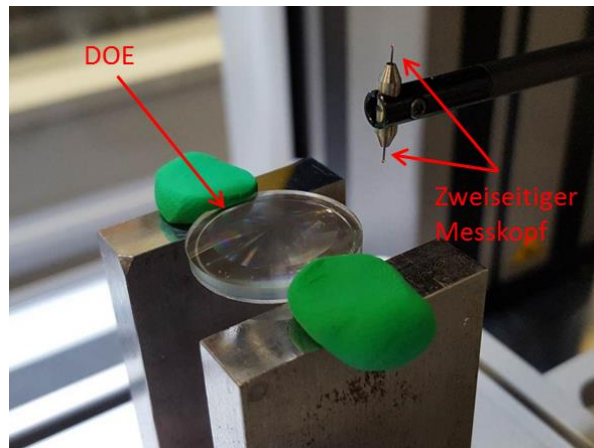


Abb. 6-32: a) Spritzgeprägtes DOE b) Mikroskopaufnahme der diffraktiven Struktur auf einem spritzgeprägten DOE und c) Ausschnitt der diffraktiven Struktur gemessen mittels WLI [42,168]

Für die Vermessung der Bauteilgeometrie der gekrümmten DOE wurde ein taktiles Messsystem verwendet (MahrSurf, Mahr AG, Deutschland). Die Vermessungen wurden

direkt beim Hersteller durchgeführt. Für die Messungen wurde ein spezieller zweiseitiger Messkopf verwendet. Dieser ermöglicht es, das Bauteil von beiden Seiten in derselben Aufspannung zu vermessen. Dies ist insbesondere für die Messung des Zentrierfehlers von entscheidender Bedeutung. Für den Zentrierfehler wurde der Abstand zwischen der Mitte der diffraktiven Struktur und der Mitte der asphärischen Rückseite gemessen. Der Messaufbau ist in Abb. 6-33 dargestellt.



**Abb. 6-33: Messaufbau zur beidseitigen taktilen Messung der DOE in einer Aufspannung durch einen zweiseitigen Messkopf**

Die Abweichung der diffraktiven Seite des DOE wurde mit  $RMS = 2,26 \mu m$  gemessen. Das Messergebnis ist in Abb. 6-34 a) dargestellt. Die diffraktive Seite stellt dabei das obere Profil dar. Es ist bei der Messung zu beachten, dass die diffraktiven Strukturen die Messung überlagern und nicht aus dem Ergebnis herausgerechnet werden können. Dadurch entsteht ein Messfehler, der Ungenauigkeiten in das Ergebnis einbringt, deren Höhe nicht quantifizierbar ist. Die maximale Abweichung vom Soll-Radius beträgt  $P-V = 9,85 \mu m$ . Bei der Vermessung der asphärischen Rückseite wurde eine Formabweichung von  $RMS = 1,63 \mu m$  ermittelt bei einer maximalen Abweichung von  $P-V = 5,49 \mu m$ . Der Zentrierfehler, welcher in einer Aufspannung gemessen wurde, ohne das Bauteil zu bewegen, beträgt  $14 \mu m$ . Dieser Wert liegt innerhalb der Toleranz des Optikdesigns, bei dem eine Toleranz von  $\pm 50 \mu m$  vorgesehen ist. Allerdings ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass der Zentrierfehler bei unterschiedlichen Spritzguss-Prozessparametern deutlich variierte. Im Mittel Betrag der Zentrierfehler  $123 \mu m$ . Der teilweise sehr große Zentrierfehler kann auf den Spritzprägeprozess zurückgeführt werden, da der Prägestempel mit einem Spalt in das Werkzeug integriert werden muss, um eine Verklemmen des Prägestempels zu verhindern. Dadurch entsteht eine leichte Beweglichkeit, welche zu einem Zentrierfehler im Bauteil führt. Zusätzlich kann im Spritzgusswerkzeug die Position des strukturierten Werkzeugeinsatzes zum Prägestempel nicht nachjustiert werden. Daher kann die Positionierung der beiden Einsätze zueinander im vorhandenen Spritzgusswerkzeug nicht optimiert werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Ausrichtung der Werk-

zeugeinsätze zueinander hochpräzise durchgeführt werden muss, um hochwertige Bauteile zu erhalten.

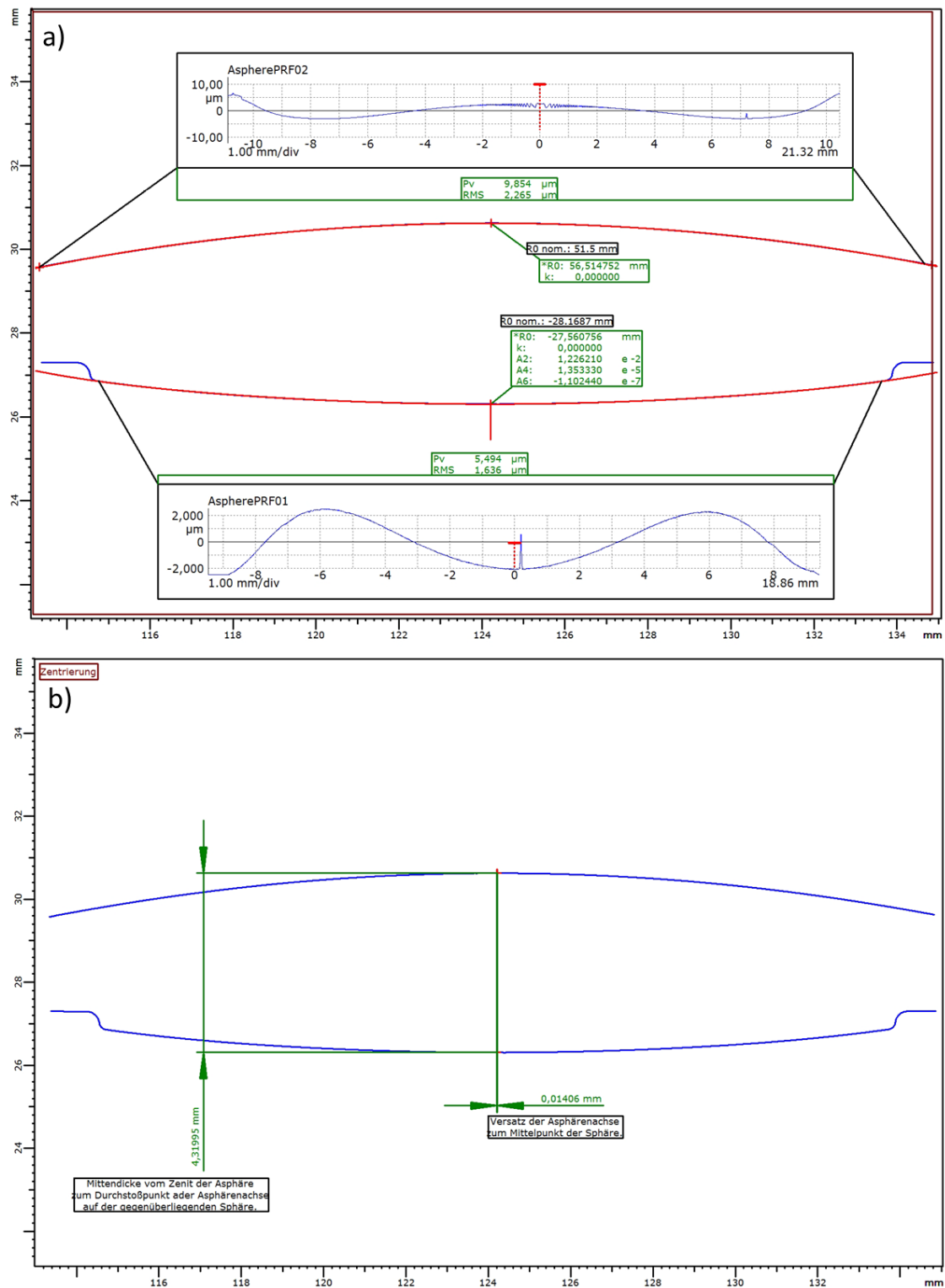


Abb. 6-34: Taktile Vermessung der gekrümmten DOE a) Formabweichung der diffraktiven Seite vom Soll-Radius und Formabweichung der asphärischen Fläche von der Soll-Asphäre, b) Zentrierfehler der gegenüberliegenden Seiten

Neben der Untersuchung der Formabweichung und Abformgenauigkeit wurde auch die optische Effizienz der spritzgeprägten Bauteile gemessen. Diese Untersuchungen wurden am Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart durchgeführt. Die optische Beugungseffizienz der finalen spritzgeprägten Bauteile bei der zentralen Wellenlänge von 840 nm wurde dabei mit >73% gemessen. Die gemessene Effizienz beinhaltet dabei auch Verluste durch dielektrische Effekte (etwa 8%) und Materialabsorption.

### 6.3.7 Demonstration der Funktionsfähigkeit in einem konfokalen Messaufbau

Für die Demonstration der Funktionsfähigkeit der spritzgeprägten gekrümmten DOE wurde ein chromatisch konfokaler Messaufbau am Institut für technische Optik der Universität Stuttgart verwendet. Hierfür wurde das DOE in eine Halterung eingebracht und in das System über ein Feingewinde integriert. In Abb. 6-35 ist der prinzipielle Aufbau des Messsystems sowie die Einbauposition des DOE dargestellt. Das DOE spielt in diesem Aufbau eine entscheidende Rolle. Die durch das DOE erzeugte Farbstreuung ermöglicht eine Übersetzung von Höheninformationen in Farbinformationen, wodurch ein Messsignal für eine Höhenmessung generiert werden kann.

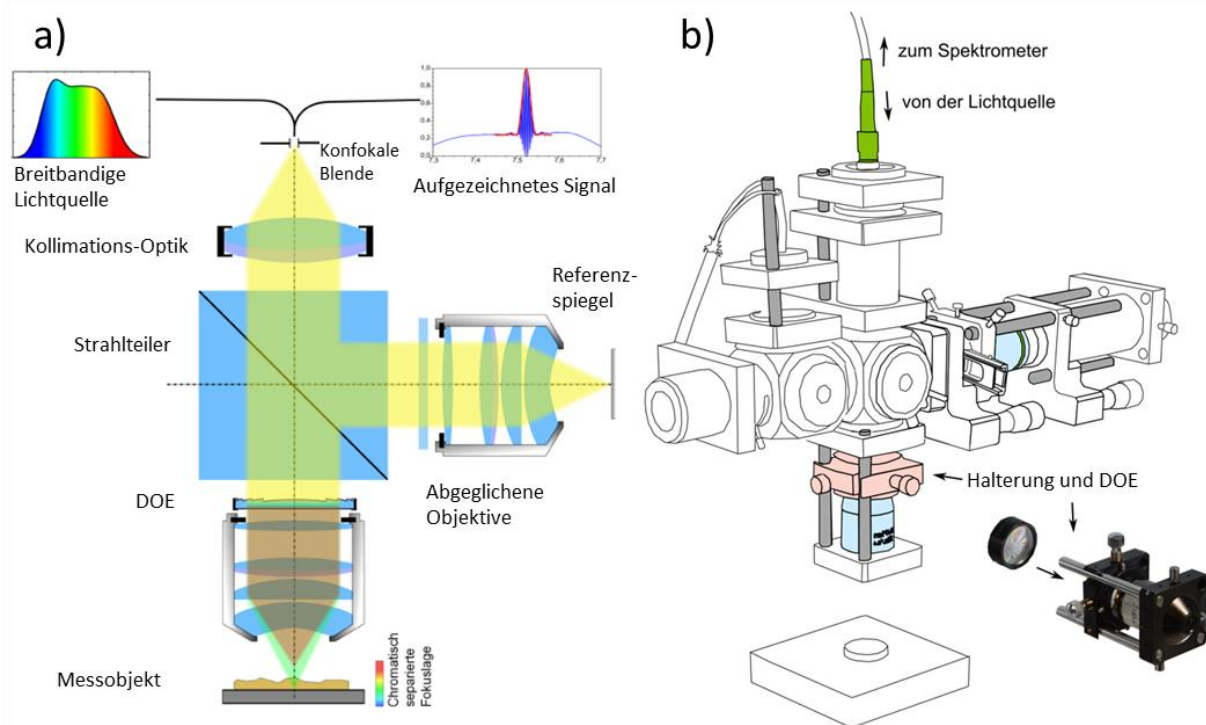


Abb. 6-35: a) Schematischer Aufbau des Demonstrators mit Mess- und Referenzarm, b) Strichskizze des fertigen Messaufbaus [165,170]

Für die experimentelle Charakterisierung der DOE wurde in dem beschriebenen Messaufbau eine chromatisch-konfokale Höhenmessung durchgeführt. Dabei wurde in Schritten von 10 µm über einen Scanbereich von 100 µm Messungen vorgenommen und das Mess-

signal in einem Spektrometer detektiert. Die Messungen wurden an einem Planspiegel durchgeführt. Das Messergebnis ist in Abb. 6-36 a) dargestellt. Für die Bewertung des Signals kann die absolute Signalthöhe der Peaks herangezogen werden. Je höher das Signal, desto geringer sind die Abbildungsfehler des DOE und desto höher ist dessen Effizienz. Zusätzlich lässt die Form der Peaks Rückschlüsse auf die Qualität der DOE zu. Idealerweise sollten die Peaks frei von Nebenmaxima sein. Das Messergebnis in Abb. 6-36 a) zeigt jedoch solche Nebenmaxima was auf verbleibende sphärische Aberrationen im System hindeutet. D.h., dass die Formabweichungen der DOE von der gewünschten Soll-Form auch im Messsignal erkennbar sind. Zusätzlich erfolgten noch Messungen mit den hergestellten DOE an einem Tiefen-Normal. Das Messergebnis ist in Abb. 6-36 b) dargestellt. Dabei ist das Messsignal blau dargestellt und die Soll-Tiefe in Rot. Die Messergebnisse zeigen, dass bis auf einige Messartefakte im Kantenbereich eine sehr präzise Messung durchgeführt werden kann.

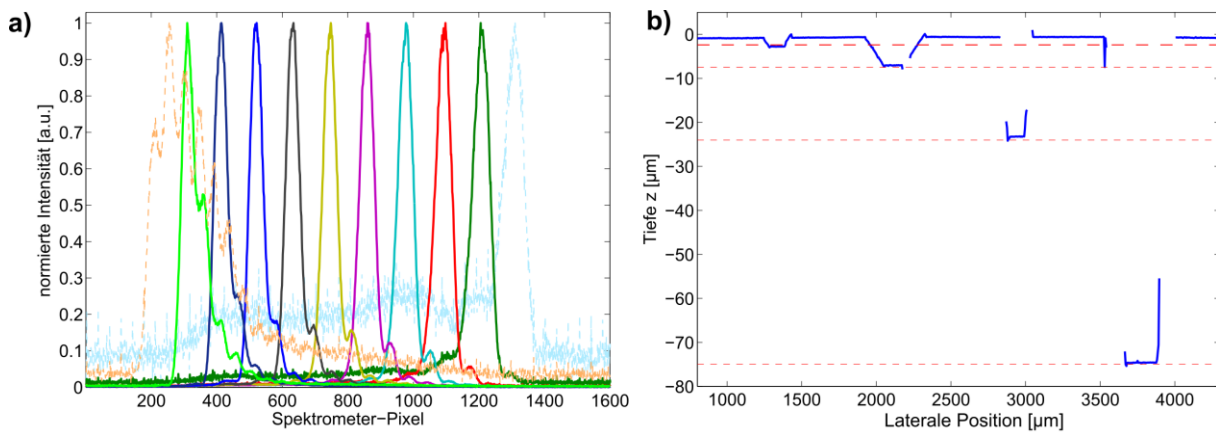


Abb. 6-36: a) Chromatisch-konfokale Messsignale über 100 µm Scanweg in Z mit 10 µm Schritten, b) Messung an einem Stufennormal mit Soll-Tiefen (rot) [165]

## 6.4 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung

In den folgenden Abschnitten werden die Prozesskette sowie die Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte nochmals diskutiert. Außerdem sollen allgemeine Erkenntnisse abgeleitet werden, welche für andere Anwendungen eingesetzt werden können.

Die Herstellung von Glasmastern mittels LDW erzielte gute Ergebnisse, die später in den Galvanokopierprozess überführt werden konnten. Mit einer Oberflächenrauheit auf den kontinuierlichen diffraktiven Strukturen von  $R_a = 18$  nm ist allerdings noch Potential für die Optimierung des Prozesses vorhanden. Im Vergleich zu alternativen Herstellungsverfahren wie UP-Drehen, die auch gekrümmte Geometrien bearbeiten können, ist die Oberflächenqualität schlechter. Bei UP-Drehprozessen können Oberflächenrauheiten von  $R_a < 10$  nm erzielt werden. Vergleicht man allerdings das Profil einer kommerziellen DOE-Linse, welche mittels UP-Drehen hergestellt wurde, mit einem über LDW hergestellten Glasmaster, wird die Prozessüberlegenheit des LDW-Prozesses erkennbar. Zwei Profile, die mittels AFM gemessen wurden, sind in Abb. 6-37 dargestellt. Das kommerzielle DOE weist dabei starke Verrundungen an der Kante auf, welche herstellungsbedingt durch Limitationen in den verfügbaren



Diamantwerkzeugen entstehen. Im Vergleich hierzu zeigt das Profil der diffraktiven Struktur, welche mittels LDW hergestellt wurde, deutlich geringere Kantenverrundungen.

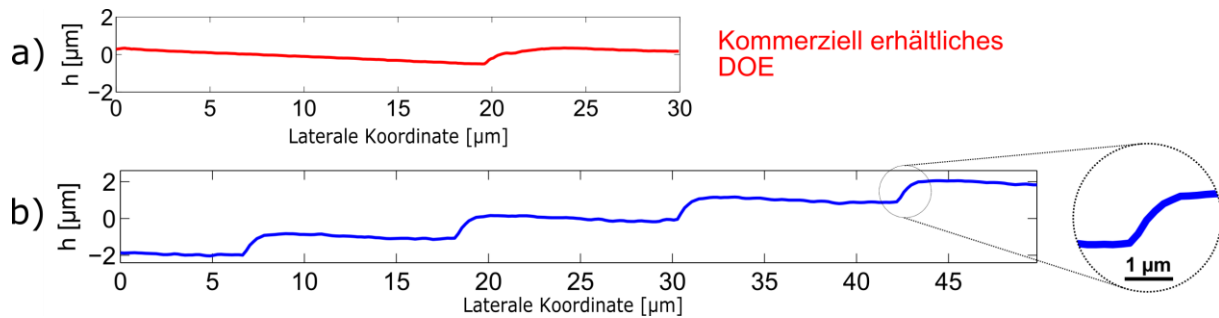


Abb. 6-37: Vergleich der entstehenden Profile bei der Herstellung von diffraktiven Strukturen mittels a) UP-Drehen und b) LDW

Die anschließende Abformung der Glasmaster durch Galvanokopieren erzielte gute Ergebnisse. Die Integration der 9 Glasmaster in einen Substratteller, der zusätzlich Schraubengewinde und Referenzstrukturen besitzt, erwies sich als erfolgreich. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass dieser Prozessschritt eine entscheidende Bedeutung für den Galvanokopierprozess hat. Durch die unebene Topographie des Substrattellers mit den Schraubengewinden und Referenzstrukturen entstand beim Galvanokopierprozess ein stark inhomogenes elektrisches Feld, wodurch die Geschwindigkeit der Schichtabscheidung lokal stark variierte. Dadurch kam es zu blumenkohlförmigem Aufwachsen von Nickel an verschiedenen Strukturen. Zusätzlich führte der Spalt zwischen eingeklebten Glasmastern und Substrattellern zu Randeffekten, welche eine Art Verbrennung von Klebstoff und Fotolack darstellte. Wie bereits im Ergebnisteil beschrieben, kann auch eine chemische Reaktion die Ursache hierfür sein. Daraus lässt sich folgern, dass der Spalt zwischen den Glasmastern und dem Substratteller so gering wie möglich gehalten werden muss. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die verwendeten kommerziellen Glassubstrate für den LDW-Prozess bereits eine Herstellungstoleranz von 100 µm besitzen, wodurch der Spalt etwas größer gestaltet werden muss. Zusätzlich kann versucht werden, einen Klebstoff mit höherer Temperaturbeständigkeit zu verwenden, um die Randeffekte zu verhindern. In wie weit die Randeffekte und der Klebstoff das Abformergebnis beeinflussen haben, kann nur schwer abgeschätzt werden. Zum Beispiel ist noch ungeklärt, ob diese Effekte für die entstandenen Lunker in den Stampfern verantwortlich sind. Allgemein kann gesagt werden, dass die Qualität der hergestellten Stamper stark schwankt und es teilweise zu Beeinträchtigungen der diffraktiven Strukturen kam. Dadurch war die Ausbeute des Galvanokopierprozesses eingeschränkt. Eine Optimierung des Galvanokopierprozesses war im Rahmen dieser Arbeit nur beschränkt möglich, da dieser extern bei der Firma Temicon (Temicon GmbH, Deutschland) durchgeführt wurde. Das Galvanokopieren ist ein bekannter Prozess für flache Substrate und wurde hier erstmals für 3D-Strukturen angewendet. Daher besteht weiteres Optimierungspotential für diesen Prozess.

Die beim Galvanokopierprozess erzielte Abformgenauigkeit war extrem hoch, da keine Abweichungen der diffraktiven Strukturen vom Glasmaster festgestellt werden konnten. Allerdings konnten in der Gesamtform leichte Abweichungen vom Soll-Radius gemessen werden, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit bei der Entformung der einzelnen Stamper vom Substratteller entstanden. Dabei mussten die einzelnen Stamper mechanisch durch Druck entformt werden, wodurch sich die Stamper leicht verformten. Die Formabweichung wurde dabei mit  $+2,5\ \mu\text{m}$  bis  $-3,5\ \mu\text{m}$  bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass die Messung durch die vorhandenen diffraktiven Strukturen beeinflusst wird, wodurch ein unbestimmbarer Messfehler generiert wird.

Das verwendete Werkzeugkonzept zur Herstellung von gekrümmten DOE mittels Spritzprägen erwies sich als sehr gut geeignet. Insbesondere der modulare Aufbau mit wechselbaren Werkzeugeinsätzen und Angüssen ermöglichte eine gute Optimierung des Spritzprägeprozesses. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass die Herstellung der gekrümmten DOE mit einem Tunnelanguss möglich ist. Die Kombination mit einer vertikalen Einspritzeinheit ermöglicht das direkte Abtrennen des Angusses im Spritzprägeprozess. Allerdings führt das Verwenden einer vertikalen Einspritzeinheit auch zu starken Einschränkungen im möglichen Temperaturbereich für die Schmelze, da es bei zu hohen Temperaturen zum Austritt von Schmelze kommt. Um dies zu verhindern, muss entweder auf ein horizontales Werkzeugkonzept gewechselt, oder eine Nadelverschlussdüse verwendet werden, welche die Düsenspitze nach dem Einspritzvorgang mittels einer Nadel verschließt [139]. Dadurch kann die Fadenbildung verhindert werden, allerdings steigen die Kosten und der Aufwand für das Werkzeug sowie die Komplexität des Spritzprägeprozesses [154].

Die Ergebnisse des Spritzprägeprozesses zeigen, dass eine Replikation der gekrümmten DOE möglich ist. Für die Einstellung des Prozesses ergab sich, dass eine Aufteilung in mehreren Phasen vorteilhaft ist. In einem ersten Schritt wird das Füllverhalten der Kavität optimiert, wobei auch geometrische Anpassungen am Anguss möglich sind. Für das Füllverhalten ist auch der Verfahrensweg des Prägestempels äußerst wichtig. Die Koordination von Prägebewegung und Materialeinspritzung muss exakt koordiniert werden, um ein gutes Ergebnis zu erhalten. Nachdem das Füllverhalten optimiert wurde, ist es wichtig, dass eine Prozessstabilität gewährleistet ist. Damit ist insbesondere gemeint, dass Einflussfaktoren wie Material und Temperaturen der Schmelze exakt kontrolliert werden und konstant gehalten werden müssen. Denn Änderungen in diesen Faktoren beeinflussen den nächsten Prozessschritt. Dabei dürfen keine weiteren „Umwelteinflüsse“ die Parametersuche beeinflussen, da sonst keine direkte Korrelation zwischen Parameteränderung und Ergebnis hergestellt werden kann. Als die wichtigsten Prozessparameter für die Abformung der feinen diffraktiven Mikrostrukturen haben sich die Werkzeugtemperatur, Schmelztemperatur und die Prägekraft herausgestellt. Die Abformung der diffraktiven Mikrostrukturen konnte im Spritzprägeprozess sehr genau umgesetzt werden, wodurch die Stufenhöhe von  $1,65\ \mu\text{m}$  erreicht wurde. Allerdings besitzen die gekrümmten DOE noch leichte Formabweichungen auf der asphärischen und strukturierten Fläche, wodurch die optische Abbildungsqualität reduziert wird. Um dies

zu optimieren, wären zum einen Prozessoptimierungen im Spritzprägeprozess vorstellbar und zum anderen die Verwendung von Vorhaltestrategien. Dabei wird die Schrumpfung des Bauteils in einer Simulation berechnet und anschließend in die Geometrie der Werkzeugeinsätze mit eingebracht. Dadurch stellt die Geometrie der Werkzeugeinsätze nicht die Ziel-Geometrie dar, sondern eine schrumpfungsbedingte Abweichung. Durch den Schrumpfungsvorgang während des Spritzgussprozesses schrumpft das Bauteil anschließend in die gewünschte Ziel-Geometrie, wodurch eine hohe Formgenauigkeit zur Design-Geometrie erzielt werden kann. Hierfür müssen allerdings Werkzeugeinsätze mit Freiformflächen in optischer Qualität hergestellt werden, was den Herstellungsprozess nochmals erschwert.

Eine weitere Abweichung von der Soll-Geometrie der DOE stellt der Zentrierfehler zwischen asphärischer Rückseite und diffraktiver Vorderseite dar. Die gemessene Abweichung lag bei 14  $\mu\text{m}$ , schwankte jedoch bei unterschiedlichen Spritzgussparametern stark und betrug im Mittel 123  $\mu\text{m}$ . Um diese Abweichungen zu reduzieren, müssen im Spritzprägewerkzeug Optionen vorgesehen werden, die eine Anpassung der Werkzeugeinsätze zueinander ermöglichen. Dadurch können Bauteile nach dem Herstellungsprozess vermessen werden und die Positionierung der Werkzeugeinsätze daraufhin direkt angepasst werden. Hierfür sind allerdings noch Konzepte zu erarbeiten.

Die gemessene Beugungseffizienz von  $> 73\%$  ist geringer im Vergleich zu High-End DOE aus Glas (insbesondere optische Gitter) die 80% und mehr erreichen können, entspricht allerdings der Effizienz, die mit UP-gedrehten DOEs erzielt werden kann [171,172]. Die erzielte Beugungseffizienz resultiert zum einen aus den Formabweichungen, Zentrierfehlern und der Oberflächenrauheit und zum anderen aus Materialabsorption und dielektrischen Effekten. Vergleicht man allerdings die Qualität der hergestellten gekrümmten DOE mit kommerziellen Elementen in dem beschriebenen chromatisch konfokalen Messaufbau (Abb. 6-35), so zeigen sich keine signifikanten Abweichungen. In Abb. 6-38 sind die Messergebnisse zu sehen, die an einem Tiefen-Normal durchgeführt wurden. Hierfür wurde zum einen ein spritzgeprägtes DOE verwendet und zum anderen ein kommerzielles DOE aus Glas, welches lithographisch hergestellt wurde. Das kommerzielle DOE hatte eine plan-konvexe Form mit lithographisch hergestellten diffraktiven Strukturen auf der planen Fläche. Die Messergebnisse enthalten keine signifikanten Unterschiede, woraus geschlossen werden kann, dass die hergestellten gekrümmten DOE für die Anwendung in einem chromatisch konfokalen Messaufbau verwendet werden können. Zusätzlich bietet die Herstellung der gekrümmten DOE durch Spritzprägen einen signifikanten Preisvorteil gegenüber traditionellen Glas-DOE, welche als Einzelstücke hergestellt werden müssen.

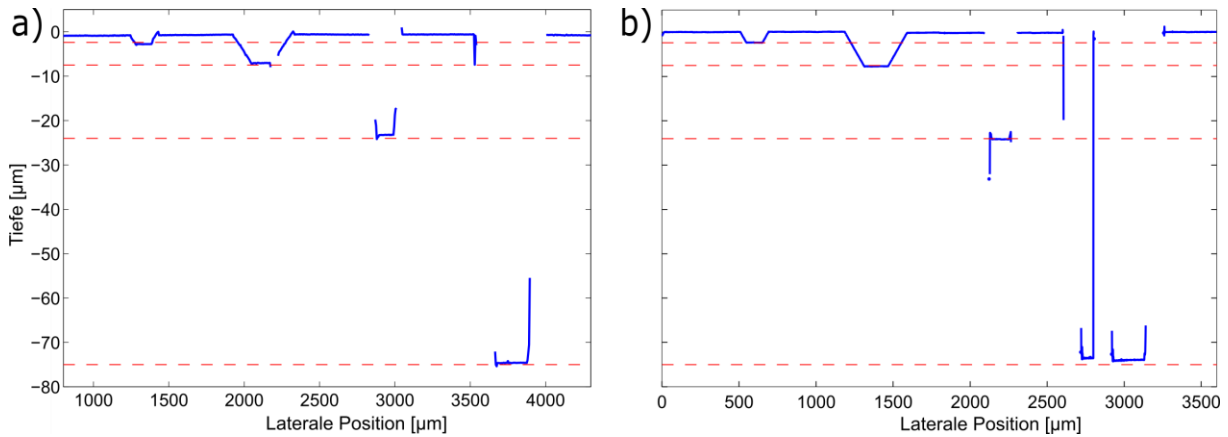


Abb. 6-38: Vergleich der gemessenen Profile gemessen mit einem a) spritzgeprägten DOE und b) einem über Lithographie hergestellten DOE [42]

Wenn man die gesamten Ergebnisse zur Herstellung der gekrümmten DOE betrachtet, so kann man die Prozesskette als zielführend bewerten. Die Abfolge der Prozesse mit LDW, Galvanokopieren, Werkzeugintegration und Spritzprägen erzielt zufriedenstellende Ergebnisse. Insbesondere die hochpräzise Überführung der diffraktiven Mikrostrukturen von einem strukturierten Glasmaster bis in die Replikation durch Spritzprägen kann ohne größere Verluste in der Detailtreue umgesetzt werden.

Im Vergleich zu alternativen Herstellungsmethoden wie LIGA oder E-Beam Writing stellt die Prozesskette insbesondere in der Möglichkeit der Herstellung von gekrümmten DOE eine Neuigkeit dar. Die anderen Verfahren benötigen für die Herstellung eine ähnliche Prozesskette, d.h. insbesondere, dass nach der Strukturierung eines Glasmasters eine Galvanoabformung nötig ist, um einen stabilen Werkzeugeinsatz für die Replikation zu erhalten. Allerdings sind das LIGA- und E-Beam-Verfahren auf flache Substrate limitiert. Im Gegensatz dazu bietet die Ultrapräzisionsbearbeitung auch die Möglichkeit, auf komplexen und gekrümmten Geometrien Mikrostrukturen zu erstellen. Ein klarer Vorteil der Ultrapräzisionsbearbeitung im Vergleich zur hier präsentierten Prozesskette ist die Tatsache, dass die Strukturierung direkt in einem Werkzeugeinsatz durchgeführt werden kann, weshalb keine zusätzliche Galvanoabformung durchgeführt werden muss. Außerdem wird bei der Ultrapräzisionsbearbeitung meist in NiP gearbeitet, was eine deutlich höhere Härte als galvanisches Nickel aufweist, wodurch eine höhere Standzeit im Spritzgusswerkzeug erreicht werden kann. Allerdings sind die Prozesse der Ultrapräzisionsbearbeitung, wie bereits beschreiben, durch die verfügbaren Werkzeuggradienten der Diamantwerkzeuge limitiert, wodurch nur Strukturen  $> 5 \mu\text{m}$  hergestellt werden können (vgl. Abb. 6-37). Aus diesem Grund stellt die hier präsentierte Prozesskette die bessere Alternative zur Herstellung von gekrümmten DOE dar.

Aus den in diesem Prozess erarbeiteten Ergebnissen können die folgenden allgemeinen Erkenntnisse abgeleitet werden, die auch für andere Anwendungen von Bedeutung sind:

- LDW ermöglicht die Herstellung von kontinuierlichen diffraktiven Strukturen mit geringer Kantenverrundung ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) und einer Stufenhöhe  $> 1,5 \mu\text{m}$ . Die laterale Strukturgröße kann dabei  $< 5 \mu\text{m}$  betragen. Diese Mikrostrukturen können auf gekrümmten Substraten aufgebracht werden.
- Mit dem Galvanokopierprozess können feine Mikrostrukturen hochpräzise und ohne erkennbare Abformfehler in den Strukturen von einem Mastersubstrat in einen festen Werkzeugeinsatz überführt werden. Der Prozess ist dabei auch geeignet, 3D-Substrate abzuformen, wie in dieser Arbeit präsentiert.
- Für den Galvanokopierprozess sind das Design des Substrattellers sowie die Integration der Mastersubstrate von entscheidender Bedeutung. Der Substratteller sollte dabei möglichst flach sein ohne größere herausstehende Topographien, da diese zu einer ungleichmäßigen Schichtabscheidung führen. Es ist daher empfehlenswert, die Mastersubstrate im Substratteller in einer Vertiefung zu positionieren. Des Weiteren ist es empfehlenswert, die Substrate mit einem möglichst kleinen Spalt zum Substratteller zu integrieren, um Randeffekte zu verhindern. Für eine gute Entformung nach dem Galvanokopierprozess sollten Elemente in den Substratteller eingebracht werden, mit denen die hergestellten Stamper entformt werden können. Eine gute Lösung hierfür stellen Schrauben dar.
- Für die Herstellung von optischen Bauteilen, insbesondere Bauteilen mit Mikrostrukturen, eignet sich ein Werkzeugkonzept zum Einspritzen in die Trennebene. In Kombination mit einem Tunnelanguss stellt dieses Konzept eine gute Alternative zum klassischen Ansatz mit horizontaler Materialeinspritzung und Filmanguss dar, welcher sehr häufig für optische Anwendungen genutzt wird. Hierbei muss der Anguss in einem zusätzlichen Prozessschritt entfernt werden.
- Für die Prozesseinrichtung eines Spritzprägeprozesses, insbesondere für optische Bauteile, empfiehlt es sich, in mehreren Stufen vorzugehen. Zu Beginn ist ein gutes Füllverhalten zu etablieren, wobei auch geometrische Anpassungen, insbesondere am Angussystem, möglich sind. Hierfür sollte das Angussystem mit Einsätzen konzipiert werden, wodurch der Anguss einfach zu ändern ist, ohne das gesamte Werkzeug anzupassen. Im nächsten Prozessschritt sollten stabile Prozessbedingungen im Bereich des Prozessfensters erreicht werden, welche für die spätere Feineinstellung der Prozessparameter Voraussetzung sind. Erst dadurch können in der letzten Phase die besten Prozessparameter erarbeitet werden, da eine direkte Verbindung zwischen Prozessparameteränderung und Resultat hergestellt werden kann.
- Für die Herstellung von (mikrostrukturierten) optischen Komponenten ist insbesondere eine hochgenaue Temperaturkontrolle von Werkzeug

und Schmelze wichtig. Da die Prozesse oft sehr komplex sind, resultieren kleine Prozessfenster, bei denen die Prozesse stabil laufen und gute Ergebnisse erreicht werden. In optischen Bauteilen sind dabei kleinste Fehler direkt sichtbar und die Funktionalität eingeschränkt oder nicht gegeben. Temperaturänderungen haben dabei oft einen starken Einfluss und sind für eine Vielzahl von Fehlerbildern verantwortlich. Beispiele hierfür sind: Kalte Pfropfen, Fließlinien, Bindenähte oder Einfallstellen [167]. Ein weiterer wichtiger Prozessparameter bei der Abformung von feinen Mikrostrukturen ist die Prägekraft.

- Für die Herstellung von optischen Bauteilen mittels Spritzguss/Spritzprägen können die Bearbeitungstemperaturen im Werkzeug aber auch in der Plastifiziereinheit, über den vom Hersteller vorgegebenen Werten liegen. Die Komplexität von (mikrostrukturierten) optischen Bauteilen führt dazu, dass beim Herstellungsprozess oft bis ans Limit der verarbeiteten Materialien gegangen werden muss. Hierbei ist zu beachten, dass die Bauteile genau inspiziert werden, damit sichergestellt werden kann, dass die erhöhten Temperaturen nicht zu Schäden führen.
- Allgemein kann für den Spritzprägeprozess von mikrostrukturierten Bauteil gesagt werden, dass eine sehr hohe Prozesskontrolle nötig ist, um qualitativ hochwertige Bauteile herzustellen.

## **7 Nanostrukturierung durch Ionenstrahlschreiben**

In diesem Kapitel werden die Herstellung von nanostrukturierten Werkzeugeinsätzen sowie die Replikation dieser Strukturen mittels Spritzprägen beschrieben. Im Vergleich zu Mikrostrukturen sind die Nanostrukturen nochmals kleiner und bewegen sich in einem Bereich von einigen 100 nm bis hin zu wenigen Nanometer. In Bereichen, in denen die Strukturen sich im Sub-Mikrometerbereich befinden, treten durch die kleine Strukturgröße neue Effekte auf, die zu beachten sind.

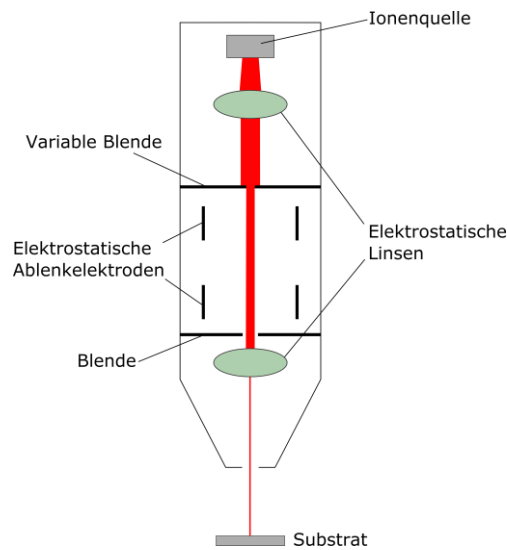
In diesem Kapitel wird eine neue Prozesskette vorgestellt, bei der Ionenstrahlschreiben zur Direktstrukturierung eines Werkzeugeinsatzes mit Nanostrukturen genutzt wird. Im Anschluss werden die Nanostrukturen mittels Spritzprägen repliziert. Die durchgeführten Arbeiten stellen dabei einen „Proof of concept“ dar, um die Machbarkeit zu demonstrieren und die Grenzen zu bestimmen. Die Prozesskette bietet viel Potential für die Herstellung von nanostrukturierten Kunststoffoptiken. In den Untersuchungen geht es in erster Linie darum, einen Werkzeugeinsatz mit Nanostrukturen mittels Ionenstrahlschreiben herzustellen und diese Strukturen anschließend abzuformen. Um zu zeigen, dass durch die entwickelte Prozesskette funktionsfähige Bauteile hergestellt werden können, wird ein DOE hergestellt und die Funktionalität demonstriert. Die Ergebnisse sowie mögliche Anwendungsgebiete werden in Kapitel 7.4 diskutiert.

### **7.1 Einleitung**

Die Anzahl an Herstellungstechnologien für Nanostrukturen ist sehr gering, da nur wenige Technologien in der Lage sind, Strukturen in dieser Größenordnung zu erzeugen. Insbesondere, wenn es darum geht, definierte Geometrien zu erzeugen, ist die Auswahl an Verfahren auf ein paar wenige limitiert. Beispiele für solche Verfahren sind EUV-Lithographie (extrem ultra violet), Elektronenstrahlithographie und Ionenstrahlithographie. Die ersten beiden genannten Verfahren haben dabei den Nachteil, dass sie nur zur Strukturierung eines Photoresist eingesetzt werden können, da ein Materialabtrag in einem harten Material nicht oder nur mit sehr geringer Abtragsrate möglich ist. Aus diesem Grund ist nach der Strukturierung ein anschließender Galvanokopierprozess notwendig. Ionenstrahlschreiben hingegen ermöglicht einen direkten Materialabtrag in einem harten Material bei einer verhältnismäßig hohen Abtragsrate.

Ionenstrahlschreiben (engl. focused ion beam, kurz FIB) ist ein Strukturierungsverfahren, bei dem eine Ionenstrahl gerichtet auf eine Oberfläche beschleunigt wird. Die Ionen werden dabei durch ein elektrisches Feld beschleunigt, wobei der gesamte Prozess in einer Vakuumkammer durchgeführt wird. Ist die Energie der auftreffenden Ionen höher als die Bindungsenergie der Substratome, werden diese aus dem Material herausgeschlagen. Diese Atome

lösen dabei weitere Atome aus dem Material, bis deren Energie geringer ist als die Bindungsenergie. Dadurch kann ein gezielter Materialabtrag in einem Substratmaterial erzeugt werden. Dieser kann verwendet werden, um gezielt Mikro- und Nanostrukturen in ein Substrat einzubringen [173]. Alternativ kann das Verfahren auch zur Beschichtung verwendet werden, indem die herausgeschlagenen Atome auf einem anderen Substrat abgeschieden werden. Die Skizze einer Ionenstrahlquelle mit den entsprechenden elektrooptischen Komponenten ist in Abb. 7-1 dargestellt. Die elektrooptischen Komponenten werden benötigt, um den Ionenstrahl zu formen und in die gewünschte Richtung abzulenken. Die Funktionsweise ist vergleichbar mit dem Elektronenstrahlschreiben, allerdings ermöglicht das deutlich höhere Gewicht der Ionen im Vergleich zu Elektronen einen deutlich stärkeren Materialabtrag [174].



**Abb. 7-1: Skizze einer Ionenstrahlquelle**

Die Motivation zur Entwicklung dieser neuartigen Prozesskette ist durch Nachfragen aus der Industrie getrieben. Insbesondere bei der Herstellung von Kunststoffoptiken für den Consumer-Markt werden die Bauteile in hohen Stückzahlen von vielen 100.000 Stück/Jahr und mehr hergestellt. Dabei ist vor allem der Smartphone-Markt eine treibende Kraft für die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken, welche bei diesen Geräten in den Kameras eingesetzt werden. Stand der Technik ist die Verwendung von galvanokopierten Werkzeugeinsätzen mit Mikrostrukturen, wobei die Strukturen mit den verschiedensten Technologien hergestellt sein können. Diese Werkzeugeinsätze aus Nickel haben allerdings eine begrenzte Standzeit, die oft für die gewünschten Stückzahlen nicht ausreichend sind. Die Mikrostrukturen verschleifen über die Zeit, wodurch sich die Qualität der Kunststoffoptiken verschlechtert. Daher müssen die Werkzeugeinsätze in regelmäßigen Abständen gewechselt werden. Aus diesem Grund sind neue Ansätze zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen wünschenswert, die zum einen die geforderten Mikro- und Nanostrukturen präzise abbilden und gleichzeitig eine höhere Standzeit aufweisen.



Um die mögliche Strukturgröße zu bestimmen, welche mit dem Ionenstrahlschreiben in einem Werkzeugeinsatz erzeugt werden kann, wurde ein sogenanntes USAF (United State Airforce) Target, auch USAF-Auflösungstesttafel genannt, verwendet. Dieses Muster wurde ursprünglich eingesetzt, um das Auflösungsvermögen von optischen Systemen zu bestimmen. Das Muster setzt sich aus insgesamt neun Gruppen zusammen, wobei jede Gruppe aus sechs Elementen besteht. Jedes Element wiederum beinhaltet drei Quer- und drei Längsbalken mit definierter Breite und Abstand. Die Breite und der Abstand verringern sich dabei bei jedem Element und bei jeder Gruppe immer weiter. In Abb. 7-2 a) ist eine USAF-Auflösungstesttafel abgebildet. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, wurden die Muster USAF-8 und USAF-9 verwendet (vgl. Abb. 7-2b). Bei USAF-8 reichen die Strukturgrößen von  $1,95\ \mu\text{m}$  bis  $1,10\ \mu\text{m}$ . USAF-9 deckt den Bereich von  $0,98\ \mu\text{m}$  bis  $0,55\ \mu\text{m}$  ab. Die exakte Breite der Balken für alle sechs Elemente der USAF Targets 8 und 9 ist in Tab. 7-1 aufgelistet. Der Abstand zwischen den Balken ist dabei immer so groß wie die entsprechende Balkenbreite. Die Tiefe der Struktur in Z-Richtung ist nicht definiert. In dieser Arbeit werden die Auflösungstesttafeln dazu verwendet, um das Auflösungsvermögen des Ionenstrahlschreib-Prozesses sowie der Replikation durch Spritzprägen zu ermitteln.

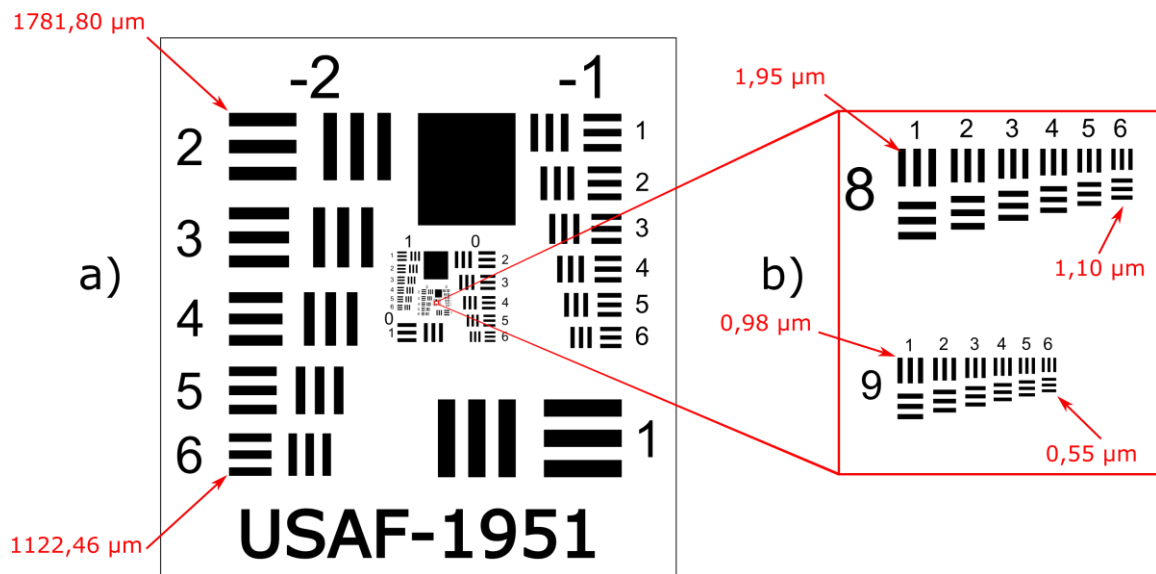


Abb. 7-2: a) USAF-1951 Resolution Target zur Bestimmung der Auflösungsgrenze, b) vergrößerte Ansicht der USAF-Strukturgrößen 8 und 9 mit der minimalen Strichbreite/Strichabstand von  $1,10\ \mu\text{m}$  und  $0,55\ \mu\text{m}$

Tab. 7-1: Breite der Balken der USAF-Targets 8 und 9 für die jeweiligen Elemente

Element	1	2	3	4	5	6
USAF-8	$1,95\ \mu\text{m}$	$1,74\ \mu\text{m}$	$1,55\ \mu\text{m}$	$1,38\ \mu\text{m}$	$1,23\ \mu\text{m}$	$1,10\ \mu\text{m}$
USAF-9	$0,98\ \mu\text{m}$	$0,87\ \mu\text{m}$	$0,78\ \mu\text{m}$	$0,69\ \mu\text{m}$	$0,62\ \mu\text{m}$	$0,55\ \mu\text{m}$

Neben den USAF-Targets wurde auch ein DOE mittels Ionenstrahlschreiben in den Titan-Werkzeugeinsatz eingebracht. Das DOE besitzt einen Durchmesser von  $100\ \mu\text{m}$  und eine

Stufenhöhe von ca.  $1,2\ \mu\text{m}$ . Das Design des DOE ist in Abb. 7-3 dargestellt. Dabei ist die Z-Höhe im verwendeten Grauton kodiert, wobei schwarz die höchste Position und weiß die tiefste Position der Struktur darstellen.

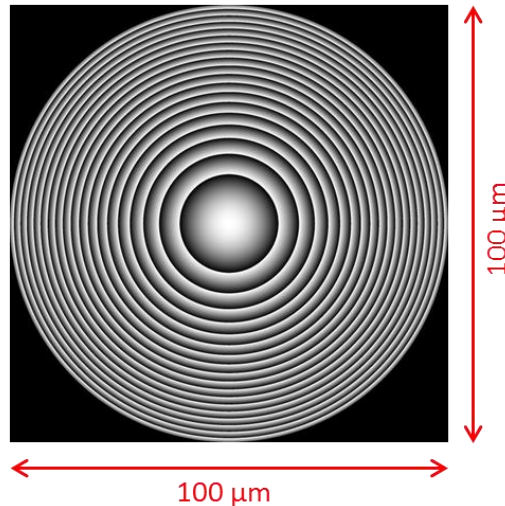


Abb. 7-3: Design des DOE für die Strukturierung des Titan-Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben

## 7.2 Methoden

Die Prozesskette zur Herstellung nanostrukturierter Werkzeugeinsätze mittels Ionenstrahlschreiben und anschließender Kunststoffreplikation besteht aus vier Schritten. In einem ersten Schritt wird ein nicht-magnetischer Werkzeugeinsatz hergestellt. In dieser Arbeit wurde hierfür Titan verwendet, da dieser Werkstoff mittels Ionenstrahlschreiben strukturierbar ist und eine hohe Härte für den Replikationsprozess aufweist. Magnetische Werkstoffe wie Stahl können für diesen Prozess nicht verwendet werden, da diese die Ionenquelle negativ beeinflussen und beschädigen können. Dies liegt zum einen daran, dass das Substrat durch das magnetische Feld in der Ionenstrahlquelle angezogen werden kann und diese dadurch beschädigt, und zum anderen, dass der Ionenstrahl abgelenkt wird, wodurch ein unkoordinierter Materialabtrag entsteht. Um eine plane Oberfläche mit geringer Rauheit zu erhalten, wird der Werkzeugeinsatz im ersten Prozessschritt poliert. Hierfür wurde ein mechanischer Polierprozess verwendet. Den zweiten Prozessschritt stellt die Strukturierung des Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben dar. Dabei wird das Substrat direkt strukturiert, ohne die Verwendung von Masken oder Fotolacken. Im nachfolgenden Prozessschritt wird der Werkzeugeinsatz in ein Spritzprägewerkzeug integriert. Am Ende werden die Nanostrukturen durch Spritzprägen repliziert. Die gesamte Prozesskette ist in Abb. 7-4 dargestellt.

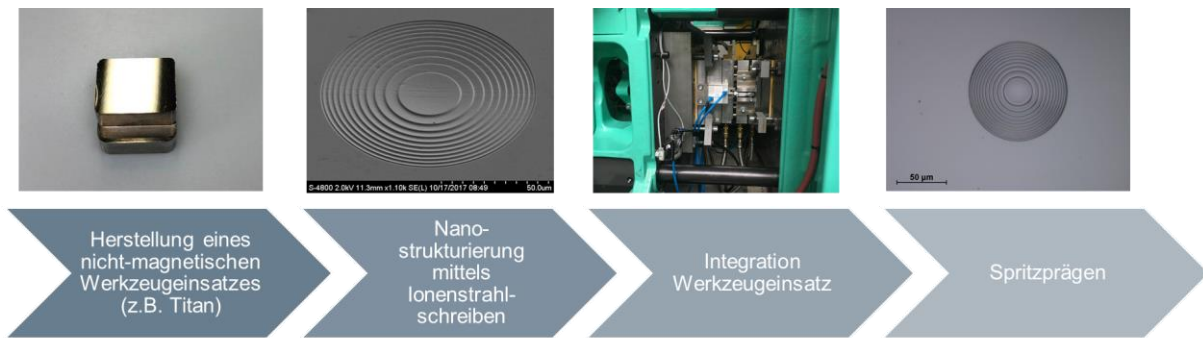


Abb. 7-4: Prozesskette zur Herstellung von nanostrukturierten Werkzeugeinsätzen und Replikation durch Spritzprägen

### 7.2.1 Herstellen eines nanostrukturierten Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben

Als Werkzeugeinsatz wurde ein Titan-Einsatz durch konventionelles Fräsen hergestellt. Der Einsatz entspricht dabei dem in Kapitel 5.2.2 beschriebenen planen Werkzeugeinsatz, da für die Replikation dasselbe Spritzprägewerkzeug verwendet wurde. Es wurden ausschließlich neue Werkzeugeinsätze eingesetzt und integriert. Die Fläche, auf der die Nanostrukturen aufgebracht werden können, beträgt  $10,3 \times 13,3 \text{ mm}^2$ . Nach der Fräsbearbeitung, bei der die Grundgeometrie hergestellt wurde, wurde die Oberfläche anschließend geschliffen und poliert. Hierfür wurde ein mechanischer Polierprozess verwendet (Alpha 2-Speed Grinder-Polisher, Buehler ITW Test and Measurement GmbH, Deutschland) mit einer  $1 \mu\text{m}$  Poliersuspension (DiaDuo-2, Struers GmbH, Deutschland). Der Polierprozess ist wichtig, da die einzubringenden Nanostrukturen nur eine sehr geringe Tiefe besitzen, wodurch die Oberflächenrauheit einen großen Einfluss hat. Daher sollte eine Oberfläche von  $Ra < 50 \text{ nm}$  erzielt werden, um eine gute Bearbeitung zu ermöglichen. Diese optische Oberfläche ist auch hilfreich für die Charakterisierung der Proben, denn die Nanostrukturen nehmen nur einen sehr kleinen Teil der Oberfläche ein. Durch die spiegelnde Oberfläche sind die Bereiche der Nanostrukturen leichter zu finden und können dann mit den entsprechenden Messgeräten untersucht werden. In Abb. 7-5 sind das CAD-Design des Werkzeugeinsatzes mit den entsprechenden Dimensionen sowie ein Bild des Werkzeugeinsatzes dargestellt.

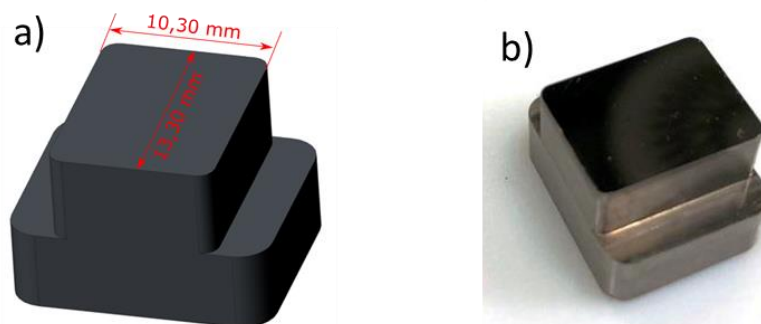


Abb. 7-5: a) CAD-Design des Werkzeugeinsatzes mit Abmessungen, b) Werkzeugeinsatz vor dem Ionenstrahlschreiben

Für die Nanostrukturierung des Werkzeugeinsatzes wurde ein Ionenstrahlschreiber (ionLINE Plus, Raith GmbH, Deutschland) eingesetzt, wie er in Abb. 7-6 dargestellt ist. Die Anlage verwendet dabei Ionen, die auf die Oberfläche beschleunigt werden, welche eine Strukturierung im Sub-10 nm-Bereich ermöglichen [175]. Um eine scannende Bewegung durchführen zu können, wird die Probe mittels eines Laserinterferometer-gestützten Proben-tisches bewegt. Ionenstrahlschreiben vereint einige nützliche Eigenschaften in einem Prozess, dazu gehören: Berührungsloser Materialabtrag, sehr hohe Auflösung von bis zu  $< 10$  nm, präziser Abtrag von kleinsten Materialmengen und Materialabtrag unabhängig von der Materialhärte [174]. Der gesamte Prozess findet dabei im Vakuum statt, um eine möglichst hohe freie Weglänge für die Ionen zu ermöglichen, wodurch eine hohe Auflösung erzielt werden kann.



**Abb. 7-6: ionLINE Plus Ionenstrahlschreiber der Fa. Raith GmbH zur Herstellung von nanostrukturierten Werkzeugeinsätzen**

Die Prozessparameter, die zur Strukturierung des Titan-Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben verwendet wurden, sind in Tab. 7-2 aufgelistet. Für die Strukturierung wurden einfach geladene Gold-Ionen ( $\text{Au}^+$ ) verwendet. Diese ermöglichen es, einen hohen Strahlstrom zu erzeugen, wodurch eine gute Abtragsrate und hohe Auflösung erzielt werden kann. Der verwendete Blendendurchmesser (vgl. Abb. 7-1) betrug  $40 \mu\text{m}$  bei einer Beschleunigungsspannung für die Ionen von 35 kV. Die Schrittweite betrug 40 nm, d.h. alle 40 nm wurde eine definierte Dosis des Ionenstrahls auf das Material appliziert. Insgesamt wurden zur Erstellung der Strukturen 15 Überfahrten gewählt, wodurch die Strukturgenauigkeit besser ist als bei dem direkten Materialabtrag der gesamten Struktur mit einer Überfahrt. Die Bearbeitungszeit für das DOE betrug 15 h.

**Tab. 7-2: Prozessparameter zur Herstellung eines strukturierten Werkzeugeinsatzes mittels Ionenstrahlschreiben**

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Blendendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	40
Ionen	$\text{Au}^+$
Beschleunigungsspannung [kV]	35
Schrittweite [nm]	40
Überfahrten	15

## 7.2.2 Werkzeugbau und Integration

Für die Replikation der mit Ionenstrahlschreiben hergestellten Nanostrukturen wurde dasselbe Werkzeugkonzept verwendet, welches bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben worden ist. Das Werkzeug ist als Hauptachsen-Prägewerkzeug mit Rahmenplatte ausgelegt. Die Rahmenplatte kann über pneumatische Zylinder bewegt werden. Der nanostrukturierte Werkzeugeinsatz befand sich auf der unbeweglichen Düsenseite, wie in Abb. 7-7 dargestellt. Auf der beweglichen Auswerferseite befand sich ein planer Werkzeugeinsatz, mit dem die Prägebewegung durchgeführt wurde. Der Prägestempel war baugleich mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Werkzeugeinsatz mit Mikrolinsenarray (vgl. Abb. 5-17 a).

Um einen präzisen Spritzprägeprozess zu ermöglichen, wurde das Werkzeug mit einem zusätzlichen induktiven Abstandssensor (IWFEM 18U7504/S35A, Baumer GmbH, Deutschland) ausgestattet, welcher eine exakte Positionierung der Werkzeugkomponenten ermöglicht. Dies ist Voraussetzung um replizierbare Ergebnisse zu erzielen und qualitativ hochwertige Bauteile zu erhalten. Der Abstandssensor wurde dabei von einem eigenständigen Temperiergerät temperiert, um Temperatureinflüsse zu unterbinden. Weitere wichtige Komponenten in diesem Spritzprägewerkzeug sind die Zentrierungen für eine präzise Positionierung der beiden Werkzeughälften zueinander sowie die Auswerferplatte mit den Auswerferstiften, die am Ende des Prozesses das Bauteil auswerfen. Dabei ist es wichtig, dass die Auswerfer das Bauteil schonend vom Prägestempel entfernen, ohne dieses zu verformen. Insgesamt ist das Werkzeug mit vier externen Temperiergeräten verbunden, die eine konstante Temperierung und exakte Temperaturführung während des Prozesses ermöglichen. Neben dem Abstandssensor sind die beidem Werkzeughälften sowie der bewegliche plane Prägestempel einzeln temperierbar. Dadurch besteht auch die Möglichkeit, bei Bedarf einzelne Werkzeugteile unabhängig voneinander auf definierte Temperaturen zu bringen, um den Spritzprägeprozess zu erleichtern und die Bauteilqualität zu steigern.

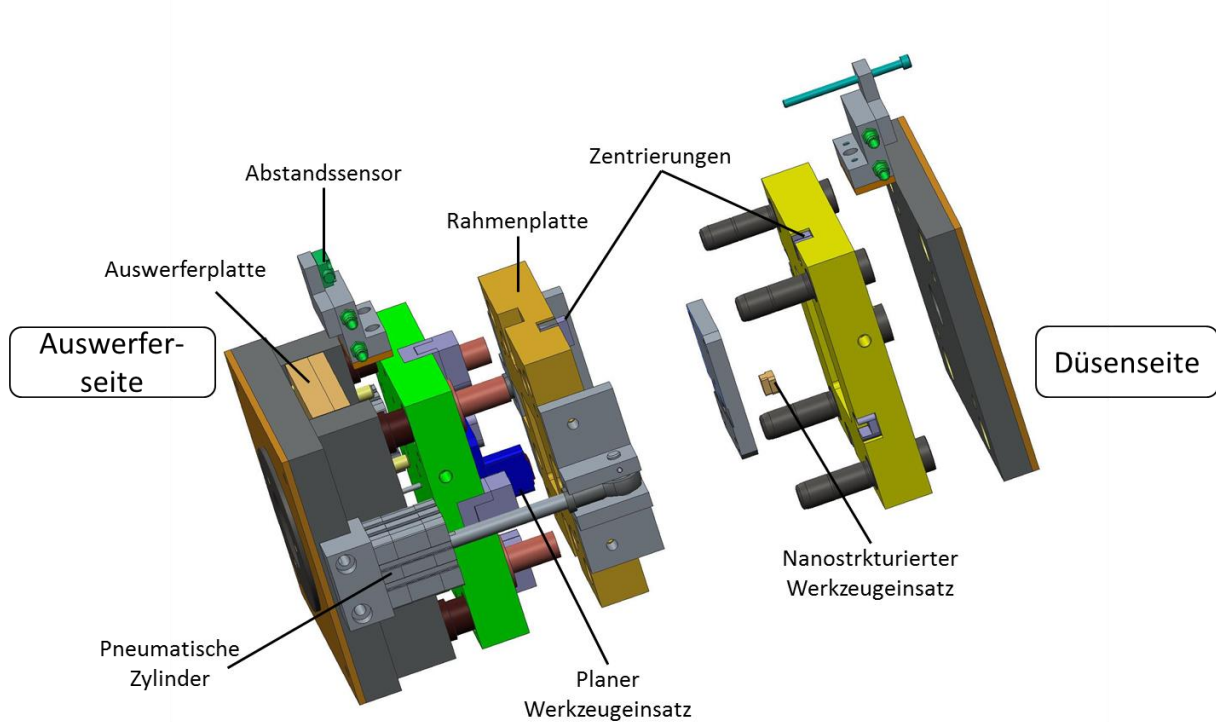


Abb. 7-7: CAD-Darstellung des Spritzprägewerkzeuges zur Herstellung von nanostrukturierten Bauteilen

Wie bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben ist beim Zusammenbau des Werkzeugs die Integration der beiden Werkzeugeinsätze besonders kritisch. Diese müssen exakt positioniert sein. Dabei muss insbesondere der strukturierte Werkzeugeinsatz sehr vorsichtig behandelt werden, um keine Kratzer und Verschmutzungen aufzubringen. Um den Werkzeugeinsatz davor zu schützen, wurde der Einsatz während der Integration ins Werkzeug mit einem Polymerfilm (First Contact™, Mountain Photonics, Deutschland) bedeckt. Dieser wurde vor dem Beginn des Spritzprägeprozesses mit Aceton entfernt. Die beiden Werkzeughälften mit integrierten Werkzeugeinsätzen sind in Abb. 7-8 abgebildet.

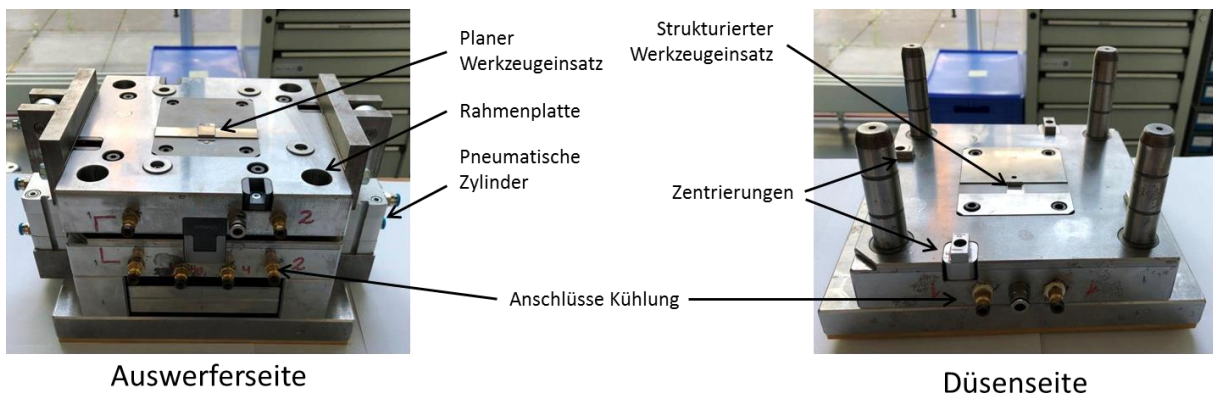


Abb. 7-8: Auswerferseite und Düsenseite des Spritzprägewerkzeuges zur Herstellung nanostrukturierter Bauteile mit integrierten Werkzeugeinsätzen

### 7.2.3 Spritzprägen

Die Replikation der mittels Ionenstrahlschreiben hergestellten Nanostrukturen wurde auf einer Allrounder 370A Spritzgussanlage (Arburg GmbH & CoKG, Deutschland) durchgeführt, wie sie bereits in Kapitel 5.2.3 beschrieben wurde. Wie auch für die Herstellung des Mikrolinsenarrays wurde für diese Abmusterung das Material Zeonex COP 330R (Zeon Cooperation, Japan) verwendet. Die Materialeigenschaften sind in Tab. 5-3 aufgelistet. COP gehört zu den Standardmaterialien für den Optikspritzguss, da es eine hohe Abformgenauigkeit, geringe Wasserabsorption sowie geringe Neigung zur Doppelbrechung besitzt.

Der Ablauf des Spritzprägeprozesses mit den entsprechenden Verfahrenswegen der einzelnen Werkzeugkomponenten entspricht dem in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Prozess. Der Ablauf ist nochmals in Abb. 7-9 dargestellt.

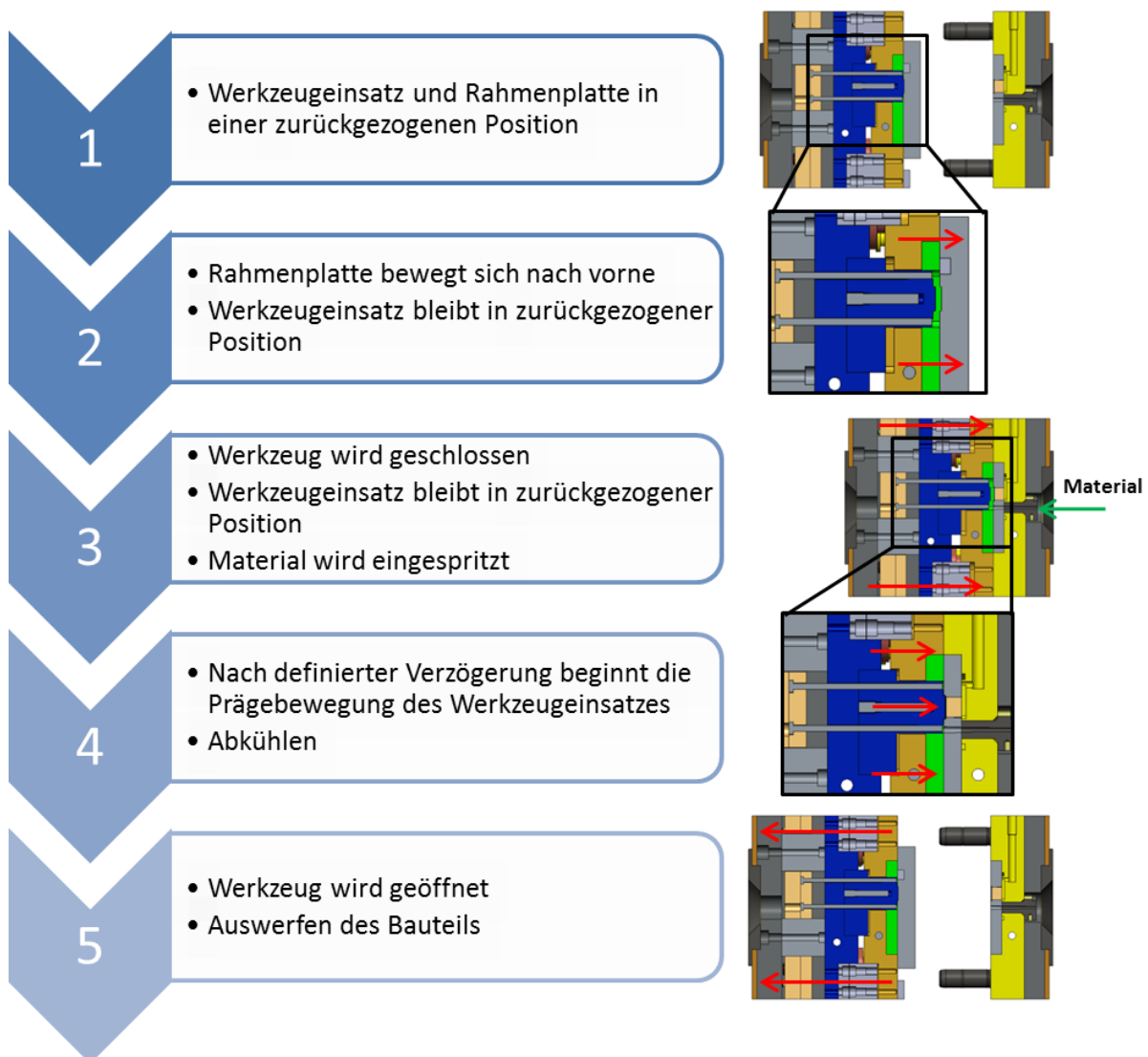


Abb. 7-9: Prozessablauf des Spritzprägeprozesses zur Herstellung von nanostrukturierten Bauteilen

Da es im Vergleich zur Herstellung des Mikrolinsenarrays keine definierte Soll-Geometrie gibt, wurde die Bauteilstärke für diesen Prozess von 0,5 mm auf 1 mm erhöht.

Dadurch gestaltet sich der Füllvorgang in der Kavität deutlich einfacher und bei der Optimierung der Prozessparameter konnte der Fokus auf die Abformung der Nanostrukturen gelegt werden. Bei Strukturen in diesen Dimensionen, die teilweise im Sub-Mikrometerbereich liegen, findet kein klassischer Füllvorgang in den Mikrostrukturen statt, sondern das Füllen kann mehr als Oberflächenabformung betrachtet werden. Die maximale Schmelzetemperatur in diesem Prozess betrug 255 °C, was im Bereich der empfohlenen Bearbeitungstemperatur für das Material liegt. Das Material wurde vor dem Prozess für 12 h getrocknet und anschließend am Materialeinzug auf 65 °C temperiert. Die beiden Werkzeughälften sowie der bewegliche Prägestempel wurden auf 120 °C temperiert. Der Einspritzdruck lag bei ca. 1.500 bar mit einem anschließenden Nachdruck von 300 bar. Die Einspritzzeit betrug 0,18 s. Der Prägevorgang wurde mit einer Verzögerung von 0,1 s zum Einspritzvorgang gestartet, wobei eine Prägekraft von 15 kN verwendet wurde. Die Prägekraft wurde dabei für insgesamt 17 s aufgebracht. Als Zykluszeit zur Herstellung eines nanostrukturierten Bauteils ergaben sich insgesamt 26 s. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tab. 7-3 zusammengefasst.

**Tab. 7-3: Prozessparameter des Spritzprägeprozesses zur Herstellung von nanostrukturierten Bauteilen**

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Schmelzetemperatur [°C]	235/255/250/240/230/65
Werkzeugtemperatur [°C]	
• Düsenseite	120
• Auswerferseite	120
• Prägestempel	120
Nachdruck [bar]	300
Einspritzdruck [bar]	1500
Einspritzzeit [s]	0,18
Prägekraft [kN]	15
Zykluszeit [s]	26

### **7.3 Ergebnisse**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Ionenstrahlschreibens zur Herstellung eines nanostrukturierten Werkzeugeinsatzes sowie die Abmusterungsergebnisse beschrieben. An dieser Stelle muss vorab erwähnt werden, dass die Charakterisierung der Strukturen eine große Herausforderung darstellt. Die verfügbaren Messsysteme kommen bei diesen Strukturgrößen an ihr Limit, wodurch die Auswertung der Messergebnisse komplex ist und nur mit einer gewissen Unsicherheit durchgeführt werden kann. Insbesondere klassische optische Messsysteme wie Mikroskopie und WLI erreichen bei diesen Strukturen ihr Limit, da die Strukturgröße im Bereich der genutzten Wellenlänge liegt. Die besten Ergebnisse können mit einem REM erzielt werden, da dort die genutzte Wellenlänge deutlich geringer ist. Allerdings



handelt es sich dabei um ein rein bildgebendes Verfahren, das nur bedingt für Messzwecke eingesetzt werden kann. Des Weiteren können die meisten Kunststoffe nicht ohne weiteres abgebildet werden, da sich das Messobjekt ohne Beschichtung auflädt, weil es nicht elektrisch leitfähig ist. Um diesen Effekt zu vermeiden, können elektrisch leitfähige Beschichtungen eingesetzt werden, welche allerdings die Nanostrukturen beeinflussen. Die meisten taktilen Messgeräte sind ebenfalls nicht geeignet, um Strukturen im Sub-Nanometer Bereich zu messen, da insbesondere die Messspitze zu groß ist und es zusätzlich zur Beschädigung der Strukturen kommen kann. Ausschließlich mit der AFM können Strukturen in dieser Größe noch gemessen werden, aber selbst mit dieser hochgenauen Messtechnik entstehen Artefakte, die beachtet werden müssen.

### **7.3.1 Charakterisierung des mittels Ionenstrahlschreiben strukturierten Werkzeugeinsatzes**

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt ist die Charakterisierung von Strukturen in dieser Größenordnung sehr komplex. In Abb. 7-10 ist das USAF-8 Target im strukturierten Werkzeugeinsatz zu sehen. Alle Strukturen sind gut erkennbar. Selbst bei dem kleinsten Element mit der Nummer 6 sind die Längs- und Querbalken noch deutlich getrennt voneinander erkennbar. Die Balken weisen dabei gemäß Design eine Breite und einen Abstand von  $1,95\ \mu\text{m}$  bei Element 1 bis hin zu  $1,1\ \mu\text{m}$  bei Element 6 auf. Es ist ebenfalls erkennbar, dass um die gesamten Strukturen ein hellgrauer Bereich entstanden ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Strukturen nicht vollständig senkrecht eingebracht werden konnten, sondern an der Oberfläche leichte Abschrägungen vorhanden sind. Eine Messung des USAF-8 Targets mittels AFM ist in Abb. 7-10 b) dargestellt. Aufgrund des eingeschränkten Messbereiches des verwendeten AFM (icon dimension, Veeco Instruments Inc., USA) konnten ausschließlich die horizontalen und vertikalen Balken vermessen werden ohne die Bezeichnungsnummer acht. Mittels LAM können die Strukturen ebenfalls erfasst werden, wie in Abb. 7-10 c) zu erkennen ist. Die Messungen mittels AFM und LAM liefern dabei vergleichbare Ergebnisse. Vergleicht man allerdings die Messergebnisse mit der REM-Aufnahme, so sind die Strukturen in den Messungen deutlich schlechter zu erkennen als in der REM-Aufnahme, was darauf schließen lässt, dass die Messsysteme die Strukturen nicht exakt abbilden können.

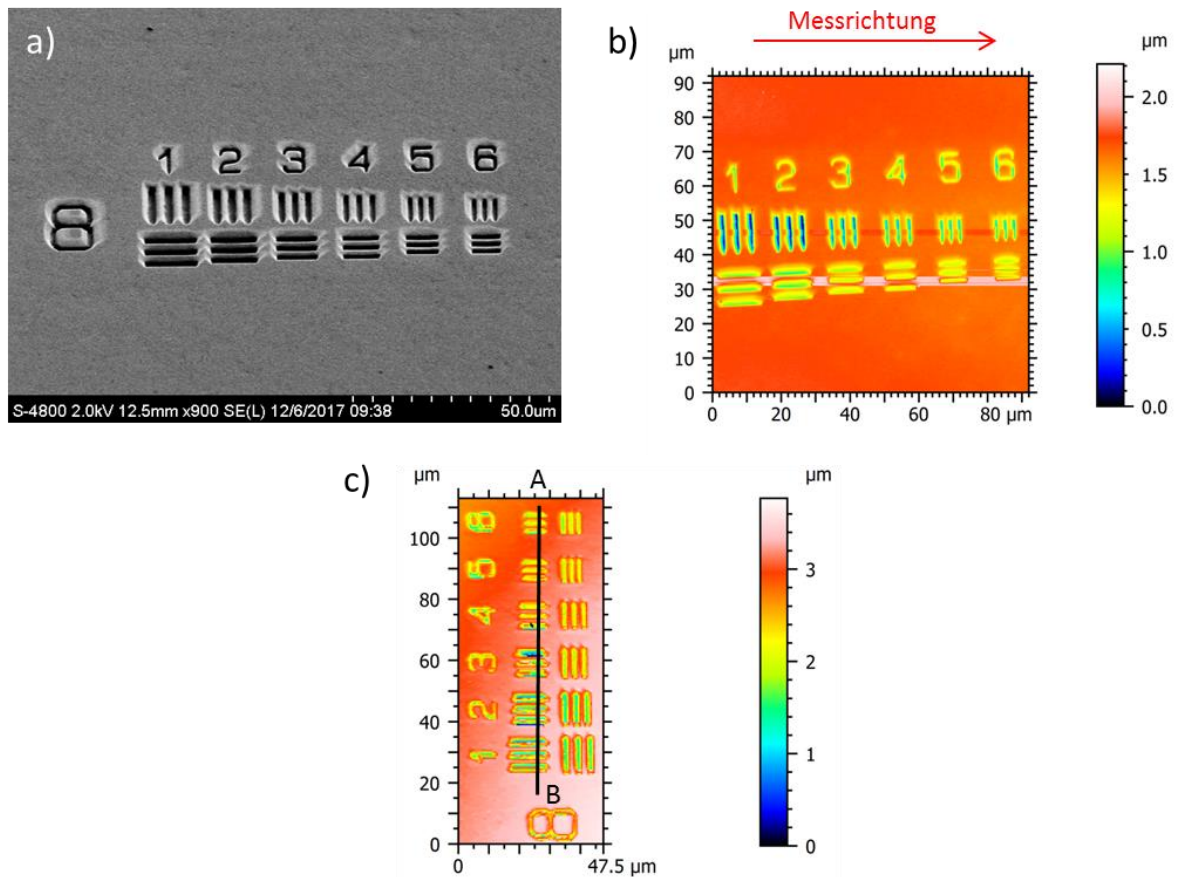


Abb. 7-10: a) REM-Aufnahme des USAF-8 Targets im strukturierten Werkzeugeinsatz, b) Vermessung der selben Struktur mittels AFM und c) Vermessung der Strukturen mittels LAM

Extrahiert man ein 2D-Profil aus der LAM-Messung, so können die einzelnen Balken kaum unterschieden werden (siehe Abb. 7-11). Die einzelnen Balken sind deutlich unschärfer, als dies im REM Bild erkennbar ist. Die Messung ist dabei von Messartefakten überlagert. Grund hierfür ist das verwendete Messprinzip, bei dem der Laserstrahl mit einem leichten Winkel auf die Oberfläche gelenkt wird, wodurch das Messen von schmalen Gräben eingeschränkt wird, da das Licht bereits auf der Kante auftrifft anstatt an der Bodenfläche des Grabens [176]. Des Weiteren beträgt die Größe des Laserspots etwa 1 μm, was die laterale Auflösung einschränkt [177]. Zuverlässige Messergebnisse können daher aus dem Profil nicht gewonnen werden.

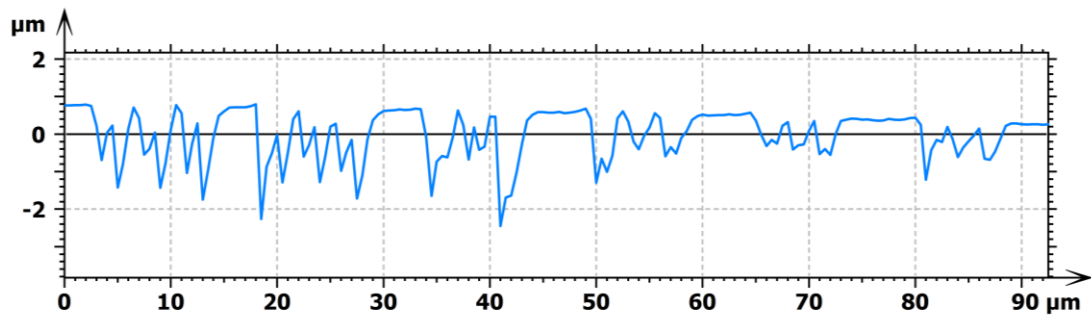


Abb. 7-11: Extrahiertes 2D-Profil entlang der in Abb. 7-10 b) dargestellten Linie AB in der LAM-Messung

Bei der nächstkleineren Auflösungsstruktur, USAF-9 Target, reichen die Strukturgrößen von  $0,98\ \mu\text{m}$  bei Element 1 bis  $0,55\ \mu\text{m}$  bei Element 6. Die REM-Aufnahme des Targets in Abb. 7-12 a) zeigt, dass die einzelnen Strukturen noch getrennt voneinander erkennbar sind. Allerdings sind die Querbalken bei Element 6 schon teilweise verschwommen. Die Zahlen über den einzelnen Elementen sind allerdings noch zu erkennen. Vergleichbar mit dem USAF-8 Target, sind graue Bereiche um die Strukturen zu beobachten, welche auf einen leichten Materialabtrag in diesen Bereichen schließen lassen. Anzumerken ist, dass diese Bereiche sich tendenziell nach links oben (ausgehend von der REM-Aufnahme in Abb. 7-12 a) erstrecken, was darauf schließen lässt, dass die Schreibrichtung des Ionenstrahlschreibers einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Vergleicht man das Messergebnis der AFM-Messung (Abb. 7-12 b) mit der REM-Aufnahme, so sind die Strukturen in der Messung deutlich schlechter zu erkennen. Die Balken verschwimmen teilweise ineinander und das Messergebnis weist eine starke Richtungsabhängigkeit auf. Balken, die senkrecht zur Messrichtung gemessen werden, können deutlich schlechter aufgelöst werden als die Balken, die parallel zur Messrichtung ausgerichtet sind, was bei der REM-Aufnahme nicht zu erkennen ist. Die Messrichtung ist in Abb. 7-12 b) eingezeichnet. Aus diesen Gründen können die Messergebnisse nur begrenzt für eine Analyse und Charakterisierung verwendet werden. Die Vermessung der Strukturen mittels LAM (Abb. 7-12 c) liefert vergleichbare Ergebnisse wie die AFM-Messung und zeigt ebenfalls Probleme, die Balken klar aufzulösen.

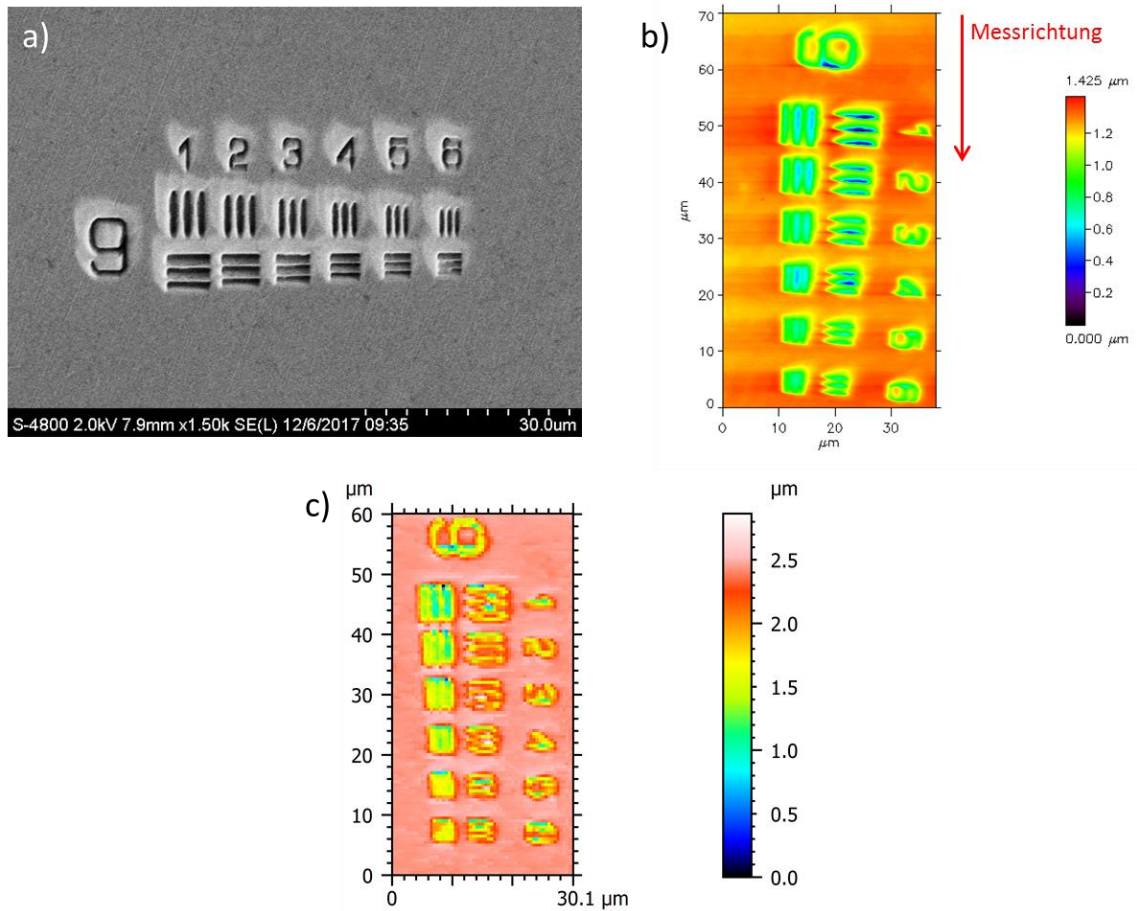


Abb. 7-12: a) REM-Aufnahme des USAF-9 Targets im strukturierten Werkzeugeinsatz, b) Vermessung der Strukturen mittels AFM und c) Vermessung der Strukturen mittels LAM

Ebenso wie bei der Vermessung des USAF-8 Targets im Werkzeugeinsatz liefert ein extrahiertes 2D-Profil entlang der Balken keine brauchbaren Ergebnisse. Die Balken können nicht deutlich differenziert werden, wie in Abb. 7-13 zu sehen ist.

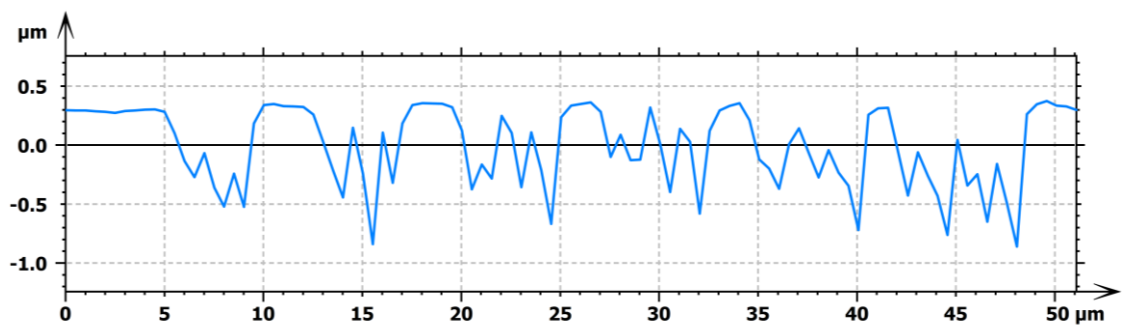
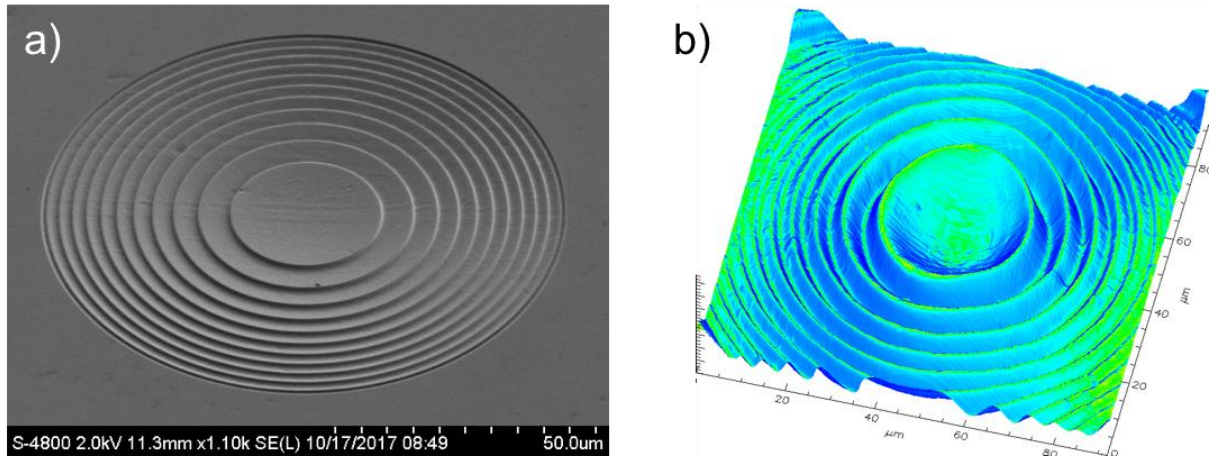


Abb. 7-13: Extrahiertes 2D-Profil entlang der in Abb. 7-12 c) dargestellten Line AB in der LAM-Messung

In Abb. 7-14 ist das DOE abgebildet, welches mittels Ionenstrahlschreiben in den Werkzeugeinsatz eingebracht wurde. Die REM-Aufnahme (Abb. 7-14 a) zeigt, dass das DOE vollständig abgeformt werden konnte. Auch die kontinuierlichen Flanken der diffraktiven Strukturen sind gut erkennbar. Die Vermessung des DOE mittels AFM (Abb. 7-14 b) zeigt

geringe Abweichungen von der REM-Aufnahme. Die ringförmig angeordneten Strukturen weisen eine leicht elliptische Form auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Taster des AFM bei der Messung an den Verrundungen leicht abgedrängt wird, wodurch die elliptische Form zustande kommt. Ein weiteres Problem der AFM-Messung ist der begrenzte Messbereich, der bei dem verwendeten Gerät auf  $92 \times 92 \mu\text{m}^2$  limitiert ist. Dadurch kann das DOE in einer Messung nicht vollständig erfasst werden.



**Abb. 7-14: REM-Aufnahme des DOE im strukturierten Werkzeugeinsatz, b) Vermessung des DOE mittels AFM**

Verwendet man hingegen das LAM-Verfahren, so kann das komplette DOE vermessen werden, wie in Abb. 7-15 dargestellt. Außerdem erscheinen die ringförmigen diffraktiven Strukturen in der LAM-Messung rund und nicht elliptisch. Nur die Kombination mehrerer bildgebender und vermessender Methoden ermöglicht eine aussagekräftige Charakterisierung. Ein aus der LAM-Messung extrahiertes 2D-Profil ist in Abb. 7-15 b) dargestellt. Darin sind die kontinuierlichen Flanken ebenfalls gut erkennbar. Allerdings unterscheidet sich die Stufenhöhe zwischen linker und rechter Seite deutlich. Dieser Unterschied ist in der REM-Aufnahme nicht erkennbar, was auf einen Messfehler schließen lässt. Die gemessene Stufenhöhe variiert von  $0,1 \mu\text{m}$  bis  $0,5 \mu\text{m}$ . Dies ist eine signifikante Abweichung zu der im Design festgelegten Stufenhöhe von  $1,2 \mu\text{m}$ , allerdings können auch an dieser Stelle Messfehler nicht ausgeschlossen werden.

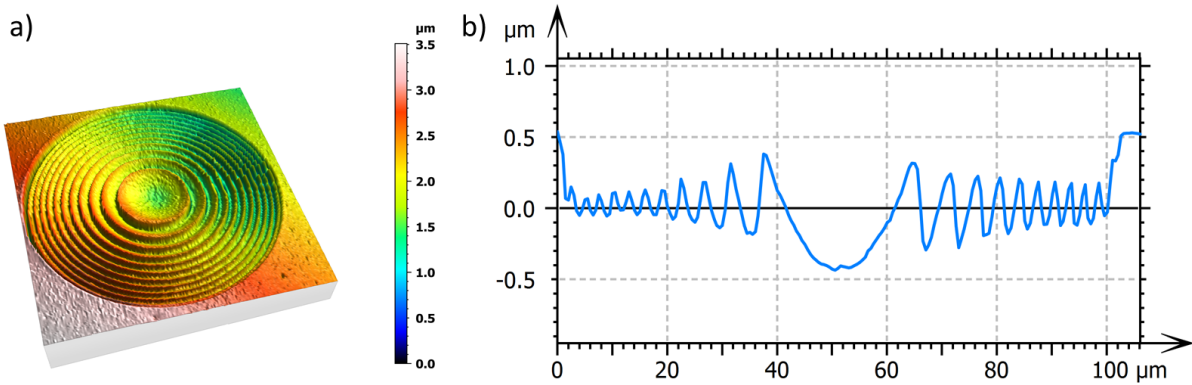


Abb. 7-15: a) Vermessung des DOE im strukturierten Werkzeugeinsatz mittels LAM und b) extrahiertes 2D-Profil durch den Mittelpunkt des DOE

### 7.3.2 Charakterisierung der mittels Spritzprägen abgeformten Nanostrukturen

Die mittels Ionenstrahlschreiben hergestellten Nanostrukturen wurden mit dem in Kapitel 7.2.3 beschriebenen Spritzprägeprozess abgemustert, um zu überprüfen, wie gut sich diese Strukturen in den Kunststoff übertragen lassen. Dabei sollte auch evaluiert werden, ob ein Werkzeugeinsatz aus Titan in einem Spritzprägeprozess einsetzbar ist. Die Tatsache, dass die abgemusterten Bauteile aus einem transparenten Kunststoff bestehen (Zeonex COP 330R) erschwert die Charakterisierung, da zum einen optische Messsysteme typischerweise Probleme aufweisen, transparente Materialien zu vermessen (z.B. chromatisch konfokale Messtechnik), und zum anderen der nicht leitfähige Kunststoff die Darstellung mit dem REM nicht gestattet. Aus diesem Grund wurde für die Charakterisierung zum einen optische Mikroskopie und zum anderen das LAM-Verfahren eingesetzt. Die Vermessung der Strukturen mittels AFM ist aus technischer Sicht möglich, allerdings konnten die Strukturen auf dem transparenten Material aufgrund der sehr kleinen Größe mit dem verfügbaren Messsystem nicht lokalisiert werden.

In Abb. 7-16 a) ist eine Mikroskopaufnahme des abgeformten USAF-8 Targets abgebildet. Die Strukturen sind aufgrund des Abformprozesses alle spiegelverkehrt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass alle Elemente abgeformt wurden und auch die kleinsten Balken aus Element 6 noch getrennt voneinander erkennbar sind. Dies ist auch bei der LAM-Vermessung des Targets in Abb. 7-16 b) erkennbar. Daraus kann geschlossen werden, dass die Strukturen vollständig abgeformt wurden. Allerdings sind die Balken in der LAM-Messung nicht mehr so deutlich getrennt wie in der Mikroskopaufnahme.

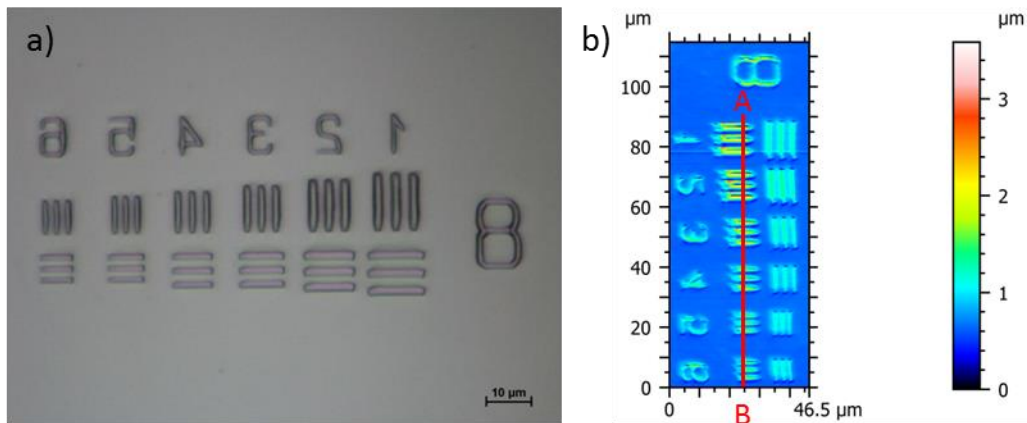


Abb. 7-16: a) Mikroskopaufnahme des abgeformten USAF-8 Targets mit 100x Vergrößerung, b) LAM-Messung der abgeformten Strukturen

Betrachtet man die mittels LAM gemessenen Balken in einem 2D-Profileschnitt (Abb. 7-17), so besitzt jeder Balken zwei Peaks. Diese sind auf den sogenannten „Batwing-Effekt“ (Fledermaus-Effekt) zurückzuführen, der bei der optischen Vermessung im Sub-Mikrometerbereich an scharfen Kanten auftritt [178,179]. Diese Peaks entstehen durch Beugungseffekte an scharfen Kanten in der Größenordnung der Wellenlänge des Messstrahls [180]. Es ist in der Messung allerdings gut zu erkennen, dass die Strukturhöhe bei allen Balken ungefähr gleich hoch ist und etwa 1,2 μm beträgt. Auch die unterschiedliche Balkenbreite der einzelnen Elemente kann in der Messung erkannt werden. Eine exakte Charakterisierung der einzelnen Komponenten ist jedoch aufgrund der starken Überlagerung der Messung mit Artefakten nicht möglich.

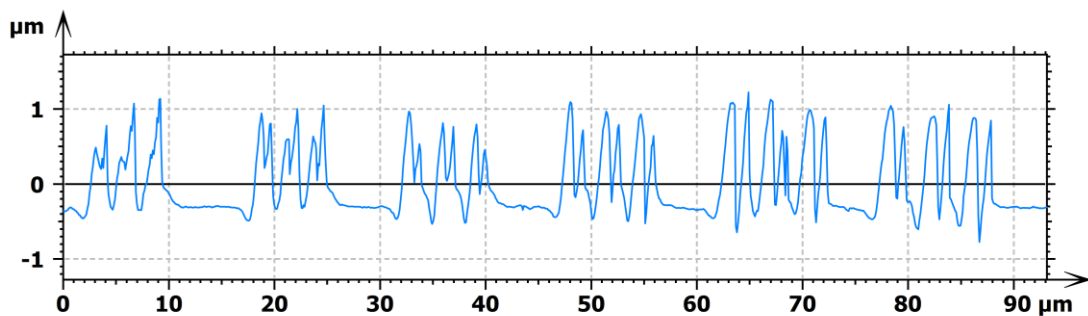


Abb. 7-17: Extrahiertes 2D-Profil entlang der in Abb. 7-16 b) dargestellten Line AB in der LAM-Messung

Das abgeformte USAF-9 Target ist in Abb. 7-18 a) abgebildet. Dabei ist zu erkennen, dass nicht mehr alle Strukturen getrennt voneinander erkennbar sind. In wie weit dies auf die begrenzte Auflösung des Mikroskops zurückzuführen ist, kann nur schwer bewertet werden. Die Zahlen über den Elementen sind noch lesbar. Es ist auffällig, dass insbesondere die Querbalken deutlich schlechter aufgelöst werden und bereits bei Element 1 verschwimmen, wohingegen die Längsbalken bis Element 4 noch getrennt erkennbar sind. Dies entspricht einer Balkenbreite von 690 nm. Ein ähnliches Ergebnis ist auch bei der Vermessung der

Strukturen mittels LAM erkennbar (siehe Abb. 7-18 b). Dabei sind die Längsbalken deutlich besser abgeformt als die Querbalken, obwohl sowohl in X- als auch in Y-Richtung die gleiche Auflösung von  $0,1 \mu\text{m}$  bei der Messung verwendet wurde. Dieses Ergebnis muss ein Resultat des Spritzprägeprozesses sein, da die REM-Aufnahme des Werkzeugeinsatzes bei dem USAF-9 Target diese Abweichungen nicht aufweist (Abb. 7-12 a). Eine Ursache für diese Unterschiede bei den Balken kann die Fließrichtung der Schmelze sein, die beim Füllvorgang entlang der Längsbalken fließt. Allgemein muss festgestellt werden, dass das LAM-Verfahren bei der Vermessung des USAF-9 Targets an seine Grenzen stößt. Dies liegt insbesondere daran, dass die Strukturgrößen im Bereich der Spotgröße des Lasers liegen, wodurch das Erzeugen von getrennten Messpunkten nicht mehr möglich ist.

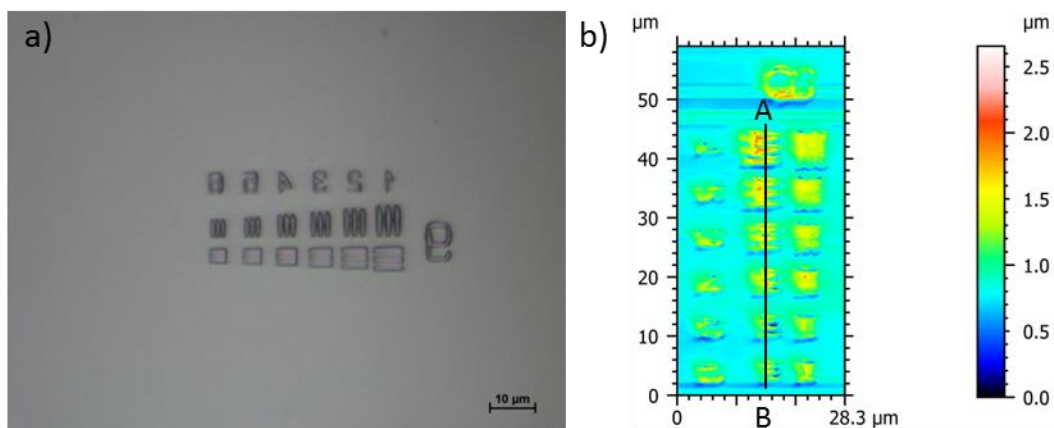


Abb. 7-18: a) Mikroskopaufnahme des abgeformten USAF-9 Targets mit 100x Vergrößerung, b) LAM-Messung der abgeformten Strukturen

In Abb. 7-19 ist ein extrahiertes 2D-Profil aus der LAM-Messung dargestellt. Die gemessene Strukturhöhe beträgt dabei nur noch ca.  $1 \mu\text{m}$ . Messartefakte durch den Batwing-Effekt beeinflussen das Messergebnis noch deutlicher als in der Vermessung der USAF-8 Struktur, wodurch eine zuverlässige Charakterisierung nicht möglich ist. Die einzelnen Balken sind in der Messung nur teilweise erkennbar. Vergleicht man die LAM-Messung im Gesamten mit der Mikroskopaufnahme, so sehen die Messergebnisse schlechter aus, als die vergrößerte Aufnahme vermuten lässt.

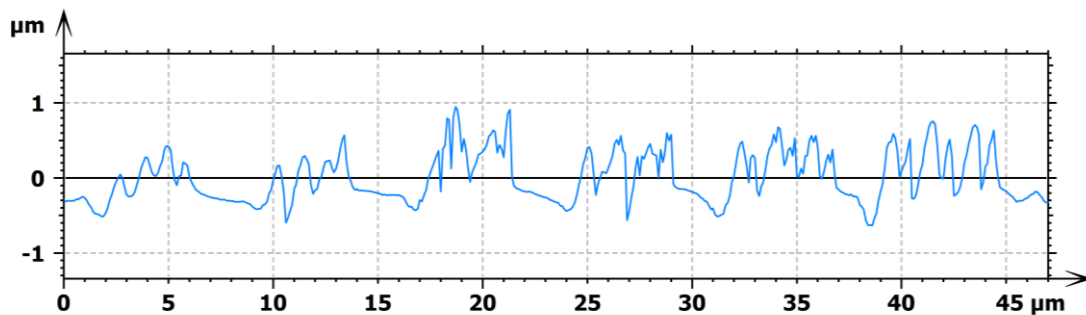


Abb. 7-19: Extrahiertes 2D-Profil entlang der in Abb. 7-18 b) dargestellten Line AB in der LAM Messung



In Abb. 7-20 ist das abgeformte DOE abgebildet. Die Mikroskopaufnahme zeigt dabei eine gleichförmige Struktur ohne erkennbare Abformfehler (Abb. 7-20 a). Die Vermessung des DOE mittels LAM bestätigt diesen Eindruck. Das extrahierte 2D-Profil hingegen zeigt wie bereits beim Werkzeugeinsatz, dass es deutliche Unterschiede zwischen der linken und rechten Seite der Strukturen gibt. Bei Rotation der Probe ergibt sich allerdings dasselbe Bild. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Messrichtung einen Einfluss auf das Messergebnis hat und sich dadurch auch die unterschiedlichen Stufenhöhen zwischen linker und rechter Seite erklären lassen. Um dies jedoch endgültig zu bestätigen, werden alternative Messmethoden benötigt, die zusätzliche Ergebnisse liefern. Die gemessene Stufenhöhe variiert dabei zwischen  $0,3\ \mu\text{m}$  und  $0,5\ \mu\text{m}$ . Diese Stufenhöhen sind vergleichbar mit denen, die im Werkzeugeinsatz gemessen wurden, wobei in der abgeformten Struktur allgemein größere Stufenhöhen gemessen wurden. Der Unterschied kann nach aktuellem Kenntnisstand nur mit Messungenauigkeiten erklärt werden. Insgesamt weicht die Stufenhöhe allerdings deutlich von der Design-Stufenhöhe ab.

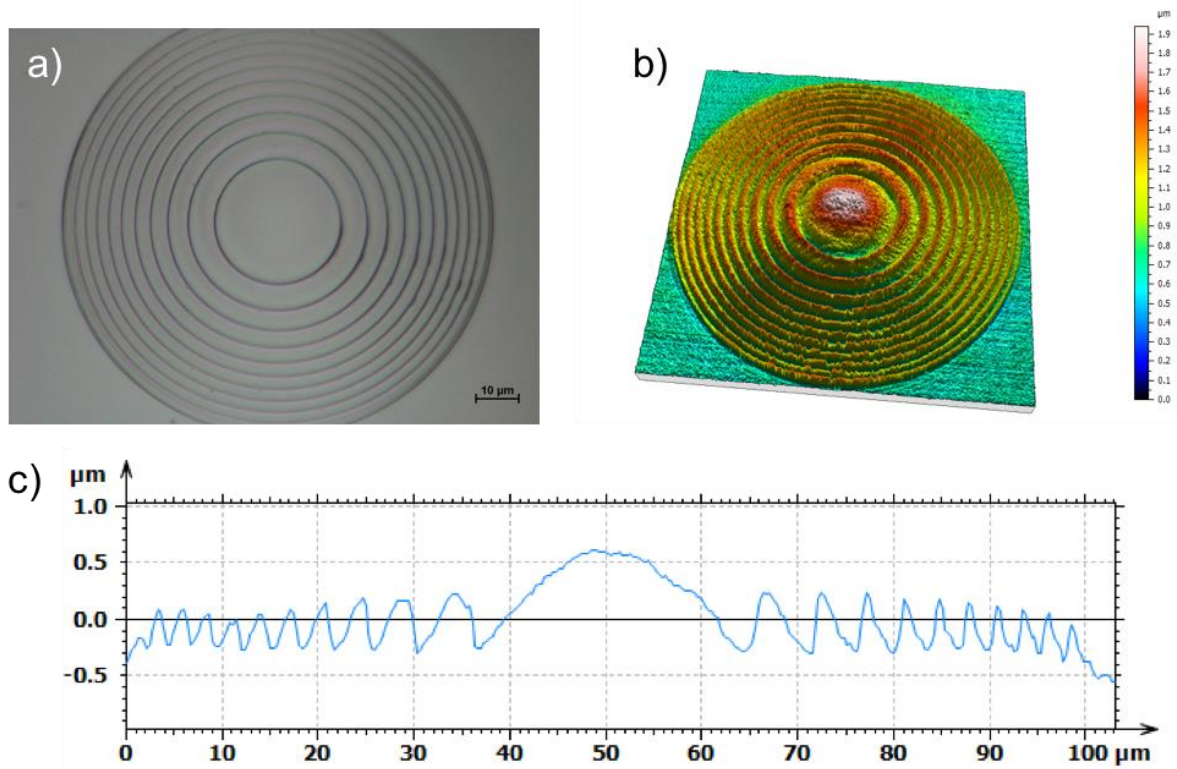


Abb. 7-20: a) Mikroskopaufnahme des abgeformten DOE mit 100x Vergrößerung, b) LAM-Messung des abgeformten DOE, c) extrahiertes 2D-Profil aus der LAM Messung

### 7.3.3 Demonstration der Funktionsfähigkeit der spritzgeprägten DOE

Zur Demonstration der Funktionsfähigkeit der spritzgeprägten DOE wurde ein Aufbau am 4. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart verwendet. Dabei wird ein Laserstrahl durch das DOE geführt. Mit einem Mikroskop wird anschließend die resultierende Fokusebene des Laserstrahls aufgenommen, wodurch der Fokusspot vermessen werden kann. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abb. 7-21 dargestellt. Der verwendete

Laser besitzt eine Wellenlänge von 633 nm, was auch der Design-Wellenlänge des DOE entspricht. Um den Laser auf das DOE zu lenken, wird der Strahl durch einen Spiegel um 90° abgelenkt und durch das DOE geführt.

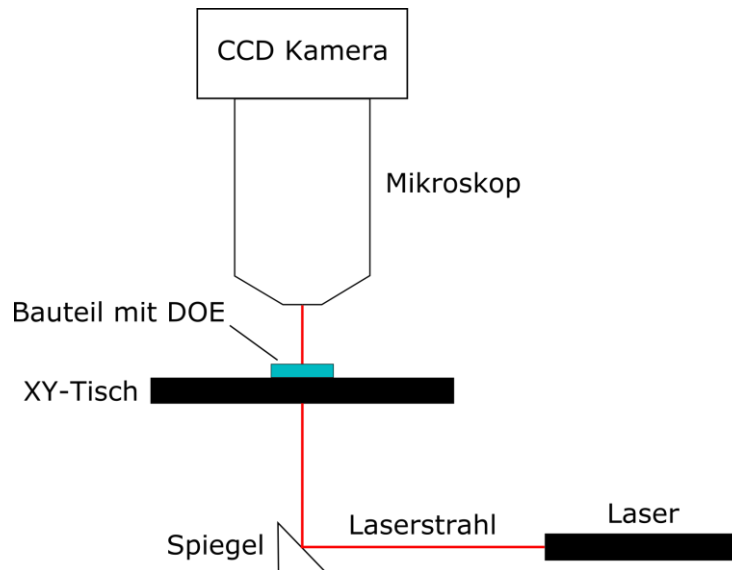
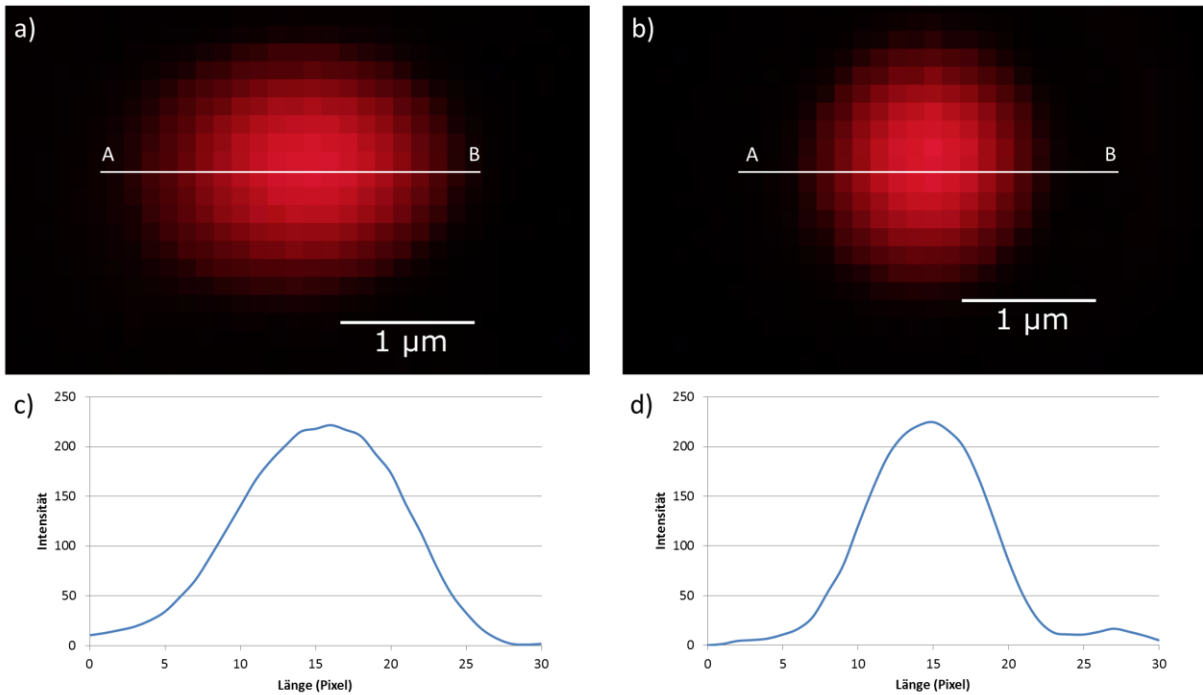


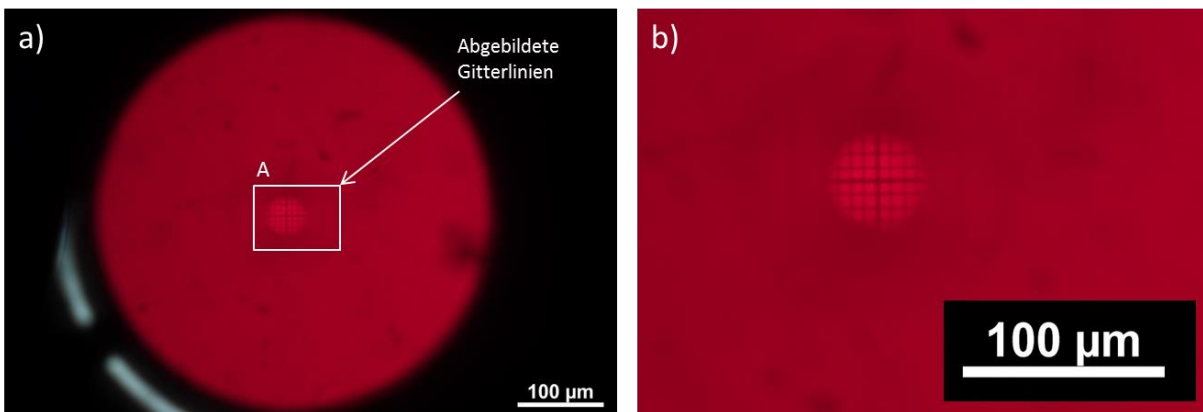
Abb. 7-21: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Charakterisierung des DOE

In Abb. 7-22 a) ist der resultierende Laser-Spot in der Fokusebene zu sehen, welcher durch das spritzgeprägte DOE erzeugt wird. Der Spot besitzt eine leicht elliptische Form mit einer gemessenen Halbwertsbreite (engl. full width at half maximum) von 2  $\mu\text{m}$  und Höhe von 1,5  $\mu\text{m}$ . Dieser Wert gibt die Breite der Kurve bei halber Intensität an. Um einen Vergleich für die Qualität des DOE zu haben, wurde dieselbe Messung an einem DOE aus Glas durchgeführt. Für das Glas-DOE wurde die Struktur mittels Ionenstrahlschreiben direkt in ein Glassubstrat eingebracht. Das Design entspricht dabei dem DOE, das auch für den Titanwerkzeugeinsatz verwendet wurde. Der resultierende Laser-Spot in der Fokusebene besitzt eine runde Form mit einer Halbwertsbreite von 1,5  $\mu\text{m}$ , wie in Abb. 7-22 b) zu sehen ist. Die maximale Intensität im Zentrum liegt dabei bei dem DOE aus Glas um etwa 2 % höher als bei dem spritzgeprägten DOE. Die beiden extrahierten Intensitäts-Profile aus den resultierenden Laser-Spots sind in Abb. 7-22 c) und d) abgebildet. Die Intensität ist dabei ausschließlich aus dem roten Farbkanal entnommen (Maximum entspricht 255), über eine Länge von 30 Pixeln durch den Laser-Spot. Dabei ist ebenfalls erkennbar, dass der Laser-Spot des Glas-DOE etwas schmaler ist als bei dem spritzgeprägten DOE. Die Ergebnisse zeigen, dass durch das spritzgeprägte DOE eine deutliche Fokussierung des Laser Spots möglich ist und nur geringe Abweichungen zu dem Glas-DOE vorhanden sind.



**Abb. 7-22:** a) Resultierender Laser-Spot des spritzgeprägten DOE in der Fokusebene, b) resultierender Laser-Spot eines in Glas hergestellten DOE mit gleichem Design, c) extrahiertes Profil entlang AB aus dem resultierenden Laser-Spot des spritzgeprägten DOE, d) extrahiertes Profil entlang AB aus dem resultierenden Laser-Spot des Glas-DOE

Neben der Untersuchung des Laser Spots wurde ebenfalls geprüft, ob mit dem DOE eine Abbildung in der Fokusebene möglich ist. Hierfür wurde in einem Abstand von 25 mm zu dem spritzgeprägten DOE ein transparentes Millimeterpapier positioniert und mit dem Laser durchleuchtet. Der resultierende Laserstrahl in der Fokusebene wurde durch das Mikroskop betrachtet. Das resultierende Bild ist in Abb. 7-23 dargestellt. Die Abbildung der Gitterlinien ist ohne erkennbaren Verzug, was auf eine gute Qualität des DOE schließen lässt. Aufgrund der Tatsache, dass der Versuchsaufbau keine Blende für das Laserlicht besitzt, konnte der Bereich des Laserstrahls nicht auf den Durchmesser des DOE begrenzt werden, sondern beleuchtete auch die Bereiche außerhalb. Dadurch ist der Kontrast der Abbildung gering.



**Abb. 7-23:** a) Abbildung der Gitterlinien eines Millimeterpapiers in der Fokusebene und b) vergrößerte Ansicht des Bereiches A

## **7.4 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung**

In den folgenden Abschnitten werden die neu entwickelte Prozesskette sowie die Ergebnisse des Ionenstrahlschreibens und des Spritzprägens diskutiert. Des Weiteren sollen allgemeine Erkenntnisse abgeleitet werden. Außerdem sollen mögliche Anwendungsgebiete für diese neuartige Prozesskette beschrieben werden. Darüber hinaus wird ein Ausblick über noch offene Punkte gegeben, die in zukünftigen Arbeiten geklärt werden müssen.

Betrachtet man die Prozesskette im Gesamten, so konnten zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Die Strukturen, welche mittels Ionenstrahlschreiben in einen Titaneinsatz eingebracht wurden, konnten erfolgreich in ein Spritzprägewerkzeug integriert und auch abgemustert werden. Die Prozesskette bietet dabei den großen Vorteil, dass kein zusätzlicher Galvanokopierprozess benötigt wird. Das Ionenstrahlschreiben bietet daher als einzige bekannte Technologie die Möglichkeit, eine Direktstrukturierung im Mikro- und Sub-Mikrometerbereich bei gleichzeitig extrem hoher Präzision durchzuführen. Dies bietet zum einen Zeit- und Kostenvorteile und zum anderen besteht die Möglichkeit, dass dadurch die Standzeit der Werkzeugeinsätze erhöht werden kann. Dies muss allerdings in zukünftigen Arbeiten noch experimentell nachgewiesen werden. Des Weiteren können Fehler, die im Galvanokopierprozess entstehen, komplett vermieden werden. Das Spritzprägen als letzter Schritt der Prozesskette erweist sich als gut geeignete Technologie zur Replikation, auch bei Strukturgrößen im Mikro- und Sub-Mikrometerbereich.

Bezüglich der Charakterisierung des Werkzeugeinsatzes sowie der abgemusterten Strukturen war die Messtechnik der limitierende Faktor. Die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Strukturen bringen die verfügbare Messtechnik sowohl bei der Bildgebung als auch bei der quantitativen Vermessung an ihr Limit oder übersteigen sogar die Fähigkeiten der Geräte. Aus diesem Grund muss hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Charakterisierung des Werkzeugeinsatzes und der Bauteile von einer gewissen Unsicherheit überlagert ist.

Die Strukturierung eines Titanwerkzeugeinsatzes erwies sich als sehr gut. Die USAF Targets ließen sich fast vollständig abbilden. Erst bei dem sechsten Element des USAF-9 Targets konnten an den Querbalken Ungenauigkeiten erkannt werden. Dies entspricht einer Strukturgröße von  $0,55\ \mu\text{m}$ . Vergleicht man die Ergebnisse mit dem DOE, so kann gesagt werden, dass bei dem USAF-8 Target nicht die laterale Strukturgröße das Limit darstellt, sondern das Aspektverhältnis von Strukturbreite zu Strukturtiefe. Das DOE weist ähnlich große Strukturen auf und kann sehr gut hergestellt werden, da es ein geringeres Aspektverhältnis besitzt. Daher scheint die Auflösungsgrenze für die Strukturgröße in einem Titanwerkzeugeinsatz noch nicht erreicht zu sein, allerdings muss für sehr kleine Strukturen das Aspektverhältnis beachtet werden. Die gemessene Stufenhöhe von ca.  $0,5\ \mu\text{m}$  ist allerdings geringer als die Design-Stufenhöhe von  $1,2\ \mu\text{m}$ . In wie weit diese Abweichung auf Messfehler oder auf ungenaue Strukturierung zurückzuführen ist, konnte mit den verfügbaren Auswertetechnologien nicht endgültig bestimmt werden. Gleiches gilt für die Replikation der Strukturen mittels Spritzprägen. Dabei liefert die Abformung des DOE deutlich bessere Ergebnisse als die des USAF-9 Targets. Dies lässt ebenfalls darauf schließen, dass die Struk-

turgrößen grundsätzlich abgeformt werden können, jedoch das Aspektverhältnis beachtet werden muss. Des Weiteren scheint die Flussrichtung der Schmelze einen Einfluss auf die Abformung auszuüben, wenn die Strukturen ein höheres Aspektverhältnis besitzen. Wenn die Strukturen senkrecht zur Flussrichtung liegen, ist das Füllverhalten schlechter als bei Strukturen, die parallel zur Fließrichtung verlaufen. Ob dieser Effekt durch Optimierung der Prozessparameter beim Spritzprägen reduziert werden kann, muss in zukünftigen Untersuchungen geklärt werden.

Das DOE konnte gut abgeformt werden und die resultierende Stufenhöhe ist vergleichbar mit der gemessenen Stufenhöhe im Werkzeugeinsatz. Bei der Verwendung von Titan als Material für den Werkzeugeinsatz im Spritzprägewerkzeug konnten keine negativen Einflüsse festgestellt werden. Weder bei der Prozessführung noch bei den verwendeten Prozessparametern mussten Änderungen im Vergleich zu Werkzeugeinsätzen aus Stahl oder Nickel vorgenommen werden. Daraus lässt sich schließen, dass die Titaneinsätze problemlos als Werkzeugeinsätze für Spritzprägeprozesse eingesetzt werden können. Die Demonstration der Funktionsfähigkeit der spritzgeprägten DOE zeigte, dass die Bauteile einen deutlichen Fokussierungseffekt haben und einen kleinen Fokus Spot von ca.  $2\ \mu\text{m} \times 1,5\ \mu\text{m}$  erzeugen. Die erzielten Ergebnisse sind dabei vergleichbar mit denen die durch ein DOE in Glas erzielt werden können.

Vergleicht man die hier beschriebene Prozesskette mit alternativen Herstellungsmethoden, so ist die verfügbare Zahl an Technologien für Strukturen in diesem Größenbereich bereits sehr eingeschränkt. Lediglich lithographische Prozesse über Belichtungsmasken sowie das Elektronenstrahlschreiben ermögliche die Herstellung solcher Strukturen. All diese Verfahren benötigen aber den Umweg über die Herstellung eines Mastersubstrats mit anschließendem Galvanokopierprozess zur Herstellung eines Werkzeugeinsatzes und sind nicht für die Grauskalenstrukturierung geeignet. Aus diesem Grund stellt das Ionenstrahlschreiben eine gute und vielversprechende Technologie zur Herstellung von mikro- und nanostrukturierten Werkzeugeinsätzen dar.

Allerdings muss an dieser Stelle auch erwähnt werden, dass die Bearbeitungszeit aktuell noch eine starke Limitation des Prozesses darstellt. Allein die Herstellung des DOE mit einer Fläche von ca.  $100 \times 100\ \mu\text{m}^2$  benötigt 15 h. Aus diesem Grund sind die möglichen Anwendungsgebiete noch eingeschränkt. Mögliche Anwendungsgebiete für diese Prozesskette liegen insbesondere in Bereichen, in denen mikro- und nanostrukturierte Optiken in großen Stückzahlen hergestellt werden müssen. Dabei ist insbesondere der Consumer-Markt zu nennen, z.B. bei Smartphone-Kameras. Dort sind die Hersteller durch die Standzeiten ihrer Werkzeuge stark limitiert und suchen daher nach besseren Lösungen.

Bevor diese Prozesskette allerdings in industrielle Anwendungen überführt werden kann, sind noch offene Fragen zu klären. Dazu gehört insbesondere eine ausführliche optische Charakterisierung der hergestellten Bauteile. Des Weiteren muss eine optische Auslegung des gesamten Bauteils erstellt werden, um eine ausführliche Charakterisierung zu ermöglichen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Standfestigkeit der Titanwerkzeugeinsätze. Die bisher

angenommene hohe Standfestigkeit beruht auf der hohen Härte des Materials, muss aber erst noch in der Praxis bestätigt werden. Dabei gilt es insbesondere zu klären, ob auch die feinen Mikro- und Nanostrukturen den Prozessbedingungen beim Spritzprägen über eine hohe Stückzahl standhalten.

Aus den in diesem Prozess erarbeiteten Ergebnissen können die folgenden allgemeinen Erkenntnisse abgeleitet werden, die auch für andere Anwendung von Bedeutung sind:

- Ionenstrahlschreiben bietet eine einzigartige Möglichkeit zur Direktstrukturierung von harten Materialien bei gleichzeitiger Auflösung und Präzision im Sub-Mikrometerbereich. Dies eröffnet neue Möglichkeiten bei der Herstellung von mikro- und nanostrukturierten Kunststoffoptiken
- Titan kann als Material für optische Werkzeugeinsätze eingesetzt werden. Dabei müssen keine spezifischen Maßnahmen in der Prozessführung und bei den Prozessparametern beachtet werden
- Spritzprägen bietet die Möglichkeit, Strukturen auch im Sub-Mikrometerbereich abzuformen, allerdings muss das Aspektverhältnis beachtet werden. Bei zu hohem Aspektverhältnis ist das Füllverhalten optischer Polymere zur Abformung der Nanostrukturen eingeschränkt und dadurch die Abformgenauigkeit limitiert.

## **8 Diskussion**

Nachdem die Ergebnisse der einzelnen Prozessketten direkt in den drei entsprechenden Kapiteln bereits diskutiert wurden, werden in diesem Kapitel die drei Prozessketten zusammen diskutiert und miteinander verglichen. Des Weiteren wird eine Auswahlhilfe für Technologien zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen für optische Bauteile vorgestellt, welche in Form eines Entscheidungsbaumes umgesetzt worden ist. Diese verarbeitet dabei das im Stand der Technik zusammengetragene Wissen über die Herstellungstechnologien zu einer übersichtlichen Grafik. Am Ende des Kapitels werden nochmals die größten Herausforderungen bei der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken beschrieben.

### **8.1 Vergleich der Prozessketten**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei unterschiedliche mikrostrukturierte Bauteile mittels Spritzprägen hergestellt. Dabei wurden unterschiedliche Herstellungstechnologien für die Werkzeugeinsätze verwendet, was zu unterschiedlichen Prozessketten führte. In diesem Kapitel sollen die drei beschriebenen Prozessketten diskutiert und verglichen werden.

Die erste Prozesskette verwendet Ultrapräzisionsbearbeitung zur Herstellung eines optischen Werkzeugeinsatzes mit einem Mikrolinsenarray. Dabei wird das UP-Fräsen genutzt um 12.000 Linsen in einen Werkzeugeinsatz einzubringen. Da der Einsatz von Diamantwerkzeugen in eisenhaltigen Werkstoffen nur bedingt möglich ist, benötigt der Werkzeugeinsatz vor der eigentlichen Strukturierung eine NiP-Beschichtung. Der so strukturierte Werkzeugeinsatz kann anschließend direkt für das Spritzgießen/Spritzprägen verwendet werden und benötigt keine zusätzliche Abformung mehr. Die zweite Prozesskette, die in dieser Arbeit beschrieben wird, beruht auf der Kombination aus LDW und Galvanokopieren zur Herstellung eines Werkzeugeinsatzes für ein DOE. Die diffraktive Struktur befindet sich dabei auf einer gekrümmten Fläche, welche auf einem Glasmaster erzeugt wird und anschließend durch Galvanokopieren in einen festen Werkzeugeinsatz überführt wird. Dieser wird für die Replikation mittels Spritzprägen eingesetzt. Die letzte Prozesskette beschreibt eine neuartige Herstellungsvariante für nanostrukturierte Werkzeugeinsätze. Hierbei wird das Ionenstrahlschreiben zur Direktstrukturierung eines nicht-magnetischen Werkzeugeinsatzes angewendet und die erzeugten Strukturen mittels Spritzprägen abgeformt.

Vergleicht man die drei Prozessketten nun miteinander, können folgende Punkte festgestellt werden:

- Bei der Bearbeitungszeit unterscheiden sich die Prozesskette mit Ultrapräzisionsbearbeitung und die Prozesskette mit LDW kaum. Dies liegt daran, dass die externen Bearbeitungsschritte den deutlich größeren Zeitanteil einnehmen. Für die NiP-Beschichtung sowie die Galvanoab-

formung sind jeweils mindestens zwei Wochen einzuplanen. Aus diesem Grund spielen die eigentlichen Bearbeitungszeiten für die Mikrostrukturierung eine untergeordnete Rolle, welche jeweils innerhalb von wenigen Stunden durchgeführt werden können. Zusätzlich sind für die externen Bearbeitungsschritte Vorbereitungen zu treffen, welche meist durch konventionelle Fräsbearbeitung erfolgen können, die zusätzlich Zeit beanspruchen. Die Herstellung von strukturierten Werkzeugeinsätzen mittels Ionenstrahlschreiben hingegen kann direkt ohne externe Bearbeitung ausgeführt werden. Hierdurch fällt die Bearbeitungszeit deutlich kürzer aus, obwohl der Prozess des Ionenstrahlschreibens langsam ist. Es muss an dieser Stelle allerdings erwähnt werden, dass die großflächige Strukturierung mittels Ionenstrahlschreiben sehr zeitaufwendig wird und auch technisch begrenzt ist.

- Vergleicht man hingegen die einzelnen Strukturierungsverfahren, so ist die Prozesszeit für LDW und UP-Fräsen deutlich geringer als beim Ionenstrahlschreiben. Mittels LDW und UP-Fräsen können Flächen mit einer Größe von einigen Quadratzentimetern in wenigen Stunden strukturiert werden, wohingegen beim Ionenstrahlschreiben die Bearbeitung einer Fläche von  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  bereits einige Stunden benötigt. Bezüglich der Oberflächenqualität liefert die Ultrapräzisionsbearbeitung mit  $R_a < 10 \text{ nm}$  die besten Ergebnisse. Beim LDW ist die Oberflächenqualität durch stehende Wellen während des Schreibprozesses begrenzt und beträgt ca.  $R_a = 24 \text{ nm}$ . Die Oberflächenqualität auf den mittels Ionenstrahlschreiben hergestellten Strukturen konnte aufgrund der extrem kleinen Strukturgröße messtechnisch nicht erfasst werden. Bezüglich der Auflösungsgenauigkeit liefert das Ionenstrahlschreiben mit Abstand die besten Ergebnisse, da selbst Strukturen im Sub-Mikrometerbereich hochgenau hergestellt werden können.
- Alle drei verwendeten Strukturierungsverfahren besitzen allerdings auch klare Limitationen. Beim UP-Fräsen sind das zum einen die Verfügbarkeit der Diamantwerkzeuge, welche die erzielbare Strukturgröße limitieren, und zum anderen der Verschleiß der Werkzeuge. Hierdurch ist die strukturierbare Fläche limitiert, wenn Oberflächen mit optischer Qualität hergestellt werden sollen. Wie bereits erwähnt, ist das LDW insbesondere bezüglich der erzielbaren Oberflächenqualität limitiert, welche für optische Anwendungen noch vergleichsweise hoch ist. In diesen Anwendungen werden oft Rauheitswerte  $R_a < 10 \text{ nm}$  gefordert. Ebenso sind die darstellbaren Strukturgrößen aufgrund der Spotgröße des Laserstrahls auf wenige Mikrometer beschränkt. Die größte Einschränkung des Ionenstrahlschreibens ist die hohe Bearbeitungszeit, wodurch die Direktstrukturierung nur für kleine Flächen eingesetzt werden kann.



- Für alle Prozessketten gilt, dass eine sehr hohe Prozesskontrolle über alle Bearbeitungsschritte hinweg notwendig ist, um qualitativ hochwertige Bauteile zu erzielen. Die Prozessparameter müssen daher exakt aufeinander abgestimmt sein und durchgehend kontrolliert werden. Kleinste Abweichungen können später zu Qualitätsverlusten in den optischen Bauteilen führen. Die wichtigsten Faktoren und Prozessparameter der einzelnen Prozessketten sind in den entsprechenden Kapiteln 5-7 ausführlich beschrieben.

Betrachtet man die in dieser Arbeit vorgestellten Prozessketten, so bilden diese einen Großteil der möglichen und heute verwendeten Prozessketten ab. Eine Prozesskette basiert auf der Direktstrukturierung eines harten Werkzeugeinsatzes mit Mikrostrukturen. Hierfür wurde das Beispiel der Ultrapräzisionsbearbeitung verwendet, welche eine der am häufigsten verwendeten Technologien im Bereich der Kunststoffoptiken ist. Alternative Herstellungsverfahren für Werkzeugeinsätze, die eine vergleichbare Prozesskette aufweisen würden, sind Erodieren, ECM und Laserbearbeitung. Diese Verfahren könnten sogar auf eine NiP-Beschichtung verzichten, aber würden im Gegenzug eine schlechtere Oberfläche generieren, die möglicherweise nachgearbeitet werden müsste. Die zweite Prozesskette verwendet das LDW-Verfahren zur Herstellung eines Mastersubstrats mit anschließender Galvanikabformung und Abmusterung. Diese beschriebene Prozesskette kann für alle Mikrostrukturierungsverfahren verwendet werden, welche eine Masterstrukturierung ermöglichen. Dabei werden insbesondere Fotolacke strukturiert. Beispiele hierfür sind Elektronenstrahlschreiben, Ionenstrahlschreiben und Maskenlithographie als Teil des LIGA-Prozesses. Allerdings können diese Technologien im Gegensatz zum LDW-Verfahren nur begrenzt zur Strukturierung von gekrümmten Oberflächen verwendet werden. Die letzte Prozesskette, welche in dieser Arbeit aufgezeigt wird, nutzt die Direktstrukturierung eines harten Werkzeugeinsatzes mit Nanostrukturen. Diese bisher einzigartige Prozesskette ermöglicht das definierte Einbringen von Mikro- und Sub-Mikrostrukturen in einen Werkzeugeinsatz, was mit keinem anderen Herstellungsverfahren in dieser Präzision und Auflösung möglich ist.

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, decken die hier beschriebenen Prozessketten einen Großteil der möglichen Prozessketten zur Herstellung von mikro- und nanostrukturierten optischen Werkzeugeinsätzen ab. Ein kritischer Faktor für den Herstellungsprozess von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken bleibt die Auswahl des richtigen Herstellungsverfahrens für den Werkzeugeinsatz. Um diesen Entscheidungsprozess zu unterstützen, wird auf die Auswahl der Herstellungstechnologie im folgenden Kapitel 8.2 nochmals genauer eingegangen.

## 8.2 Auswahl Herstellungstechnologie für optische Werkzeugeinsätze

Bereits im Jahr 1983 definierte Taniguchi die Ultrapräzisionsbearbeitung und ultra-präzise Materialbearbeitung und prognostizierte die Bearbeitungsgenauigkeiten von unterschiedlichen Bearbeitungstechnologien [49]. Eine angepasste Darstellung der Prognose ist in Abb. 8-1 dargestellt. Hierfür wurden alle in dieser Arbeit beschriebenen Herstellungsmethoden mit in das Diagramm aufgenommen. Die hier aufgeführten Technologien sind zwar nicht alle zur Herstellung von mikrostrukturierten (optischen) Werkzeugeinsätzen einsetzbar, zeigen jedoch die Bereiche auf, welche heutige Technologien bereits erreichen können. Die normalen und hochpräzisen Bearbeitungsmethoden haben dabei bereits eine lange Tradition und werden nur noch in geringem Maße verbessert. Der Bereich der ultrapräzisen Bearbeitung entwickelt sich hingegen stark weiter und ist dabei insbesondere von der Halbleiterindustrie getrieben. Diese benötigt hochgenaue Strukturierungsmethoden, die Strukturgrößen  $< 20$  nm in hohen Stückzahlen herstellen können. Für diese Strukturierungsmethoden sind meist hochpräzise Optiken notwendig, die nur noch mit Atom-/Molekülbearbeitung hergestellt werden können, um die geforderten Genauigkeiten zu erreichen. Die in Abb. 8-1 dargestellten Bearbeitungstechnologien zeigen dabei nur einen Ausschnitt der verfügbaren Technologien. Für die Herstellung von nicht-optischen Werkzeugeinsätzen und anderen Komponenten steht noch eine Vielzahl an weiteren Technologien zur Verfügung, welche allerdings hier nicht aufgeführt werden.

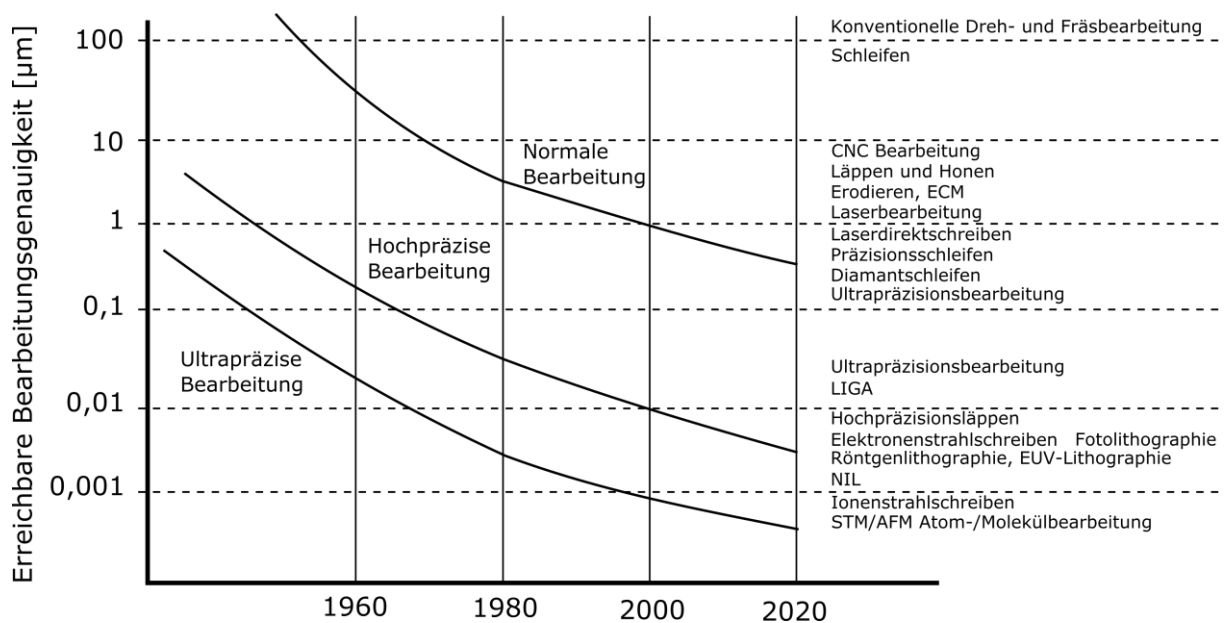


Abb. 8-1: Entwicklung der erreichbaren Bearbeitungsgenauigkeit mit unterschiedlichen Verfahren (vgl. [49,181])

Aufgrund der sehr großen Auswahl an Herstellungstechnologien, sollen in diesem Kapitel die verfügbaren Technologien für optische Werkzeugeinsätze nochmals aufgeführt und ein

Entscheidungsbaum eingeführt werden, der die Auswahl unterstützen soll. Dieser ist ein Resultat der ausführlichen Literaturrecherche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde. Der Entscheidungsbaum ist in Abb. 8-2 dargestellt. Dabei muss ausgehend vom Design des Werkzeugeinsatzes zuerst unterschieden werden, ob ein formgebendes Verfahren oder ein Mikrostrukturierungsverfahren benötigt wird. Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, dass zuerst ein formgebendes Verfahren genutzt wird, um die Grundform des Werkzeugeinsatzes herzustellen, und anschließend die Mikrostrukturen mit einem Strukturierungsverfahren aufgebracht werden. Die Anzahl der formgebenden Verfahren ist ziemlich begrenzt, da nur wenige Herstellungsverfahren Oberflächen mit optischer Qualität erzeugen können. Die formgebenden Herstellungsverfahren sind im Entscheidungsbaum nach erzielbarer Oberflächenqualität getrennt. Bei Oberflächenqualitäten von  $R_a > 50$  nm können Verfahren wie Laserbearbeitung, Erodieren und ECM eingesetzt werden. Diese erzielen zwar nicht direkt optische Oberflächen, können jedoch einen großen Materialabtrag erzielen. Aus diesem Grund wird für diese Verfahren ein Nachbearbeitungsschritt benötigt, welcher in den meisten Fällen aus Polieren/Läppen besteht. Erst dann kann ein solcher Werkzeugeinsatz für optische Komponenten verwendet werden. Die anderen formgebenden Herstellungsverfahren, die eine Oberflächenqualität von  $R_a < 50$  nm erreichen, sind die Ultrapräzisionsbearbeitung sowie Polieren/Läppen. Der Materialabtrag ist dabei prozessbedingt sehr gering, allerdings können extrem gute Oberflächen erzeugt werden. Aus diesem Grund werden oft konventionelle Bearbeitungsmethoden zur Vorbearbeitung genutzt und anschließend nur noch die Oberfläche in Form gebracht und die entsprechende Oberflächenqualität erzeugt. Neben galvanisch abgeformten Werkzeugeinsätzen sind ultrapräzisionsbearbeitete Werkzeugeinsätze heute am weitesten verbreitet. Insbesondere bei rotationssymmetrischen und Freiform-Werkzeugeinsätzen bietet die Ultrapräzisionsbearbeitung Möglichkeiten, die mit keiner anderen Technologie zu erzielen sind. Die einzelnen Prozessvarianten der Ultrapräzisionsbearbeitung werden an dieser Stelle nicht nochmals unterschieden, sind jedoch in Kapitel 3.2.1 ausführlich beschrieben.

Im Gegensatz zu formgebenden Technologien ist die Auswahl für Mikrostrukturierungsverfahren deutlich komplexer, da mehr Möglichkeiten vorhanden sind. Als Mikrostrukturen gelten dabei nur Strukturen mit definierten Geometrien und nicht zufällig erzeugte Topographien. Die entscheidenden Auswahlkriterien für das Strukturierungsverfahren sind neben der Form der Struktur die zu strukturierende Fläche und die Strukturgröße. Als Faustformel kann gesagt werden, dass die strukturierbare Fläche umso kleiner ausfällt, je kleiner die erzielbaren Strukturen sind. Dies liegt dabei zum einen an der hohen Bearbeitungszeit und zum anderen an begrenzten Arbeitsbereichen der Verfahren. NIL stellt dabei eine Ausnahme dar, da dieses Verfahren im Rolle zu Rolle-Verfahren verwendet werden kann und hierdurch große Flächen und hohe Stückzahlen hergestellt werden können. Allerdings müssen die entsprechenden Masterstrukturen vorab mit einem anderen Verfahren hergestellt werden. Es gibt mehr Verfahren für kleinflächige Strukturierung als für größere Flächen. Alle Verfahren, die große Flächen strukturieren können, sind auch dafür geeignet, Flächen kleiner  $1 \text{ mm}^2$  zu bearbeiten.

Ein weiteres Verfahren, das auch größere Flächen in kurzer Zeit mit sehr feinen Strukturen strukturieren kann, ist die Maskenlithographie [182]. Dabei steigt die Bearbeitungszeit allerdings signifikant mit der Komplexität der Strukturen, wodurch diese ebenfalls deutlich höher wird. Das Verfahren kann zur Herstellung einer Masterstruktur im LIGA-Prozess eingesetzt werden, um einen Werkzeugeinsatz herzustellen.

Die Herstellungsverfahren zur Mikrostrukturierung sind in dem Entscheidungsbaum so angeordnet, dass die minimale Strukturgröße nach unten hin abnimmt. Mittels Erodieren und Ultrapräzisionsbearbeitung sind Strukturgrößen bis etwas kleiner als 10  $\mu\text{m}$  möglich. Dies liegt daran, dass für die Strukturierung Elektroden bzw. Diamantwerkzeuge hergestellt werden müssen, die zur Erzeugung der Mikrostrukturen verwendet werden können. Diese sind allerdings in ihrer minimalen Größe limitiert, was die Strukturgröße begrenzt. Dies ist bei den anderen Verfahren nicht der Fall, wodurch auch kleinere Strukturgrößen erzielt werden können. Die minimale Strukturgröße bei der Laserbearbeitung liegt in etwa im gleichen Größenbereich wie bei den vorherigen Technologien, wobei mit Ultrakurzpulslasern Strukturen mit wenigen Mikrometern erzeugt werden können. Entscheidende Faktoren sind die Größe des Laserspots und die Pulslänge des Laserpulses. Insbesondere bei der Pulslänge werden mit heutigen Ultrakurzpuls-Lasern sehr geringe Materialabtragsraten pro Puls erzielt, wodurch feine Strukturen hergestellt werden können. Die drei Verfahren (Erodieren, Ultrapräzisionsbearbeitung und Laserbearbeitung) ermöglichen die Strukturierung von harten Werkzeugeinsätzen, die direkt nach der Strukturierung im Spritzguss verwendet werden können. Andere Verfahren wie LDW, LIGA, NIL und Elektronenstrahlschreiben hingegen benötigen eine Galvanoabformung zur Herstellung eines festen Werkzeugeinsatzes. Diese Verfahren können ausschließlich dazu eingesetzt werden, ein Mastersubstrat zu erzeugen. Dies ist im Entscheidungsbaum ebenfalls zu erkennen. Das Mastersubstrat ist dabei in den meisten Fällen ein Substrat, das mit Fotolack beschichtet ist. Die Strukturierung findet dann im Fotolack statt. Dies ermöglicht eine präzise und hochauflösende Strukturierung, da Fotolacke bei geeigneten Prozessparametern eine sehr hohe Abbildungsgenauigkeit aufweisen. Ionenstrahlschreiben bildet einen Sonderfall bei den Strukturierungsverfahren. Aufgrund der hohen Energie der beschleunigten Ionen ermöglicht das Verfahren sowohl die Strukturierung eines Fotolacks als auch die Direktstrukturierung eines harten Materials. Dabei kann fast jedes Material strukturiert werden, solange es nicht magnetisch ist. Zwar kann bei magnetischen Materialien ebenso ein Materialabtrag erzeugt werden, allerdings kann durch den Magnetismus kein hochauflösender, präziser Materialabtrag erzielt werden.

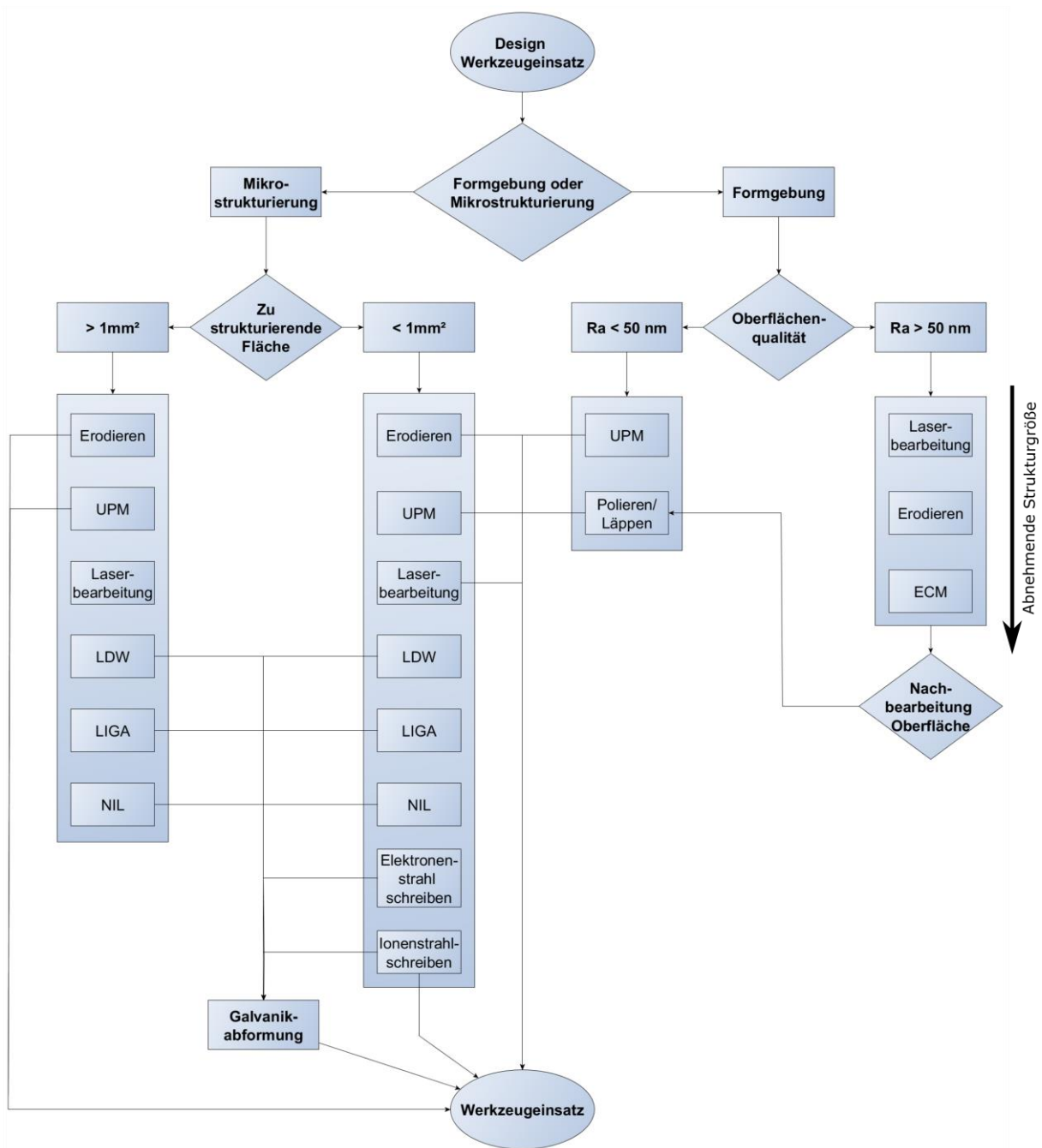


Abb. 8-2: Entscheidungsbaum zur Auswahl einer geeignete Herstellungstechnologie für optische Werkzeugeinsätze

Der in Abb. 8-2 dargestellte Entscheidungsbaum sowie die ausführliche Auflistung der einzelnen Herstellungsprozesse mit Vor- und Nachteilen in Tab. 3-1 ermöglichen die Auswahl eines geeigneten Herstellungsverfahrens für einen optischen Werkzeugeinsatz. Allgemein ist es wichtig, die Rahmenbedingungen für den Werkzeugeinsatz vorab gut zu definieren, um eine geeignete Herstellungstechnologie auszuwählen. Dadurch können die Geometrieinschränkungen der einzelnen Technologien beachtet und umgangen werden. Zusätzlich ist es empfehlenswert, die Komplexität der Fertigbarkeit der Mikrostrukturen mit dem jeweiligen Verfahren zu bewerten und in die Technologieauswahl mit einzubeziehen. Die nötige

Prozesskette von der Herstellung des Werkzeugeinsatzes bis hin zur Abmusterung im Spritzguss/Spritzprägen ergibt sich anschließend aus der Technologieauswahl.

### **8.3 Herausforderungen bei der Herstellung mikrostrukturierter Kunststoffoptiken**

Betrachtet man die Ergebnisse dieser Arbeit, so können bezüglich der Herausforderungen bei der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken drei Punkte unterschieden werden:

- Herstellung des Werkzeugeinsatzes mit geeignetem Strukturierungsverfahren
- Replikation der Mikrostrukturen
- Vermessung der Komponenten

Die Herstellung des Werkzeugeinsatzes ist der erste Schritt bei der Herstellung von Kunststoffoptiken, wenn Spritzgießen/Spritzprägen zur Replikation verwendet werden soll. Die Auswahl eines geeigneten Strukturierungsverfahrens wurde bereits im vorherigen Kapitel behandelt, daher wird auf diesen Punkt hier nicht nochmals eingegangen. Neben den Mikrostrukturen ist bei der Herstellung auch die Gesamtgeometrie des Bauteils zu beachten, welche durch den Werkzeugeinsatz abgebildet werden muss. Dadurch müssen die erzeugten Mikrostrukturen auch exakt positioniert werden, um qualitativ hochwertige Bauteile zu erhalten. Die Möglichkeit, in ein optisches Bauteil direkt Montage- und Halterungsstrukturen zu integrieren, ist einer der größten Vorteile von Kunststoffoptiken im Vergleich zu traditionellen Glasoptiken. Prozessbedingt können bei der Herstellung von Kunststoffoptiken solche Strukturen ohne größeren Aufwand mit integriert werden, wodurch eine spätere Weiterverarbeitung erleichtert wird.

Die Replikation von Mikrostrukturen mittels Spritzgießen/Spritzprägen ist äußerst komplex und wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Für die Abformung spielt neben der Strukturgröße insbesondere das Aspektverhältnis eine entscheidende Rolle. Kleine Strukturen, auch im Sub-Mikrometerbereich können in Kunststoff gut abgeformt werden, solange sie ein niedriges Aspektverhältnis haben. Für eine gute Abformung von Mikrostrukturen müssen die Spritzgussparameter für jedes Bauteil optimiert werden. Daraus resultiert in vielen Fällen ein kleines Prozessfenster, in dem hochwertige optische Bauteile hergestellt werden können. Aufgrund des kleinen Prozessfensters müssen sämtliche Parameter und Rahmenbedingungen exakt kontrolliert werden, da anderenfalls bei Abweichungen nicht funktionsfähige Bauteile entstehen. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 8-3 dargestellt. Die abgebildeten diffraktiven Strukturen sind bei der Herstellung des in Kapitel 6 beschriebenen DOE entstanden. Bei ungeeigneten Prozessparametern kann keine ausreichende Füllung der Mikrostrukturen erzielt werden, wie in Abb. 8-3 a) zu sehen. Sind die Prozessparameter allerdings optimiert und befinden sich im entsprechenden Prozessfenster, kann eine vollständige Abformung der feinen diffraktiven Strukturen erzielt werden (Abb. 8-3 b).

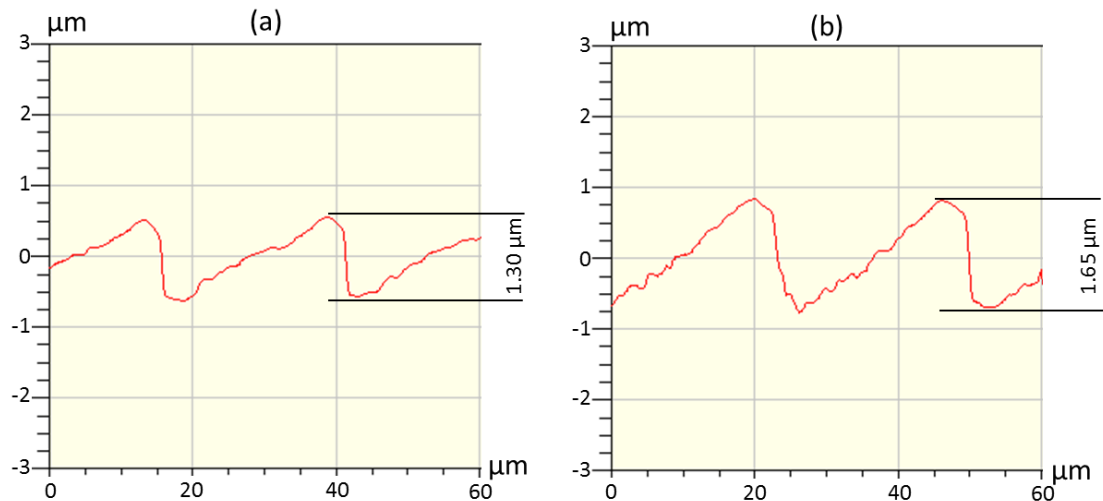


Abb. 8-3: Abformung von diffraktiven Strukturen beim Spritzprägen bei a) unpassenden Prozessparametern und b) optimierten Prozessparametern [183]

Neben der Abformung der Mikrostrukturen ist auch die fehlerfreie Abformung der Gesamtgeometrie wichtig. Dabei können zum einen Formfehler entstehen, z.B. durch unvollständige Füllung des Bauteils oder Schwindung, zum anderen können auch Fehler im Bauteil durch ein schlechtes Füllverhalten auftreten. Beispiele hierfür sind Lunker, Fließlinien oder Schlieren. Um dies zu vermeiden, müssen die Angussituation sowie die Prozessparameter optimiert und für das Bauteil angepasst werden. In Abb. 8-4 sind solche Spritzgussfehler dargestellt, welche einen späteren Einsatz der Bauteile verhindern. Die Besonderheit beim Optikspritzguss ist die Tatsache, dass die Bauteile meist transparent sind und somit Spritzgussfehler direkt erkennbar sind. Zusätzlich sind die Anforderungen bei solchen Bauteilen an die Formgenauigkeit und Homogenität des Materials extrem hoch. Kleinste Fehler während des Spritzgussprozesses führen daher direkt zu unbrauchbaren Bauteilen.

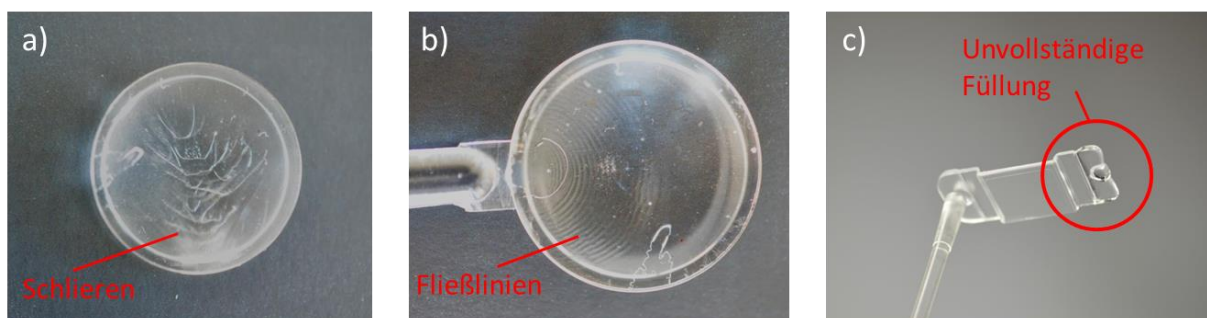
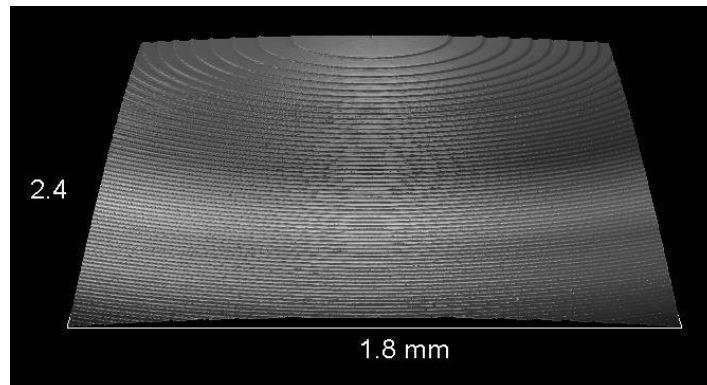


Abb. 8-4: Spritzgussfehler bei der Herstellung von mikrostrukturierten optischen Bauteilen a) Schlieren in einem DOE, Fließlinien in einem DOE und c) unvollständig gefülltes MLA [183]

Eine weitere Herausforderung bei der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken stellt die Messtechnik dar. Die Kombination aus kleinen Mikrostrukturen, großen Messflächen und transparenten Bauteilen ist eine große Herausforderung für die Messtechnik. In den meisten Fällen kann eine Vermessung der Bauteile nur durch eine Kombination ver-

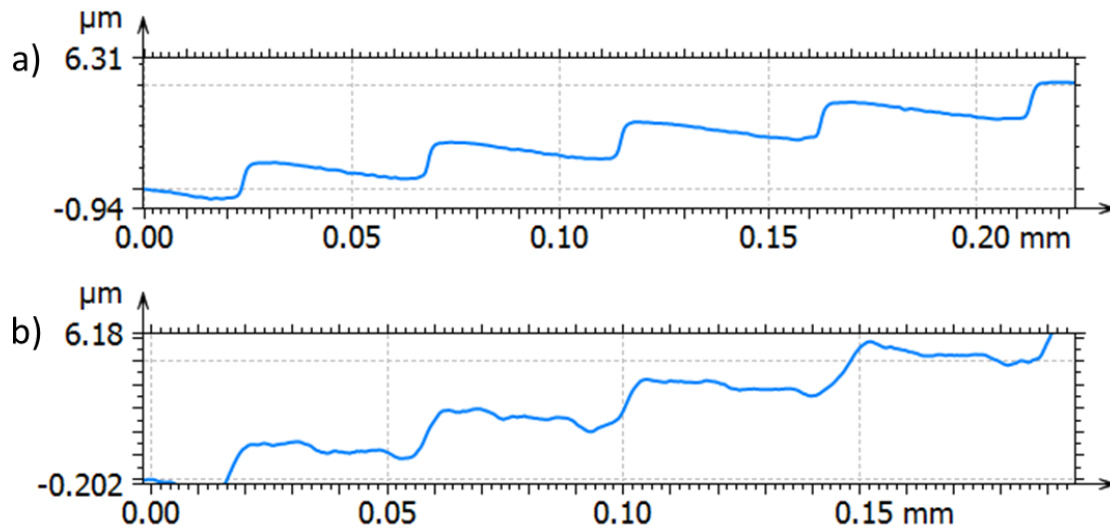
schiedener Messmethoden geschehen. Dies ist dadurch begründet, dass Messsysteme mit hoher Auflösung meist ein begrenztes Messfeld haben und somit nur Mikrostrukturen vermessen können, aber nicht die Gesamtgeometrie. Eine zusätzliche Problematik ist die Tatsache, dass bei optischen Messverfahren das verwendete Licht oft mit den optischen Mikrostrukturen interagiert, wodurch Artefakte entstehen. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 8-5 dargestellt. Das für die WLI-Messung verwendete Licht interagiert mit den diffraktiven Strukturen eines DOE, wodurch Messartefakte auftreten, welche als Interferenzmuster erkennbar sind (siehe Abb. 8-5).



**Abb. 8-5: WLI-Aufnahme einer diffraktiven Struktur, bei der ungewollte Interferenzmuster durch die Wechselwirkung zwischen Licht und Mikrostrukturen entstehen [183]**

Die Vermessung wird zusätzlich erschwert, wenn sich die Mikrostrukturen auf einer 3D-Oberfläche befinden. Viele Messsysteme müssen in nahen Kontakt mit der Oberfläche gebracht werden, um diese zu vermessen. Bei 3D-Oberflächen kann es dadurch zu Kollisionen zwischen Messkopf und Bauteil kommen. Dies schränkt insbesondere den Einsatz der AFM-Messtechnik ein. Zur Vermessung der Gesamtgeometrie von Linsen ist die taktile Messtechnik nach wie vor eine der gebräuchlichsten Technologien. Sie ermöglicht auch die präzise Vermessung über größere Flächen. Bei Freiformflächen ist diese Messtechnik allerdings äußerst zeitaufwendig, da sehr viele Messungen durchgeführt werden müssen. Außerdem kann die Vermessung von Mikrostrukturen nur begrenzt mit der taktilen Messtechnik durchgeführt werden. Dies liegt daran, dass die verwendeten Messnadeln einen Spritzenradius aufweisen und somit Mikrostrukturen nur bis zu einer begrenzten Größe darstellen können. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 8-6 dargestellt. Dabei wurden diffraktive Strukturen auf einem spritzgeprägten DOE vermessen. Die Vermessung der Strukturen mittels LAM liefert eine exakte Darstellung der Mikrostrukturen entsprechend dem optischen Design (Abb. 8-6 a). Die Vermessung der gleichen Strukturen mit einem taktilen Messsystem hingegen zeigt deutlich Abweichungen von der Soll-Struktur. Insbesondere an den Stufen hat das taktile Messsystem Probleme und liefert falsche Messergebnisse. Zusätzlich ist die taktile Messung von Mikrostrukturen nicht zerstörungsfrei, wodurch das mehrmalige Messen an derselben Stelle zu unterschiedlichen Ergebnissen führt.





**Abb. 8-6: a) Diffraktive Struktur auf Kunststoffoptik, gemessen mittels LAM, b) gleiche Struktur vermessen mittels taktiler Messtechnik**

Als eine geeignete Messmethode zur Charakterisierung von Mikrostrukturen hat sich das LAM-Verfahren erwiesen. Es ermöglicht eine präzise Vermessung von Mikrostrukturen auch über eine längere Messstrecke von einigen Zentimetern. Allerdings erhöht sich die Messzeit extrem, wenn keine 2D-Profile, sondern 3D-Flächen vermessen werden sollen. Dies ist allerdings ein grundsätzliches Problem, welches auf dem Gebiet der Messtechnik noch gelöst werden muss. Aktuell versuchen Forscher, Messsysteme zu entwickeln, die eine hochgenaue Vermessung von Mikrostrukturen über eine große Messfläche zulassen, allerdings befinden diese noch in einem Forschungsstadium [184].

Allgemein kann gesagt werden, dass es für die Charakterisierung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken sehr wichtig ist, die Eigenschaften des verwendeten Messprinzips exakt zu kennen und somit auch die Einschränkungen und Limitationen. Nur so können die Messergebnisse richtig interpretiert und mögliche Messartefakte erkannt werden.

## **9 Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen dieser Arbeit konnten drei Prozessketten zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken erfolgreich erarbeitet werden. Diese decken beispielhaft einen großen Teil der möglichen Prozessketten für solche Bauteile ab.

In der ersten Prozesskette wurde ein MLA hergestellt. Hierfür wurde ein Werkzeugeinsatz mittel UP-Fräsen hergestellt und anschließend durch Spritzprägen repliziert. Für die Herstellung des Werkzeugeinsatzes ist insbesondere die Frässtrategie von entscheidender Bedeutung. Diese muss so optimiert werden, dass die Mikrolinsen homogen und formgenau hergestellt werden und dabei die Prozesszeit möglichst gering ist. Als beste Strategie erwies sich hierfür das vertikale Eintauchen des Fräasers ohne zusätzliche Bewegung. Hierdurch kann die beste Oberflächenqualität bei gleichzeitig geringster Bearbeitungszeit erzielt werden. Grundvoraussetzung für diese Strategie ist allerdings die Qualität des Diamantfräasers, da dieser direkt die Form der entstehenden Mikrolinsen widerspiegelt. Des Weiteren ist die Form der Mikrolinsen aufgrund der Frässtrategie auf sphärische Linsen limitiert. Mit dieser Frässtrategie konnte ein Werkzeugeinsatz mit Mikrolinsen hergestellt werden, bei dem die Oberflächenqualität der einzelnen Linse  $R_a < 10$  nm betrug. Um diese Oberflächenqualität zu ermöglichen, muss der Verschleiß der Diamantschneide so gering wie möglich gehalten werden. Die Replikation des MLA konnte erfolgreich mittels Spritzprägen umgesetzt werden. Die größte Herausforderung stellte dabei die Kombination aus integrierten Halterungsstrukturen am Bauteil und der geringen Bauteildicke von 500  $\mu\text{m}$  dar. Insbesondere die geringe Bauteildicke führte zu einem schnellen Erstarren der Schmelze beim Einspritzen, wodurch ein vollständiges Füllen der Kavität erschwert wurde. Nur die exakte Koordination des Einspritzvorgangs mit der Prägebewegung ermöglichte eine vollständige Abformung des MLAs. Die abgeformten Mikrolinsen wiesen dabei eine Oberflächenqualität von  $R_a < 10$  nm auf und die Planarität betrug etwa  $0,07^\circ$ . Die Funktionsfähigkeit der hergestellten MLA konnte in einem hyperspektralen Messsystem gezeigt werden.

Mit der zweiten Prozesskette wurde ein DOE hergestellt. Das DOE besaß dabei zwei gekrümmte Flächen, von denen eine mit diffraktiven Strukturen versehen war. Für die Herstellung des Werkzeugeinsatzes wurde ein gekrümmter Glasmaster mittels LDW hergestellt. Dieser wurde anschließend durch Galvanokopieren abgeformt, wodurch ein stabiler Werkzeugeinsatz hergestellt werden konnte. Die beim LDW-Prozess hergestellten Mikrostrukturen konnten dabei vollständig in den Werkzeugeinsatz übertragen werden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass auch gekrümmte Masterstrukturen mittels Galvanokopieren repliziert werden können. Im Anschluss wurden die DOE durch Spritzprägen repliziert. Die größten Herausforderungen stellten dabei zum einen die werkzeugbedingte Kombination aus vertikalem Einspritzen und Tunnelanguss und zum anderen die vollständige Abformung der diffrak-

tiven Mikrostrukturen dar. Das vertikale Einspritzen erforderte ein hochgenaues Temperaturmanagement in der Plastifiziereinheit, um ein fehlerfreies Füllen zu ermöglichen. Der Einspritzvorgang musste hochgenau mit der Prägebewegung koordiniert werden, damit formtreue DOE hergestellt werden konnten. Für die vollständige Abformung der Mikrostrukturen waren insbesondere die Werkzeugtemperatur und die Prägekraft entscheidend. Hohe Werkzeugtemperaturen, welche deutlich über den vom Hersteller empfohlenen Temperaturen lagen, in Kombination mit hohen Prägekräften erzielten dabei die besten Ergebnisse. In der Prozesskette konnten dabei die diffraktiven Mikrostrukturen, ausgehend von einem Glasmaster, vollständig in abgemusterte DOE überführt werden. Die Funktionsfähigkeit der hergestellten DOE konnte in einem chromatisch konfokalem Messaufbau gezeigt werden.

Mit der dritten Prozesskette konnten mikro- und nanostrukturierte Bauteile mittels Spritzprägen hergestellt werden. Hierbei wurde eine neue Prozesskette etabliert, bei der ein Werkzeugeinsatz direkt mittels Ionenstrahlschreiben strukturiert und anschließend durch Spritzprägen repliziert wurde. Der Werkzeugeinsatz wurde hierfür aus Titan hergestellt. Titan ist ein nicht-magnetisches Material, wodurch eine Direktstrukturierung mittels Ionenstrahlschreiben möglich ist. Des Weiteren bietet es eine hohe Festigkeit, was eine hohe Standzeit im Spritzgussprozess verspricht. Um die Funktionsfähigkeit dieser Prozesskette zu evaluieren, wurden neben einer diffraktiven Struktur auch Auflösungsstrukturen hergestellt. Als größte Herausforderung in der gesamten Prozesskette stellte sich die Limitation der verfügbaren Messtechnik heraus, welche eine ordentliche Charakterisierung des Werkzeugeinsatzes sowie der abgemusterten Bauteile stark einschränkte. Die Strukturen im Sub-Mikrometerbereich konnten nur eingeschränkt und mit starken Messungenauigkeiten dargestellt werden. Anhand der Auflösungsstruktur konnten Strukturen bis zu einer Balkenbreite von 690 nm getrennt dargestellt werden. Beim Einsatz des Titan-Werkzeugeinsatzes im Spritzprägeprozess konnten keine Einschränkungen festgestellt werden. In der Prozesskette konnte gezeigt werden, dass Mikro- und Nanostrukturen von einem Titan-Werkzeugeinsatz in ein Kunststoffbauteil überführt werden können und funktionsfähige DOE hergestellt werden können. Dieser Ansatz bietet viel Potential für die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken in der Massenproduktion, bei denen die Standzeit der Werkzeugeinsätze heute noch ein Problem darstellt.

Betrachtet man die drei vorgestellten Prozessketten, so kann daraus die Schlussfolgerung gezogen werden, dass durch die Kombination aus einem geeigneten Strukturierungsverfahren mit einer passenden Integrationstechnik mikro- und nanooptische Komponenten aus Kunststoff mittels Spritzprägen hergestellt werden können. Allgemein sind dabei ein hohes Prozessverständnis sowie eine hohe Prozesskontrolle nötig, um hochwertige optische Komponenten zu bekommen. Insbesondere die Auswahl des richtigen Strukturierungsverfahrens spielt eine entscheidende Rolle bei der Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken, da diese die gesamte Prozesskette definiert. Daher wurde in dieser Arbeit neben der Vorstellung der drei Prozessketten zusätzlich eine Auswahlhilfe für die Herstellungsverfahren in Form eines Entscheidungsbaums erarbeitet, welche den Auswahlprozess vereinfachen soll.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass für die Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffoptiken die Herausforderungen in drei Hauptkomponenten unterteilt werden können. Zum Ersten ist die Auswahl des richtigen Herstellungsverfahrens für den Werkzeugeinsatz entscheidend für die gesamte Prozesskette. Zusätzlich muss die gewählte Technologie auch gut beherrscht werden, was viel spezifisches Know-how erfordert. Zum Zweiten stellt die Replikation von Mikrostrukturen mittels Spritzgießen eine Herausforderung dar. Dabei empfiehlt es sich, die Prozessvariante des Spritzprägens zu verwenden, welches deutlich mehr Möglichkeiten im Prozess ermöglicht und dadurch eine bessere Abformung dieser Strukturen aufweist. Eine hochgenaue Prozesskontrolle ist dabei Voraussetzung, da die Prozessfenster, in denen funktionsfähige Bauteile hergestellt werden können, oft sehr klein sind. Zum Dritten stellt die Messtechnik eine Herausforderung dar, da die mikrostrukturierten Bauteile oft nur eingeschränkt vermessen werden können. Nur durch die Kombination unterschiedlicher Messverfahren können aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Ein gutes Verständnis für das Messprinzip ist dabei wichtig, um die Messergebnisse richtig interpretieren zu können und insbesondere Messfehler und Artefakte zu identifizieren.

Betrachtet man die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse, so können an den folgenden Punkten weitere Untersuchungen angeschlossen werden:

Bei der Herstellung der MLAs:

- Möglichkeiten zur Reduktion des Verschleißes der Diamantschneide beim UP-Fräsen des Werkzeugeinsatzes
- Entwicklung von Frässtrategien für Mikrolinsenarrays mit asphärischen oder Freiform-Mikrolinsen
- Ausführliche Charakterisierung des MLAs im hyperspektralen Messsystem

Bei der Herstellung der DOE:

- Verbesserung der Oberflächenqualität auf den diffraktiven Mikrostrukturen bei der Herstellung des Glasmasters mittels LDW
- Optimierung der Formgenauigkeit der abgeformten DOE zur Verbesserung der optischen Effizienz
- Verbesserung der Ausrichtung der beiden gegenüberliegenden Seiten des DOE durch optimierte Integration der beiden Werkzeugeinsätze

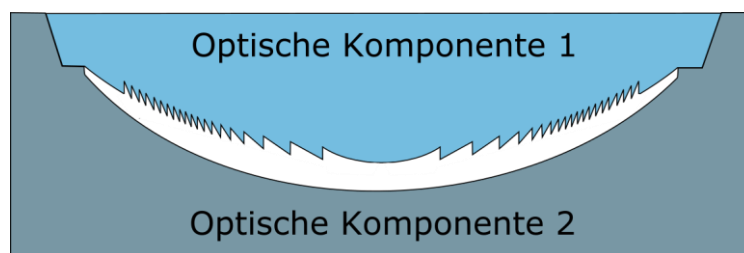
Bei der Herstellung nanostrukturierter Bauteile mit Titanwerkzeugeinsatz

- Neue Charakterisierungsmöglichkeiten für die Vermessung der Nanostrukturen
- Untersuchung der Standfestigkeit von mikro- und nanostrukturierten Titanwerkzeugeinsätzen im Spritzguss
- Herstellung und Charakterisierung von optischen Komponenten, die durch ein Optikdesign ausgelegt wurden

Zur Abformung von Mikrostrukturen mittels Spritzguss

- Untersuchung weiterer Prozessvarianten des Spritzgusses wie beispielsweise variothermes Spritzgießen/Spritzprägen oder Spritzgießen unter Vakuumatmosphäre

Neben der Optimierung der einzelnen Prozessschritte und Prozessketten gilt es in weiteren Untersuchungen auch, die mikrostrukturierten optischen Komponenten weiterzuentwickeln, um diese noch konkurrenzfähiger zu traditionellen Glasoptiken zu machen. Ansätze hierfür sind zum einen die Herstellung von zweiseitig strukturierten Kunststoffoptiken. Dabei könnten beispielsweise Mikrolinsen mit Beugungsgitter in einem einzigen Bauteil vereint werden, was Vorteile für das Optikdesign sowie Platz- und Gewichtsreduktion erzielen würde. Zum anderen ist auch die Kombination mehrerer (mikrostrukturierter) Kunststoffoptiken ein Konzept, das neue Möglichkeiten bietet. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die empfindlichen Strukturen geschützt werden und zum anderen neue Möglichkeiten für das Optikdesign entstehen, da mehr beugende und brechende Flächen entstehen. Hierdurch können kompakte, komplexe mikrooptische Systeme erzeugt werden. Ein Beispiel hierfür sind „vergrabene“ DOE, bei denen zwei spritzgeprägte optische Komponenten zu einem Bauteil vereint werden. Dies ist schematisch in Abb. 9-1 dargestellt. Neben der hochpräzisen Herstellung der beiden optischen Komponenten ist dabei die hochgenaue Positionierung der beiden Komponenten die größte Herausforderung.



**Abb. 9-1:** Schematische Darstellung eines "vergrabenen" DOE, bestehend aus zwei optischen Komponenten



## 10 Literaturverzeichnis

1. SPECTARIS *Branchenreport Photonik 2015*; 2015;
2. Bundesministerium für Bildung und Forschung *Agenda Photonik 2020*; 2010;
3. SPECTARIS *Photonik Spotlight - Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie*; 2016;
4. Cluster Optik Berlin und Brandenburg *Optische Technologien und Mikrosystemtechnik in Berlin und Brandenburg*; 2014;
5. Brecher, C.; Lindemann, D.; Merz, M.; Wenzel, C.; Preuß, W. Freeform Machining of Molds for Replication of Plastic Optics. In *Fabrication of Complex Optical Components*; Brinksmeier, E., Riemer, O., Gläbe, R.M., Eds.; Lecture Notes in Production Engineering; Springer Berlin Heidelberg, 2013; pp. 41–52 ISBN 978-3-642-33000-1.
6. Fang, F.Z.; Zhang, X.D.; Weckenmann, A.; Zhang, G.X.; Evans, C. Manufacturing and measurement of freeform optics. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2013**, *62*, 823–846.
7. Beich, W.S.; Turner, N. Polymer optics: a manufacturer's perspective on the factors that contribute to successful programs.; Krevor, D.H., Beich, W.S., Eds.; 2010; p. 778805.
8. Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Gläbe, R. *Fabrication of Complex Optical Components*; 2013;
9. Sierra, C.; Vázquez, A.J. High solar energy concentration with a Fresnel lens. *J. Mater. Sci.* **2005**, *40*, 1339–1343.
10. Yun, Z.; Lam, Y.L.; Zhou, Y.; Yuan, X.; Zhao, L.; Liu, J. Eyepiece design with refractive-diffractive hybrid elements. In *Proceedings of the Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering*; International Society for Optics and Photonics, 2000; Vol. 4093, pp. 474–481.
11. Cox, J.A.; Fritz, T.A.; Werner, T.R. Application and demonstration of diffractive optics for head-mounted displays. In *Proceedings of the Helmet- and Head-Mounted Displays and Symbology Design Requirements*; International Society for Optics and Photonics, 1994; Vol. 2218, pp. 32–41.
12. Kress, B.; Starner, T. A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics. In *Proceedings of the Photonic Applications for Aerospace, Commercial, and Harsh Environments IV*; International Society for Optics and Photonics, 2013; Vol. 8720, p. 87200A.
13. Early, J.T.; Hyde, R.; Baron, R.L. Twenty-meter space telescope based on diffractive Fresnel lens. In *Proceedings of the UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts*; International Society for Optics and Photonics, 2004; Vol. 5166, pp. 148–157.
14. Nakai, T.; Ogawa, H. Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses.; OSA, 2002; p. DMA2.
15. Brunner, R. Transferring diffractive optics from research to commercial applications: Part I – progress in the patent landscape. *Adv. Opt. Technol.* **2013**, *2*, 351–359.
16. Kim, D.S.; Lee, H.S.; Lee, B.-K.; Yang, S.S.; Kwon, T.H.; Lee, S.S. Replications and analysis of microlens array fabricated by a modified LIGA process. *Polym. Eng. Sci.* **2006**, *46*, 416–425.
17. Levoy, M.; Hanrahan, P. Light field rendering. In *Proceedings of the Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '96*; ACM Press: Not Known, 1996; pp. 31–42.

18. Levoy, M.; Zhang, Z.; Mcdowall, I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays. *J. Microsc.* **2009**, *235*, 144–162.
19. Shogenji, R.; Kitamura, Y.; Yamada, K.; Miyatake, S.; Tanida, J. Bimodal fingerprint capturing system based on compound-eye imaging module. *Appl. Opt.* **2004**, *43*, 1355–1359.
20. Dombrowski, M.; Catanzaro, B. Spatially corrected full-cubed hyperspectral imager 2007.
21. Shogenji, R.; Kitamura, Y.; Yamada, K.; Miyatake, S.; Tanida, J. Multispectral imaging using compact compound optics. *Opt. Express* **2004**, *12*, 1643.
22. Hsieh, T.-C. MOS or CMOS sensor with micro-lens array 2007.
23. Scheiding, S.; Yi, A.Y.; Gebhardt, A.; Loose, R.; Li, L.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A. Diamond milling or turning for the fabrication of micro lens arrays: comparing different diamond machining technologies.; Schoenfeld, W.V., Wang, J.J., Loncar, M., Suleski, T.J., Eds.; 2011; p. 79270N.
24. Yu, W.; Yuan, X. Fabrication of refractive microlens in hybrid SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> sol-gel glass by electron beam lithography. *Opt. Express* **2003**, *11*, 899–903.
25. Choi, H.-K.; Ahsan, Md.S.; Yoo, D.; Sohn, I.-B.; Noh, Y.-C.; Kim, J.-T.; Jung, D.; Kim, J.-H.; Kang, H.-M. Formation of cylindrical micro-lens array on fused silica glass surface using CO<sub>2</sub> laser assisted reshaping technique. *Opt. Laser Technol.* **2015**, *75*, 63–70.
26. Takino, H.; Hosaka, T. Shaping of steel mold surface of lens array by electrical discharge machining with single rod electrode. *Appl. Opt.* **2014**, *53*, 8002.
27. Gläbe, R.; Riemer, O. Diamond machining of micro-optical components and structures.; Thienpont, H., Van Daele, P., Mohr, J., Zappe, H., Eds.; 2010; p. 771602.
28. Uhlmann, E.; Mullany, B.; Biermann, D.; Rajurkar, K.P.; Hausotte, T.; Brinksmeier, E. Process chains for high-precision components with micro-scale features. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2016**, *65*, 549–572.
29. Li, L. Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process. *Opt. Eng.* **2006**, *45*, 113401.
30. Zhu, L.; Li, Z.; Fang, F.; Huang, S.; Zhang, X. Review on fast tool servo machining of optical freeform surfaces. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2017**, 1–22.
31. Weck, M.; Fischer, S. Manufacturing of microstructures using ultraprecision machine tools. In Proceedings of the Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS; International Society for Optics and Photonics, 1999; Vol. 3680, pp. 450–456.
32. Roeder, M.; Drexler, M.; Rothmel, T.; Meissner, T.; Guenther, T.; Zimmermann, A. Injection Compression Molded Microlens Arrays for Hyperspectral Imaging. *Micromachines* **2018**, *9*, 355.
33. Zhang, S.J.; To, S.; Zhu, Z.W.; Zhang, G.Q. A review of fly cutting applied to surface generation in ultra-precision machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2016**, *103*, 13–27.
34. Klocke, F.; Dambon, O.; Bulla, B.; Heselhaus, M. Direct diamond turning of steel molds for optical replication.; 2009; Vol. 7282, pp. 728202-728202–7.
35. Zhang, J.; Cui, T.; Ge, C.; Sui, Y.; Yang, H. Review of micro/nano machining by utilizing elliptical vibration cutting. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2016**, *106*, 109–126.
36. Uhlmann, E.; Piltz, S.; Doll, U. Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining—Recent development. *J. Mater. Process. Technol.* **2005**, *167*, 488–493.
37. Liu, K.; Lauwers, B.; Reynaerts, D. Process capabilities of Micro-EDM and its applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2010**, *47*, 11–19.
38. De Silva, A.K.M.; Altena, H.S.J.; McGeough, J.A. Precision ECM by process characteristic modelling. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* **2000**, *49*, 151–155.



39. Ukar, E.; Lamikiz, A.; López de Lacalle, L.N.; del Pozo, D.; Arana, J.L. Laser polishing of tool steel with CO<sub>2</sub> laser and high-power diode laser. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2010**, *50*, 115–125.
40. Mappes, T.; Worgull, M.; Hecke, M.; Mohr, J. Submicron polymer structures with X-ray lithography and hot embossing. *Microsyst. Technol.* **2008**, *14*, 1721–1725.
41. Pruss, C.; Reichelt, S.; Tiziani, H.J.; Korolkov, V.P. Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry.; Chugui, Y.V., Bagayev, S.N., Weckenmann, A., Osanna, P.H., Eds.; 2002; pp. 873–884.
42. Roeder, M.; Thiele, S.; Hera, D.; Pruss, C.; Guenther, T.; Osten, W.; Zimmermann, A. Fabrication of curved diffractive optical elements by means of laser direct writing, electroplating, and injection compression molding. *Submitt. J. Manuf. Process.* **2019**.
43. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*; The International Academy for Production Engineering, Laperrière, L., Reinhart, G., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2014; ISBN 978-3-642-20616-0.
44. Menard, L.D.; Ramsey, J.M. Fabrication of Sub-5 nm Nanochannels in Insulating Substrates Using Focused Ion Beam Milling. *Nano Lett.* **2011**, *11*, 512–517.
45. Weiser, M. Ion beam figuring for lithography optics. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* **2009**, *267*, 1390–1393.
46. Traub, M.C.; Longsine, W.; Truskett, V.N. Advances in Nanoimprint Lithography. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* **2016**, *7*, 583–604.
47. Guo, L.J. Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements. *Adv. Mater.* **2007**, *19*, 495–513.
48. Namba, Y.; Shimomura, T.; Fushiki, A.; Beaucamp, A.; Inasaki, I.; Kunieda, H.; Ogasa-ka, Y.; Yamashita, K. Ultra-precision polishing of electroless nickel molding dies for shorter wavelength applications. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2008**, *57*, 337–340.
49. Taniguchi, N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **1983**, *32*, 573–582.
50. Yuan, Z.J.; Zhou, M.; Dong, S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *J. Mater. Process. Technol.* **1996**, *62*, 327–330.
51. Riemer, O. A review on machining of micro-structured optical molds. In Proceedings of the Key Engineering Materials; Trans Tech Publ, 2008; Vol. 364, pp. 13–18.
52. Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y. Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2006**, *55*, 745–768.
53. AMETEK Precitech Manual Precitech Freeform 700a 2007.
54. Cheung, C.F.; Lee, W.B. Study of Factors Affecting the Surface Quality in Ultra-Precision Diamond Turning. *Mater. Manuf. Process.* **2000**, *15*, 481–502.
55. Zhang, S.J.; To, S.; Zhang, G.Q.; Zhu, Z.W. A review of machine-tool vibration and its influence upon surface generation in ultra-precision machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2015**, *91*, 34–42.
56. Wang, H.; To, S.; Chan, C.Y.; Cheung, C.F.; Lee, W.B. A theoretical and experimental investigation of the tool-tip vibration and its influence upon surface generation in single-point diamond turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2010**, *50*, 241–252.
57. Furukawa, Y.; Moronuki, N. Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **1988**, *37*, 113–116.
58. Moronuki, N.; Liang, Y.; Furukawa, Y. Experiments on the effect of material properties on microcutting processes. *Precis. Eng.* **1994**, *16*, 124–131.
59. Kong, M.C.; Lee, W.B.; Cheung, C.F.; To, S. A study of materials swelling and recovery in single-point diamond turning of ductile materials. *J. Mater. Process. Technol.* **2006**, *180*, 210–215.

60. To, S.; Cheung, C.F.; Lee, W.B. Influence of material swelling on surface roughness in diamond turning of single crystals. *Mater. Sci. Technol.* **2001**, *17*, 102–108.
61. Zhang, S.J.; To, S.; Cheung, C.F.; Wang, H.T. Dynamic characteristics of an aerostatic bearing spindle and its influence on surface topography in ultra-precision diamond turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2012**, *62*, 1–12.
62. Brinksmeier, E.; Preuss, W. Micro-machining. *Phil Trans R Soc A* **2012**, *370*, 3973–3992.
63. Roeder, M.; Guenther, T.; Zimmermann, A. Review on fabrication technologies for optical mold inserts. *Submitt. Micromachines* **2019**.
64. Riedl, M.J. Diamond-turned diffractive optical elements for the infrared: suggestion for specification standardization and manufacturing remarks.; 1995; Vol. 2540, pp. 257–269.
65. Blough, C.G.; Rossi, M.; Mack, S.K.; Michaels, R.L. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements. *Appl. Opt.* **1997**, *36*, 4648–4654.
66. Tohme, Y.E.; Lowe, J.A. Machining of freeform optical surfaces by slow slide servo method. In Proceedings of the Proc. of the ASPE Annual Meeting; 2004.
67. Yi, A.Y.; Raasch, T.W. Design and fabrication of a freeform phase plate for high-order ocular aberration correction. *Appl. Opt.* **2005**, *44*, 6869.
68. Chen, C.-C.; Cheng, Y.-C.; Hsu, W.-Y.; Chou, H.-Y.; Wang, P.-J.; Tsai, D.P. Slow tool servo diamond turning of optical freeform surface for astigmatic contact lens.; 2011; Vol. 8126, pp. 812617-812617–9.
69. Yin, Z.Q.; Dai, Y.F.; Li, S.Y.; Guan, C.L.; Tie, G.P. Fabrication of off-axis aspheric surfaces using a slow tool servo. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2011**, *51*, 404–410.
70. Li, L.; Yi, A.Y. Design and fabrication of a freeform microlens array for uniform beam shaping. *Microsyst. Technol.* **2011**, *17*, 1713–1720.
71. Li, L.; Allen, Y.Y. Design and fabrication of a freeform prism array for 3D microscopy. *JOSA A* **2010**, *27*, 2613–2620.
72. Zhang, X.; Fang, F.; Yu, L.; Jiang, L.; Guo, Y. Slow slide servo turning of compound eye lens. *Opt. Eng.* **2013**, *52*, 023401–023401.
73. Elfizy, A.T.; Bone, G.M.; Elbestawi, M.A. Design and control of a dual-stage feed drive. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2005**, *45*, 153–165.
74. Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Gläbe, R.; Lünemann, B.; Kopylow, C. v.; Dankwart, C.; Meier, A. Submicron functional surfaces generated by diamond machining. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2010**, *59*, 535–538.
75. Holme, N.C.R.; Berg, T.W.; Dinesen, P.G. Diamond micro-milling for array mastering.; Forbes, A., Lizotte, T.E., Eds.; 2008; pp. 70620J-70620J–8.
76. Huo, D.; Cheng, K.; Wardle, F. Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine—UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2010**, *47*, 867–877.
77. Roeder, M.; Drexler, M.; Guenther, T.; Zimmermann, A. Evaluation of ultra-precision milling strategies for micro lens array mould inserts for the replication by injection-compression moulding.; Venice, 2018.
78. Brecher, C.; Weck, M.; Winterschladen, M.; Lange, S.; Wetter, O.; Pfeifer, T.; Dörner, D.; Brinksmeier, E.; Autschbach, L. Manufacturing of free-form surfaces in optical quality using an integrated NURBS data interface. In Proceedings of the Proceedings of the ASPE Winter Topical Meeting; 2004.
79. Takeuchi, Y.; Maeda, S.; Kawai, T.; Sawada, K. Manufacture of Multiple-focus Micro Fresnel Lenses by Means of Nonrotational Diamond Grooving. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2002**, *51*, 343–346.
80. Zhao, Q.; Guo, B.; Yang, H.; Zhang, X. A mechanistic cutting force model for diamond fly-cutting of microstructured surface.; 2009; Vol. 7282, pp. 728204-728204–6.

81. Fang, F.Z.; Liu, Y.C. On minimum exit-burr in micro cutting. *J. Micromechanics Micro-engineering* **2004**, *14*, 984.
82. Li, Z.J.; Fang, F.Z.; Gong, H.; Zhang, X.D. Review of diamond-cutting ferrous metals. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2013**, *68*, 1717–1731.
83. Moriwaki, T.; Shamoto, E. Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **1991**, *40*, 559–562.
84. Moriwaki, T.; Shamoto, E. Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **1995**, *44*, 31–34.
85. Suzuki, N. *Ultraprecision sculpturing of hardened steel by applying elliptical vibration cutting*; 2013;
86. Kim, G.D.; Loh, B.G. Direct machining of micro patterns on nickel alloy and mold steel by vibration assisted cutting. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **2011**, *12*, 583–588.
87. Fujisaki, K.; Yokota, H.; Furushiro, N.; Yamagata, Y.; Taniguchi, T.; Himeno, R.; Makinouchi, A.; Higuchi, T. Development of ultra-fine-grain binderless cBN tool for precision cutting of ferrous materials. *J. Mater. Process. Technol.* **2009**, *209*, 5646–5652.
88. Uhlmann, E.; Oberschmidt, D.; Polte, J.; Huth-Herms Effect of cooling lubricant on surface roughness for turning stainless steel with binderless-cBN.; Nottingham, 2016.
89. Evans, C.; Bryan, J.B. Cryogenic Diamond Turning of Stainless Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **1991**, *40*, 571–875.
90. Casstevens, J.M. Method for machining steel with diamond tools 1986.
91. Brinksmeier, E.; Gläbe, R. Advances in Precision Machining of Steel. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2001**, *50*, 385–388.
92. Rajurkar, K.P.; Sundaram, M.M.; Malshe, A.P. Review of Electrochemical and Electro-discharge Machining. *Procedia CIRP* **2013**, *6*, 13–26.
93. Takino, H.; Hosaka, T. Shaping of steel mold surface of lens array by electrical discharge machining with spherical ball electrode. *Appl. Opt.* **2016**, *55*, 4967.
94. Liao, Y.S.; Huang, J.T.; Chen, Y.H. A study to achieve a fine surface finish in Wire-EDM. *J. Mater. Process. Technol.* **2004**, *149*, 165–171.
95. Rajurkar, K.P.; Zhu, D.; McGeough, J.A.; Kozak, J.; De Silva, A. New Developments in Electro-Chemical Machining. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **1999**, *48*, 567–579.
96. Qin, Y. *Micromanufacturing Engineering and Technology*; William Andrew, 2015; ISBN 978-0-323-31267-7.
97. Kurita, T.; Hattori, M. A study of EDM and ECM/ECM-lapping complex machining technology. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2006**, *46*, 1804–1810.
98. Selada, A.; Manaia, A.; Vieira, M.T.; Pouzada, A.S. Effect of LBM and large-area EBM finishing on micro-injection moulding surfaces. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2011**, *52*, 171–182.
99. Kaldos, A.; Pieper, H.J.; Wolf, E.; Krause, M. Laser machining in die making—a modern rapid tooling process. *J. Mater. Process. Technol.* **2004**, *155–156*, 1815–1820.
100. Fleischer, J.; Halvadjiysky, G.; Haupt, S. Process parameter analysis in ablating micro-mold manufacturing. *Microsyst. Technol.* **2008**, *14*, 1367–1372.
101. Gower, M.C. Industrial applications of laser micromachining. *Opt. Express* **2000**, *7*, 56–67.
102. Masuzawa, T. State of the Art of Micromachining. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2000**, *49*, 473–488.
103. Despa, M.S.; Kelly, K.W.; Collier, J.R. Injection molding of polymeric LIGA HARMs. *Microsyst. Technol.* **1999**, *6*, 60–66.
104. Ruprecht, R.; Bacher, W.; Hausselt, J.H.; Piotter, V. Injection molding of LIGA and LIGA-similar microstructures using filled and unfilled thermoplastics. In Proceedings of

- the Micromachining and Microfabrication; International Society for Optics and Photonics, 1995; pp. 146–157.
105. Malek, C.K.; Saile, V. Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and -systems: a review. *Microelectron. J.* **2004**, *35*, 131–143.
106. Becker, E.W.; Ehrfeld, W.; Hagmann, P.; Maner, A.; Münchmeyer, D. Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process). *Microelectron. Eng.* **1986**, *4*, 35–56.
107. Suleski, T.J.; O’Shea, D.C. Fidelity of PostScript-generated masks for diffractive optics fabrication. *Appl. Opt.* **1995**, *34*, 627–635.
108. Suleski, T.J.; O’Shea, D.C. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers. *Appl. Opt.* **1995**, *34*, 7507–7517.
109. Däschner, W.; Long, P.; Stein, R.; Wu, C.; Lee, S.H. Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass. *Appl. Opt.* **1997**, *36*, 4675–4680.
110. Ogura, Y.; Shirai, N.; Tanida, J.; Ichioka, Y. Wavelength-multiplexing diffractive phase elements: design, fabrication, and performance evaluation. *JOSA A* **2001**, *18*, 1082–1092.
111. Lee, C.C.; Chang, Y.C.; Wang, C.M.; Chang, J.Y.; Chi, G.C. Silicon-based transmissive diffractive optical element. *Opt. Lett.* **2003**, *28*, 1260–1262.
112. Brenner, K.-H.; Frank, M.; Kufner, M.; Kufner, S.; Moisel, J.; Mueller, A.; Sinzinger, S.; Testorf, M.E.; Goettert, J.; Mohr, J. Micro-optical setup with microlenses and micro-prisms based on refractive optics.; International Society for Optics and Photonics, 1993; Vol. 1806, pp. 228–234.
113. Oh, D.-Y.; Gil, K.; Chang, S.S.; Jung, D.K.; Park, N.Y.; Lee, S.S. A tetrahedral three-facet micro mirror with the inclined deep X-ray process. *Sens. Actuators Phys.* **2001**, *93*, 157–161.
114. Rogner, A.; Ehrfeld, W. Fabrication of light-guiding devices and fiber-coupling structures by the LIGA process.; International Society for Optics and Photonics, 1991; Vol. 1506, pp. 80–92.
115. Herzig, H.P. *Micro-Optics: Elements, Systems And Applications*; CRC Press, 1997; ISBN 978-0-7484-0481-0.
116. Roeder, M.; Hera, D.; Thiele, S.; Pruss, C.; Günther, T.; Osten, W.; Zimmermann, A. 3D Laser direct writing based mold fabrication for the manufacturing of diffractive-refractive elements.; Aachen, 2017.
117. Bowen, J.P.; Michaels, R.L.; Blough, C.G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation. *Appl. Opt.* **1997**, *36*, 8970–8975.
118. Gale, M.T.; Rossi, M.; Pedersen, J.; Schuetz, H. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists. *Opt. Eng.* **1994**, *33*, 3556–3566.
119. Häfner, M.; Reichle, R.; Pruss, C.; Osten, W. Laser direct writing of high resolution structures on curved substrates: evaluation of the writing precision. In *Fringe 2009*; Springer, 2009; pp. 1–4.
120. Korolkov, V.P.; Nasyrov, R.K.; Shimansky, R.V. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements. *Appl. Opt.* **2006**, *45*, 53–62.
121. Aoyama, S.; Horie, N.; Yamashita, T. Micro-Fresnel lens fabricated by electron-beam lithography.; 1990; Vol. 1211, pp. 175–183.

122. Däschner, W.; Larsson, M.; Lee, S.H. Fabrication of monolithic diffractive optical elements by the use of e-beam direct write on an analog resist and a single chemically assisted ion-beam-etching step. *Appl. Opt.* **1995**, *34*, 2534–2539.
123. Verheijen, M.J. E-beam Lithography for Digital Holograms. *J. Mod. Opt.* **1993**, *40*, 711–721.
124. Vieu, C.; Carcenac, F.; Pépin, A.; Chen, Y.; Mejias, M.; Lebib, A.; Manin-Ferlazzo, L.; Couraud, L.; Launois, H. Electron beam lithography: resolution limits and applications. *Appl. Surf. Sci.* **2000**, *164*, 111–117.
125. Watt, F.; Bettiol, A.A.; Van Kan, J.A.; Teo, E.J.; Breese, M.B.H. Ion beam lithography and nanofabrication: a review. *Int. J. Nanosci.* **2005**, *04*, 269–286.
126. Nikawa, K. Applications of focused ion beam technique to failure analysis of very large scale integrations: A review. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.* **1991**, *9*, 2566–2577.
127. Tseng, A.A. Recent Developments in Nanofabrication Using Focused Ion Beams. *Small* **2005**, *1*, 924–939.
128. Fu, Y. Investigation of microlens mold fabricated by focused ion beam technology. *Microelectron. Eng.* **2001**, *56*, 333–338.
129. Nellen, P.M.; Callegari, V.; Brönnimann, R. FIB-milling of photonic structures and sputtering simulation. *Microelectron. Eng.* **2006**, *83*, 1805–1808.
130. Lan, H.; Liu, H. UV-Nanoimprint Lithography: Structure, Materials and Fabrication of Flexible Molds. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **2013**, *13*, 3145–3172.
131. Yao, Y.; Liu, H.; Wang, Y.; Li, Y.; Song, B.; Bratkovsk, A.; Wang, S.-Y.; Wu, W. Nanoimprint lithography: an enabling technology for nanophotonics. *Appl. Phys. A* **2015**, *121*, 327–333.
132. Zalkovskij, M.; Thamdrup, L.H.; Smistrup, K.; Andén, T.; Johansson, A.C.; Mikkelsen, N.J.; Madsen, M.H.; Garnæs, J.; Kristiansen, T.T.; Diemer, M.; et al. Smart plastic functionalization by nanoimprint and injection molding.; 2015; Vol. 9423, pp. 94230T-94230T-6.
133. Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Gessenharter, A. Finishing of structured surfaces by abrasive polishing. *Precis. Eng.* **2006**, *30*, 325–336.
134. Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Gessenharter, A.; Autschbach, L. Polishing of Structured Molds. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2004**, *53*, 247–250.
135. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*; The International Academy for Production Engineering, Laperrière, L., Reinhart, G., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2014; ISBN 978-3-642-20616-0.
136. Willenborg, E.; Ross, I.; Kumstel, J.; Flemmer, J. Werkzeugmaschine für das Laserpolieren. *Wt Werkstattstech. Online* **2013**, *103*(6), 5.
137. Fähnle, O.W.; Brug, H. van; Frankena, H.J. Fluid jet polishing of optical surfaces. *Appl. Opt.* **1998**, *37*, 6771–6773.
138. Johannaber, F.; Michaeli, W. *Handbuch Spritzgießen*; 2. Aufl.; Hanser: München, 2004; ISBN 978-3-446-22966-2.
139. Hopmann, C.; Michaeli, W. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*; 7., aktualisierte Auflage.; Hanser: München, 2015; ISBN 978-3-446-44628-1.
140. Michaeli, W.; Heßner, S.; Klaiber, F.; Forster, J. Geometrical Accuracy and Optical Performance of Injection Moulded and Injection-compression Moulded Plastic Parts. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **2007**, *56*, 545–548.
141. Wu, C.-H.; Chen, W.-S. Injection molding and injection compression molding of three-beam grating of DVD pickup lens. *Sens. Actuators Phys.* **2006**, *125*, 367–375.
142. Schaub, M.; Schwiegerling, J.; Fest, E.; Shepard, R.H.; Symmons, A. *Molded Optics: Design and Manufacture*; CRC Press, 2016; ISBN 978-1-4398-3258-5.

143. Masato, D.; Sorgato, M.; Lucchetta, G. Characterization of the micro injection-compression molding process for the replication of high aspect ratio micro-structured surfaces. *Microsyst. Technol.* **2016**, 1–10.
144. Moon, S.; Lee, N.; Kang, S. Fabrication of a microlens array using micro-compression molding with an electroformed mold insert. *J. Micromechanics Microengineering* **2003**, *13*, 98–103.
145. Bäumer, S. *Handbook of Plastic Optics*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011; ISBN 978-3-527-63545-0.
146. Transmission Curves of Optics Materials Available online: <https://www.gsoptics.com/transmission-curves/> (accessed on Aug 20, 2018).
147. Tanida, J.; Shogenji, R.; Kitamura, Y.; Yamada, K.; Miyamoto, M.; Miyatake, S. Color imaging with an integrated compound imaging system. *Opt. Express* **2003**, *11*, 2109–2117.
148. Duparré, J.W.; Wippermann, F.C. Micro-optical artificial compound eyes. *Bioinspir. Biomim.* **2006**, *1*, R1–R16.
149. Ikawa, N.; Donaldson, R.R.; Komanduri, R.; König, W.; Aachen, T.H.; McKeown, P.A.; Moriwaki, T.; Stowers, I.F. Ultraprecision Metal Cutting — The Past, the Present and the Future. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **1991**, *40*, 587–594.
150. Minami, K. Optical Plastics. *Handb. Plast. Opt.* **2010**, 123–160.
151. Zeon Cooperation Zeonex 330R Injection Moulding Guide.
152. Zeon Cooperation Zeonex COP 330R Product Specification 2017.
153. Walther, T. Production of Optical Components Using Plastic Injection Molding Technology. In *Handbook of Plastic Optics*; 2010; pp. 197–217.
154. Beaumont, J.P. *Auslegung von Anguss und Angusskanal: Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen*; Hanser: München, 2012; ISBN 978-3-446-42759-4.
155. Borst, N.; Wadle, S.; Stock, K.; Roeder, M.; Held-Föhn, E.; Heiß, A.; Götz, U.; von Stetten, F. Innovative Diagnostikplattform zur Zuordnung von Krankenhauskeimen und deren Antibiotikaresistenzen.; 2017.
156. Borst, N.; Specht, M.; Schulz, M.; Paust, N.; Li, J.; Wadle, S.; Götz, U.; Held-Föhn, E.; Heiß, A.; Hausladen, F.; et al. Integriertes System zur simultanen Detektion von Krankenhauskeimen und deren Antibiotikaresistenzen auf Einzelzellebene.; München, 2017.
157. Bauer, T.; Marschall, D. Tooling for injection molded optics. In *Handbook of Plastic Optics*; 2005; pp. 35–63.
158. Yong, J.; Chen, F.; Yang, Q.; Du, G.; Bian, H.; Zhang, D.; Si, J.; Yun, F.; Hou, X. Rapid Fabrication of Large-Area Concave Microlens Arrays on PDMS by a Femtosecond Laser. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2013**, *5*, 9382–9385.
159. Kim, C.; Sohn, I.-B.; Lee, Y.J.; Byeon, C.C.; Kim, S.Y.; Park, H.; Lee, H. Fabrication of a fused silica based mold for the microlenticular lens array using a femtosecond laser and a CO<sub>2</sub> laser. *Opt. Mater. Express* **2014**, *4*, 2233–2240.
160. Brinksmeier, E.; Gläbe, R.; Schönemann, L. Review on diamond-machining processes for the generation of functional surface structures. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* **2012**, *5*, 1–7.
161. Osten, W.; Baer, G.; Häfner, M.; Lyda, W.; Pruss, C.; Reichle, R.; Schaal, F. Making, testing, applying: some progress in the field of micro-optics at ITO. In Proceedings of the International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013); International Society for Optics and Photonics, 2013; Vol. 8769, p. 876905.
162. Häfner, M.; Pruss, C.; Osten, W. Laser direct writing. *Opt. Photonik* **2011**, *6*, 40–43.

163. Roeder, M.; Hera, D.; Thiele, S.; Pruss, C.; Osten, W.; Zimmermann, A. 3D Laser direct-writing based master fabrication for injection compression molding of diffractive-refractive lenses.; Berlin, 2016.
164. Rose, I.; Whittington, C. Nickel plating handbook. *OM Group Espoo Finl.* **2002**.
165. Roeder, M.; Hera, D.; Pruss, C.; Thiele, S. *IGF-VorhabenNr. 18556 N: Hybride Optische Low-Cost Elemente für optische Sensoren (HOLEOS)*; 2017;
166. Evonik Industries Trogamid CX Datasheet.
167. Bichler, M. *Kunststoffteile fehlerfrei spritzgiessen*; Hüthig Verlag. Heidelberg, 1999;
168. Roeder, M.; Schilling, P.; Hera, D.; Guenther, T.; Zimmermann, A. Influences on the Fabrication of Diffractive Optical Elements by Injection Compression Molding. *J. Manuf. Mater. Process.* **2018**, 2, 5.
169. Dangel, R. *Spritzgießwerkzeuge für Einsteiger*; Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017; ISBN 978-3-446-45485-9.
170. Boettcher, T.; Gronle, M.; Osten, W. Multi-layer topography measurement using a new hybrid single-shot technique: Chromatic Confocal Coherence Tomography (CCCT). *Opt. Express* **2017**, 25, 10204–10213.
171. Völklein, F.; Zetterer, T. *Einführung in die Mikrosystemtechnik: Grundlagen und Praxisbeispiele*; Springer-Verlag, 2013; ISBN 978-3-322-91572-6.
172. Tamagawa, Y.; Ichioka, Y. Efficiency of Blazed Diffractive Optics Produced by Diamond Turning. *Opt. Rev.* **1998**, 5, 291–294.
173. Kawasegi, N. Ion Beam Machining. In *Micro and Nano Fabrication Technology; Micro/Nano Technologies*; Springer, Singapore, 2018; pp. 529–554 ISBN 9789811300974.
174. Allen, D.M.; Shore, P.; Evans, R.W.; Fanara, C.; O'Brien, W.; Marson, S.; O'Neill, W. Ion beam, focused ion beam, and plasma discharge machining. *CIRP Ann.* **2009**, 58, 647–662.
175. Raith ionLINE Plus Brochure 2016.
176. Nakamura, K.; Miura, K.; Kotajima, H. Non-contact surface configuration measuring apparatus and method thereof 2007.
177. Mitaka Kohki Co., LTD. Point Autofocus Probe - 3D Form Measuring Instrument 2016.
178. Mastlylo, R.; Dontsov, D.; Manske, E.; Jager, G. A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine.; Osten, W., Gorecki, C., Novak, E.L., Eds.; Munich, Germany, 2005; p. 238.
179. Harasaki, A.; Wyant, J.C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry. *Appl. Opt.* **2000**, 39, 2101–2106.
180. Czaske, M. Strukturbreitenmessung auf photolithographischen Masken und Wafern im Lichtmikroskop: Theorie, Einfluß der Polarisation des Lichtes und Abbildung von Strukturen im Bereich der Auflösungsgrenze, Institut für Mathematische Physik, TU Braunschweig, DE, 1997.
181. McKeown, P.A. The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future. *CIRP Ann.* **1987**, 36, 495–501.
182. Ito, T.; Okazaki, S. Pushing the limits of lithography. *Nature* **2000**, 406, 1027–1031.
183. Roeder, M.; Schilling, P.; Fritz, K.-P.; Guenther, T.; Zimmermann, A. Challenges in the fabrication of microstructured polymer optics. In *Proceedings of the World Congress on Micro and Nano Manufacturing 2018*; Portoroz, 2018; pp. 33–36.
184. Manske, E.; Jäger, G.; Hausotte, T.; Füßl, R. Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology. *Meas. Sci. Technol.* **2012**, 23, 074001.





## 11 Veröffentlichungen

M. Roeder, T. Guenther and A. Zimmermann, Review on fabrication technologies for optical mold inserts, *Micromachines* 2019, 10(4), 233

M. Roeder, S. Thiele, D. Hera, C. Pruss, T. Guenther, W. Osten and A. Zimmermann, Fabrication of curved diffractive optical elements by means of laser direct writing, electroplating, and injection compression molding, submitted to: *Journal of Manufacturing Processes*, 2019

M. Roeder, P. Schilling, K.-P. Fritz, T. Guenther and A. Zimmermann, Challenges in the fabrication of microstructured polymer optics, *J. Micro Nano-Manuf* 7(2), 021001, 2019

M. Roeder, P. Schilling, K.-P. Fritz, T. Guenther and A. Zimmermann, Challenges in the fabrication of microstructured polymer optics, *World Congress on Micro and Nano Manufacturing (WCMNM)*, Portoroz, 2018

M. Roeder, M. Drexler, T. Guenther and A. Zimmermann, Evaluation of ultra-precision milling strategies for micro lens array mould inserts for the replication by injection-compression moulding, *EUSPEN*, Venice, 2018

M. Roeder, M. Drexler, T. Rothermel, T. Meissner, T. Guenther and A. Zimmermann, Injection Compression Molded Microlens Arrays for Hyperspectral Imaging, *Micromachines*, 9(7), 355, 2018

M. Roeder, T. Meissner, T. Guenther and A. Zimmermann, Micro-lens array fabrication by means of ultra-precision milling and injection compression molding, *Polymer Replication on Nanoscale (PRN)*, Copenhagen, 2018

M. Roeder, P. Schilling, D. Hera, T. Guenther and A. Zimmermann, Influences on the Fabrication of Diffractive Optical Elements by Injection Compression Molding, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(1), 5, 2018

M. Roeder, D. Hera, S. Thiele, C. Pruss, T. Guenther, W. Osten and A. Zimmermann, 3D Laser direct writing based mold fabrication for the manufacturing of diffractive-refractive elements, *Polymer Replication on Nanoscale (PRN)*, Aachen, 2017

N. Borst, S. Wadle, K. Stock, M. Roeder, E. Held-Föhn, A. Heiß, U. Götz und F. von Stetten, Innovative Diagnostikplattform zur Zuordnung von Krankenhauskeimen und deren Antibiotikaresistenzen, microTEC Südwest Clusterkonferenz, Freiburg, 2017

N. Borst, M. Specht, M. Schulz, N. Paust, J. Li, S. Wadle, U. Götz, E. Held-Föhn, A. Heiß, F. Hausladen, R. Mader, K. Stock, M. Roeder, A. Serr, G. Häcker, R. Zengerle und F. von Stetten, Integriertes System zur simultanen Detektion von Krankenhauskeimen und deren Antibiotikaresistenzen auf Einzelzellebene, MST Congress, Munich, 2017

M. Roeder, D. Hera, S. Thiele, C. Pruss, W. Osten und A. Zimmermann, 3D Laser direct-writing based master fabrication for injection compression molding of diffractive-refractive lenses, EOSAM, Berlin, 2016