

Forschungsbericht 2

Entwicklung eines Stempels für Nanoimprint Lithographie auf gekrümmten Oberflächen

Nina Marie Schneelee

Matrikelnummer:	85640
Bearbeitungszeitraum:	14.03.2022 – 04.07.2022
Erstbetreuer:	Herr Prof. Dr. Andreas Heinrich
Zweitbetreuer:	Herr Prof. Dr. Rainer Börret
Betreuende Hochschule:	Hochschule Aalen
Studiengang:	Advanced Materials and Manufacturing (AMM)

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Abhandlung wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

N. Schnee/e

Aalen, den 04.07.2022

(Nina Schnee/e)

Abstract

In der vorliegenden Arbeit soll ein Nanoimprint Lithographie Stempel für gekrümmte Substrate gefertigt werden. Der Stempel soll die Negativform eines Linsenrohlings besitzen. Außerdem sollen auf dem Stempel Strukturen vorhanden sein. Einige Vorarbeit wurde bereits im ersten Forschungsbericht geleistet. Es wurde eine 3D-gedruckte strukturierte Gussform hergestellt. Die Gussform wurde mit Polydimethylsiloxan abgeformt. Bisher sind die Strukturen abgebrochen, durch eine Optimierung der Gussformkonstruktion werden die Strukturen erhalten. Außerdem wurde bereits eine Stempelform durch das direkte Abformen des Linsenrohlings gefertigt. In dieser Arbeit wird die Verformung durch die Aushärtung des Polydimethylsiloxan und erneuter Hitzeeinwirkung untersucht. Außerdem wird mit der Smart Nanoimprint Lithographie eine UV-Polydimethylsiloxan Folie hergestellt, die Nanostrukturen besitzt. Mit unterschiedlichen Versuchen wird die optimale Methode zum Aufbringen dieser Folie auf die Stempelform gesucht, wobei keine Falten gebildet und keine Strukturen zerstört werden.

In the present work, a nanoimprint lithography stamp for curved substrates is to be manufactured. The stamp shall have the negative shape of a lens. In addition, structures shall be present on the stamp. Some preliminary work has already been done in the first research report. A 3D-printed structured mold was made. The mold was molded with polydimethylsiloxane. So far, the structures have broken off; by optimizing the mold design, the structures will be preserved. In addition, a stamp mold has already been fabricated by directly molding the lens. In this work, the deformation by curing the polydimethylsiloxane and applying heat again is investigated. In addition, a UV polydimethylsiloxane film that has nanostructures is fabricated using smart nanoimprint lithography. Different experiments will be conducted to find the optimal method for applying this film to the stamp mold, while not forming wrinkles or destroying structures.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Versicherung	I
Abstract	II
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Formelverzeichnis	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik/Wissenschaft.....	2
1.3 Ziel der Arbeit.....	6
2 Grundlagen.....	8
2.1 Brechung	8
2.2 Rotationsbeschichtung	9
2.3 Oberflächenbehandlung	11
2.3.1 Grundierung	13
2.3.2 Anti-Haft-Beschichtung	13
3 Materialien und Geräte	15
3.1 UV-Polydimethylsiloxan.....	15
3.2 Refraktometer.....	16
3.3 Weißlichtinterferometer	17
3.3.1 Prinzip eines Weißlichtinterferometers.....	17
3.3.2 Kippdistanzverfahren	19
4 Experimente	21
4.1 Modifizierung der Gussform	21
4.1.1 Fragen und Ziele	22
4.1.2 Vorbereitung und Durchführung	23
4.1.3 Beobachtungen und Ergebnisse	24

4.1.4	Diskussion der Ergebnisse	27
4.2	Verformung der PDMS-Form	29
4.2.1	Fragen und Ziele	29
4.2.2	Vorversuch: Refraktometer Messung	29
4.2.3	Durchführung	33
4.2.4	Beobachtungen und Ergebnisse	34
4.2.5	Diskussion der Ergebnisse	37
4.3	Nanostrukturen	39
4.3.1	Rotationsbeschichtung mit UV-PDMS	39
4.3.2	Herstellung der Nanostrukturen	46
4.3.3	Aufbringen der Folie	57
5	Fazit	68
6	Ausblick	70
	Literaturverzeichnis	XI
	Anhänge	XIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Soft UV-NIL, auf a) konvexen und konkaven Oberflächen von Glass oder PMMA und auf b) Stufenflächen mit stark gekrümmter Oberfläche.	3
Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des Herstellungsverfahrens der Hybridform und der hybriden Nanoimprint-Softlithographie, a) Vorbereitung eines elastischen Trägers, b) Absorption des Resists in den elastischen PDMS-Träger, c) Herstellung der Hybridform durch Schleuderbeschichtung des Resists auf der Masterform, Herstellen eines Kontakts und Aushärten des Resits, d) O ₂ -Plasmaoxidation der Oberfläche, e) UV-Aufdruck auf gebogenem Substrat durch Hybridform und f) aufgedruckte Muster auf gebogenem Substrat.	5
Abbildung 1.3: Konzept des zukünftigen Aufbaus bei Soft UV-NIL mit gekrümmtem Substrat, mit einem Linsenrohling als Substrat und einem Stempel mit der Negativform der Linse und Mikro- und Nanostrukturen.....	6
Abbildung 1.4: PDMS-Form auf einem Wafer, auf dem eine Folie mit Nanostrukturen aus UV-PDMS aufgebracht werden soll.....	7
Abbildung 2.1: Das Brechungsgesetz von Snellius resultierend aus dem Extremalprinzip von Fermat.....	8
Abbildung 2.2: Schritte der Rotationsbeschichtung a) Aufbringen der Flüssigkeit auf einem Substrat. b) Verteilen der Flüssigkeit durch die Zentrifugalkraft bei der Rotation. c) Gleichmäßig beschichtetes Substrat.	10
Abbildung 2.3: Zwei Oberflächen a) mit wenig gleichen Oberflächenenergieanteilen und damit einer schwachen chemischen Bindung und b) mit mehr gleichen Oberflächenenergieanteilen und einer stärkeren chemischen Bindung.	12
Abbildung 2.4: Kontaktwinkel zwischen einer Flüssigkeit und einer Oberfläche. Bei einem Kontaktwinkel zwischen 0 und 90 ° ist die Oberfläche hydrophil, über 90 ° ist die Oberfläche hydrophob.....	12
Abbildung 2.5: Bei der Anwendung eines HMDS-Primers auf einem SiO ₂ -Substrat, wird die unpolare Trimethylsilylgruppe an das Sauerstoffatom gebunden und es wird Ammoniak abgespalten.....	13
Abbildung 3.1 : Prinzip eines Refraktometers, wobei eine Lichtquelle auf ein Prisma mit einer darauf liegenden Probe strahlt. Dadurch entsteht ein beleuchteter und ein unbeleuchteter Bereich auf dem Detektor.....	17

Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers, wie es in Weißlichtinterferometern zum Einsatz kommt. Mit einer Lichtquelle und einem Strahlteiler, der das Licht in einen Mess- und Referenzstrahl aufteilt. Der Messtrahl wird auf das Messobjekt geleitet und dort zurückreflektiert. Der Referenzstrahl wird an einem Referenzspiegel zurückreflektiert. Beide Strahlen werden zu einem Detektor geleitet.	18
Abbildung 3.3: Kippdistanzverfahren. Der Punkt P_1 auf der Wafer Oberfläche und der Punkt P_{M2} auf der Oberseite des Materials werden gemessen. der senkrechte Oberflächenabstand ist gleich dem vertikalen Abstand von P_1 zu P_{M2} multipliziert mit dem Cosinus des Kippwinkels. Die Brechungsindexkorrektur muss berücksichtigt werden.	19
Abbildung 4.1: Abgebrochene Strukturen von ausgehärtetem PDMS unter dem VR-Mikroskop mit 25x Vergrößerung a) Hauptbild mit eingezeichneter Profilmessung b) Profilmessung mit rotem Pfeil für die konstruierte Höhe.	22
Abbildung 4.2: Skizzierte Darstellung der geplanten Gussform mit den Hohlräumen in den Strukturen.....	22
Abbildung 4.3: Konstruierte Gussform mit einem mittigen Schnitt und mit den Hohlräumen in den Strukturen.....	23
Abbildung 4.4: Strukturen der Gussform unter dem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung. Strukturen angeordnet in Y-Richtung sind grün markiert. Strukturen angeordnet in X-Richtung sind rot markiert und kreisförmig angeordnete Strukturen sind orange markiert.....	24
Abbildung 4.5: Profilmessungen der Strukturen der Gussform vor und nach der Hitzeeinwirkung, gemessen mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung	25
Abbildung 4.6: Profilmessungen der Strukturen der Gussform vor und nach der Abformung mit PDMS, gemessen mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung	26
Abbildung 4.7: Profilmessung der Strukturen der Gussform nach der Abformung mit dem PDMS und die Profilmessung des abgeformten PDMS, gemessen mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung	27
Abbildung 4.8: Die Veränderung des Brechungsindex von Sylgard 184 während der Aushärtung bei 25, 40, 60 und 80 °C, gemessen mit einem Refraktometer	30
Abbildung 4.9: Die Veränderung des Brechungsindex von Sylgard 184 während der Aushärtung bei 80 °C an unterschiedlichen Tagen, gemessen über die Zeit mit einem Refraktometer.....	31
Abbildung 4.10: Veränderung des Brechungsindex von Sylgard 184 während der Aushärtung bei 80 °C über 108 Stunden, gemessen mit einem Refraktometer.....	32

Abbildung 4.11: Die Veränderung des Brechungsindex von Sylgard 184 über die Zeit, gemessen mit einem Refraktometer. Das Sylgard 184 wurde bei 80 °C ausgehärtet und wird anschließend auf 25 °C abgekühlt. Die Messung beginnt ab der Temperaturänderung auf 25 °C. Die Messpunkte werden in blau dargestellt und in orange die Werte gefiltert mit einem Durchschnittsfilter mit der Filterbreite 3.	33
Abbildung 4.12: Vergleich der Profilmessungen des Linsenrohlings mit drei PDMS-Abformungen, gemessen mit dem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung.	35
Abbildung 4.13: Differenz zwischen der Linsenform und a) der ersten, b) der zweiten und c) der dritten abgeformten PDMS-Form nach der Aushärtung.	36
Abbildung 4.14: Differenz zwischen der Linsenform und a) der ersten, b) der zweiten und c) der dritten abgeformten PDMS-Form nach der zweiten Hitzeeinwirkung.	37
Abbildung 4.15: Gemessene Schichtdicken des UV-PDMS KER-4690 mit der Standardabweichung bei einer Schleuderdrehzahl von a) 500 rpm, b) 1000 rpm, c) 2000 rpm und d) 3000 rpm.	42
Abbildung 4.16: Schichtdicke von UV-PDMS KER-4690 in Abhängigkeit von der eingestellten Schleuderdrehzahl für 30 s, gemessen mit dem WLI mit dem Kippdistanzverfahren.	44
Abbildung 4.17: Gitterstrukturen des Masters, a) abfotografiert und b) schematische Darstellung der Anordnung mit roter Markierung für die zu messenden Strukturen.	47
Abbildung 4.18: Mit UV-PDMS beschichteter Si-Wafer nach dem Smart Nil-Prozess, mit einer Annäherung der Stempelfolie an den Wafer von a) 300 µm und b) 350 µm, zum Teil mit den abgeformten Strukturen von der Stempelfolie (rote Rechtecke).	49
Abbildung 4.19: Zersplitterter mit UV-PDMS beschichteter Si-Wafer, nach dem Smart NIL-Prozess mit einer Annäherung der Stempelfolie von 400 µm, wobei die Strukturen abgeformt wurden.	50
Abbildung 4.20: Profillinien des Replikats von a) Gitterstruktur 3 und b) Gitterstruktur 4.	52
Abbildung 4.21: Vergleich der Profillinien zwischen Replika und UV-PDMS-Folie von a) Gitterstruktur 3 und b) Gitterstruktur 4.	54
Abbildung 4.22: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht a) ohne Exsikkator und b) mit Exsikkator, wobei der Rand (rot umkreist) gut aufliegt.	58
Abbildung 4.23: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht indem die Folie über der Metallvorrichtung gespannt wird. Die Folie liegt nur am Rand auf der Form auf.	59
Abbildung 4.24: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht indem Seife auf den Linsenrohling aufgebracht wird, darauf die Folie und der Metallring und dann die PDMS-Form und wird für 70 Minuten bei 80 °C ausgehärtet. Die Folie hat Falten geworfen.	60

Abbildung 4.25: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht indem Seife auf den Linsenrohling aufgebracht wird, darauf die Folie und der Metallring und dann die PDMS-Form und wird für 48 Stunden bei Raumtemperatur ausgehärtet. Die Folie hat sich gut an die Form angepasst, bis auf vereinzelte Falten am Rand.....	60
Abbildung 4.26: PDMS-Form mit UV-PDMS-Folie, aufgebracht indem Seife auf den Linsenrohling aufgebracht wird, darauf die Folie und der Metallring und dann die PDMS-Form und wird für 48 Stunden bei Raumtemperatur ausgehärtet. Die Folie hat Falten geworfen und das PDMS zwischen Form und Folie ist nicht ausgehärtet.	61
Abbildung 4.27: Vergleich der Profillinien zwischen Replika und PDMS-Folie von a) Gitterstruktur 3 und b) Gitterstruktur 4.....	63
Abbildung 4.28: Wiederholung des Versuchs eine PDMS-Folie auf eine PDMS-Form aufzubringen nach den bereits zufriedenstellenden Bedingungen. Faltenbildung durch das Abziehen der Folie, um die Aushärtung des PDMS zu überprüfen.	64
Abbildung 4.29: 6 PDMS-Proben auf Glasobjektträger, wobei nur die Probe 1 und 4 vollständig ausgehärtet sind.	65
Abbildung 6.1: Beschichteter Linsenrohling, der mithilfe des gefertigten Stempels mit dem Soft UV-NIL-Verfahren strukturiert wird.	70

Abkürzungsverzeichnis

A

ASL..... *Anti-Sticking-Layer*

E

EVG.....*EV Group*

H

HMDS.....*Hexamethyldisilazan*

N

NIL.....*Nanoimprint Lithographie*

O

OH..... *Hydroxid*

P

PDMS..... *Polydimethylsiloxan*

PGMEA.....*Propylenglykolmonomethylacetat*

PMMA.....*Polymethylmethacrylat*

PR 48..... *Prototyping Resin*

S

Si..... *Silizium*

SiO₂.....*Siliziumdioxid*

U

UV.....*Ultraviolett*

V

VR..... *Virtual Reality*

W

WLI.....*Weißlichtinterferometer*

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Änderung der Härte von KER-4690 in Abhängigkeit der Zeit bei Raumtemperatur nach der UV-Belichtung.....	16
Tabelle 4.1: Spin Coating Parameter.....	40
Tabelle 4.2: Prozessparameter von der Schichtdickenermittlung von UV-PDMS KER-4690.....	40
Tabelle 4.3: Gemessen Schichtdicken der drei Durchläufe mit unterschiedlichen Schleuderdrehzahlen und die Standardabweichung	42
Tabelle 4.4: Prozessparameter für den Smart NIL-Prozess	48
Tabelle 4.5: Prozessparameter für das Auftragen von UV/A2	51

Formelverzeichnis

2.1.1 Optische Weglänge	8
2.1.2 Gesamte Optische Weglänge	9
2.1.3 Minimum der gesamten Optische Weglänge	9
2.1.4 Geometrische Beziehung von Einfalls- und Brechungswinkel	9
2.1.5 Snelliusches Brechungsgesetz	9
2.2.1 Zentrifugalkraft.....	10
2.2.2 Gleichgewichtsgleichung Zentrifugalkraft und Viskositätskraft	11
3.3.1 Schichtdicke mit dem Kippdistanzverfahren	19
4.3.1 Berechnung der Schichtdicke in Abhängigkeit der Schleuderdrehzahl.....	43

1 Einleitung

Die Oberflächen von Bauteilen einiger Technologien müssen im Mikro- und Nanometerbereich strukturiert werden, wie beispielsweise bei holographischen optischen Elementen, integrierten photonischen Elementen oder Wellenleitern [1–3]. Zur Herstellung solcher Strukturen wird häufig die Photolithographie verwendet. Ein Photolithographiesystem besteht aus einer Lichtquelle, die Strukturen einer Lichtmaske, durch ein Projektionssystem, auf ein mit Photoresist beschichtetes Substrat projiziert. Dabei wird der Photoresist chemisch verändert. Nach der Belichtung werden die Strukturen entwickelt. Bei der Entwicklung wird das Material abgetragen, sodass die Strukturen der Lichtmaske abgebildet werden. Allerdings steigen die Anforderungen in der Industrie an die Auflösung und den Durchsatz [4]. Mit den Photolithographie Tools können diese Anforderungen nicht erfüllt werden [4]. Aus diesem Grund wird häufiger eine alternative Technik verwendet, die Nanoimprint Lithographie (NIL) [4].

Die Strukturierung von gekrümmten Oberflächen ist mit der herkömmlichen Photolithographie schwierig. Die Schwierigkeit besteht aufgrund einer begrenzten Tiefenschärfe des Projektionssystems. Mit der NIL ist die Strukturierung von gekrümmten Oberflächen möglich, womit die NIL ein weiterer Vorteil gegenüber der Photolithographie bietet [5]. Für den NIL-Prozess muss vorab ein Master mit Strukturen und ein Stempel hergestellt werden. Bei dem NIL-Prozess werden die Strukturen des Masters mehrfach mit einem Stempel repliziert [4].

1.1 Motivation

Nanostrukturen werden nicht nur auf planaren Oberflächen benötigt. So wird beispielsweise die Herstellung von holografischen Objekten effektiver, wenn die Strukturen auf nicht-planaren Oberflächen aufgebracht werden [1]. Aus diesem Grund soll das NIL-Verfahren auch Strukturen auf Freiformflächen abbilden können. Dafür muss der bisherige Prozess modifiziert werden. Bei dem bisherigen Prozess werden Nanostrukturen auf einem Stempel in ein mit Resist bezogenes, planares Substrat gedrückt. Nachdem der Resist ausgehärtet ist, wird der Stempel entfernt. Die Modifikation muss eine neue Art von Stempel umfassen, dessen Form an die Freiformoberfläche des Substrates anpassbar ist und dabei die Formen der gewünschten Strukturen nicht verändert bzw. im vorhersehbaren Maße verändert. Das Abformen von Strukturen auf nicht-planaren Oberflächen soll mit einem Soft

Ultraviolett (UV) NIL Prozess getestet werden. Soft UV-NIL umfasst einen weichen, UV-transparenten Stempel und der Resist auf dem Substrat wird mit UV-Strahlung ausgehärtet [4].

1.2 Stand der Technik/Wissenschaft

Bei einem NIL-Prozess werden Strukturen von einem Master repliziert. Dafür müssen zunächst die Strukturen des Masters abgeformt werden. Die abgeformten Strukturen dienen als Stempel. Auf einem Substrat wird ein dünner Resist-Film aufgetragen. Der Stempel wird in den Resist-Film gedrückt, wobei die Strukturen abgeformt werden. Nach dem Aushärten des Resists wird der Stempel entfernt. Abschließend wird der Resist-Film mit einem Ätzvorgang entfernt und die Strukturen werden in das Substrat übertragen [4]. In dem ersten Forschungsbericht wurde der NIL-Prozess bereits ausführlich beschrieben.

NIL kann mit unterschiedlichen Methoden umgesetzt werden. Diese unterscheiden sich beispielweise in dem Verfahren, der Form und dem Aushärten der Abformung. Das Material des NIL-Stempels kann dabei weich oder hart sein, je nachdem welches Verfahren angewendet wird. Eine NIL-Methode ist die UV-NIL. Dafür wird zunächst eine Masterstruktur hergestellt, die durch Kontakt auf den NIL-Stempel aufgedruckt wird. Dieser Stempel kann danach die Strukturen mehrfach in einem flüssigen Polymer abbilden. Das Aushärten findet dabei unter UV-Belichtung statt. Die Strukturen, die mit UV-NIL geprägt werden, können bis zu wenigen 10 nm klein sein. [4, 6]

Freiform-Oberflächen können optische Funktionen verbessern. So besitzen beispielsweise Freiformlinsen kleinere Abbildungsfehler [1]. Aus diesem Grund sollen Nanostrukturen mit NIL direkt auf nicht-planaren Substraten aufgedruckt werden. Dazu existieren bereits verschiedene Ansätze. Am häufigsten wird dabei das Soft UV-NIL Verfahren mit einem weichen Stempelmateriale angewendet. Für dieses weiche und flexible Material wird meist Polydimethylsiloxan (PDMS) genutzt [5, 7, 8].

Die erste Möglichkeit den Stempel aus PDMS zu fertigen ist in Abbildung 1.1 a) abgebildet. Diese Möglichkeit besteht darin, eine Masterstruktur aus Silizium oder Polymethylmethacrylat (PMMA) mit PDMS abzuformen. Dadurch entsteht ein Stempel aus einem dünnen PDMS-Film mit den Negativstrukturen des Masters. Anschließend wird ein UV-Resist auf ein gekrümmtes PMMA- oder Glassubstrat aufgetragen. Der PDMS Stempel wird mit leichtem Druck auf das Substrat mit dem Resist aufgelegt.

Nach einer UV-Bestrahlung zur Härtung des Resists wird der Stempel wieder abgenommen. [7]

Eine weitere Möglichkeit für beispielsweise gestufte Oberflächen von Substraten wird in Abbildung 1.1 b) dargestellt. Bei dieser Möglichkeit wird die Oberfläche des Substrates ebenfalls mit PDMS repliziert. Anschließend wird der dünne PDMS Stempel mit den Masterstrukturen auf das mit Resist benetzte Substrat gelegt. Darauf wird die replizierte PDMS Form und abschließend ein Glasobjektträger gelegt. Damit der Stempel Kontakt zum Substrat erhält, wird das gesamte System eingeklemmt und anschließend belichtet. Abschließend werden der Objektträger, die PDMS replizierte Form und der PDMS Stempel abgenommen. [7]

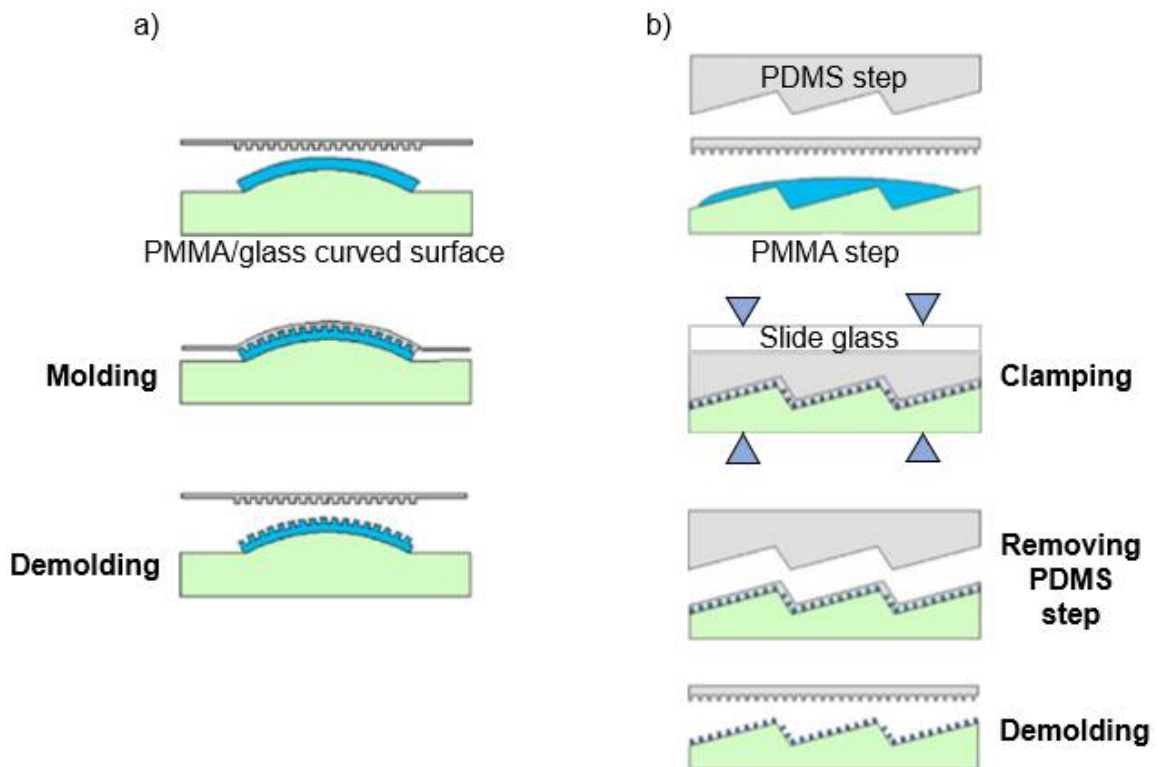


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Soft UV-NIL, auf a) konvexen und konkaven Oberflächen von Glass oder PMMA und auf b) Stufenflächen mit stark gekrümmter Oberfläche. [7]

Ein Hybridstempel ist eine weitere Möglichkeit ein gekrümmtes Substrat zu strukturieren. Die einzelnen Schritte zur Herstellung und Verwendung eines Hybridstempels sind in Abbildung 1.2 schematisch dargestellt. Hierbei besteht der Stempel aus zwei unterschiedlichen Materialien, einer dicken Schicht eines elastischen Materials und einer dünnen Schicht eines festeren Materials mit den Strukturen. Durch die Nutzung von zwei Materialien wird die hochauflösende

Strukturübertragung durch das festere Material gewährleistet und einen guten Kontakt zum Substrat durch das flexiblere Material. Das flexible Material dient als Träger und besteht aus PDMS. Das PDMS wird zwischen zwei Siliziumwafern gegossen und ausgehärtet, wie in Abbildung 1.2 a) dargestellt ist. In Abbildung 1.2 b) ist der Absorptionsprozess von einem siliziumhaltigen Photoresisten in den PDMS-Träger zu sehen. Die Fertigung des Hybridstempels ist in Abbildung 1.2 c) dargestellt. Um den Hybridstempel zu fertigen, wird der gleiche Photoresist durch Schleuderbeschichtung auf die Masterstrukturen aufgetragen und darauf das absorbierte PDMS. Der Stempel wird unter UV-Bestrahlung ausgehärtet. In Abbildung 1.2 d) ist die Oberflächenbehandlung des Stempels abgebildet. Die Oberfläche des Stempels wird durch O₂-Plasma behandelt, wodurch diese zu Siliziumdioxid oxidiert. Um anschließend die Strukturen abzuformen, wird ein Photoresist auf das Substrat aufgetragen und darauf den Hybridstempel gelegt und mit UV-Bestrahlung ausgehärtet, wie in Abbildung 1.2 e) zu sehen ist. Abschließend wird der Stempel entfernt und die Strukturen sind auf dem gekrümmten Substrat abgeformt, wie dies in Abbildung 1.2 f) zu sehen ist. [8]

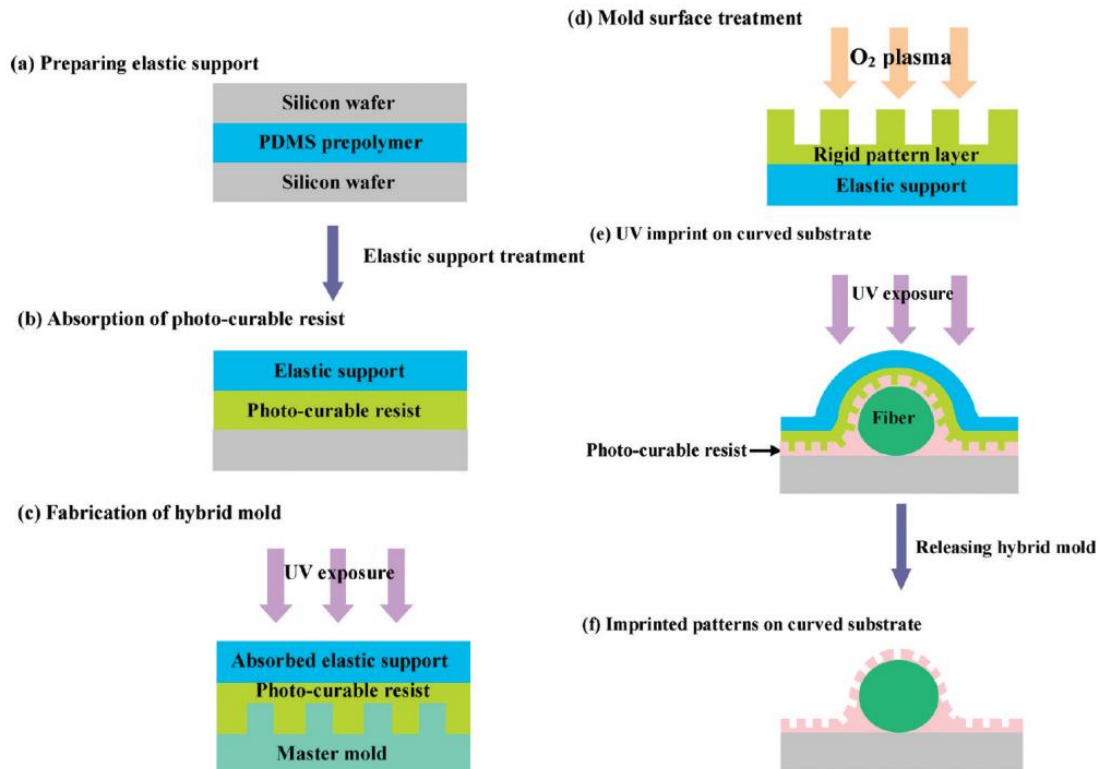


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des Herstellungsverfahrens der Hybridform und der hybriden Nanoimprint-Softlithographie, a) Vorbereitung eines elastischen Trägers, b) Absorption des Resists in den elastischen PDMS-Träger, c) Herstellung der Hybridform durch Schleuderbeschichtung des Resists auf der Masterform, Herstellen eines Kontakts und Aushärten des Resists, d) O₂-Plasmaoxidation der Oberfläche, e) UV-Aufdruck auf gebogenem Substrat durch Hybridform und f) aufgedruckte Muster auf gebogenem Substrat. [8]

1.3 Ziel der Arbeit

Das Übergeordnete Ziel ist es, einen Stempel zu fertigen. Dieser Stempel soll zukünftig Nanostrukturen mit dem Soft UV-NIL Prozess auf ein gekrümmtes Substrat abformen können. In Abbildung 1.3 ist der geplante Aufbau für das Abformen der Strukturen zu sehen. Der Stempel ist in Gelb dargestellt. Der Stempel soll die Negativform des Substrates haben und Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich besitzen. Der Stempel soll auf dem Stampholder des Covers der NIL-Anlage befestigt werden können. Das Substrat ist in hellblau dargestellt und für diese Arbeit wird dafür ein Linsenrohling verwendet. Das Substrat wird auf den Chuck gelegt.

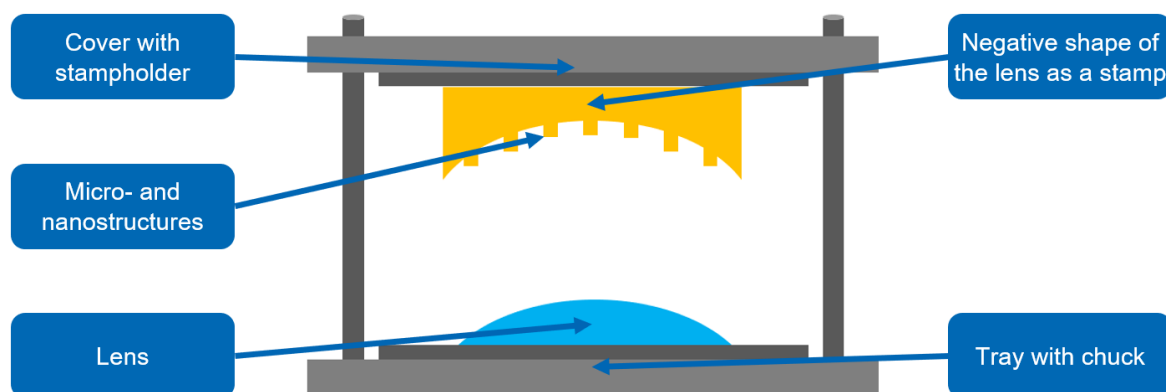


Abbildung 1.3: Konzept des zukünftigen Aufbaus bei Soft UV-NIL mit gekrümmtem Substrat, mit einem Linsenrohling als Substrat und einem Stempel mit der Negativform der Linse und Mikro- und Nanostrukturen.

In dem ersten Forschungsbericht wurden bereits zwei unterschiedliche Herangehensweisen untersucht. Zum einen wurde eine 3D-gedruckte Gussform genutzt, um einen Stempel aus PDMS in der der Negativform des Linsenrohlings und bereits mit Mikrostrukturen herzustellen. Die Strukturen sind allerdings beim Herauslösen aus der Gussform abgebrochen. Ein Ziel dieser Arbeit ist es einen Weg zu finden, dass die Strukturen nicht abbrechen. Außerdem soll bewertet werden, ob die 3D-gedruckte Gussform weiter als Lösung für die Stempelherstellung verfolgt werden soll.

Die andere Methode für die Stempelherstellung, die im ersten Forschungsbericht untersucht wurde, ist die Abformung direkt von dem Linsenrohling mithilfe einer Metallvorrichtung. Auch hierbei wurde PDMS verwendet. In diesem Bericht soll nun die Änderung der PDMS-Form bei der Aushärtung betrachtet werden. Dazu soll die abgeformte PDMS-Form mit dem ursprünglichen Linsenrohling verglichen werden.

Bisher besteht der Stempel nur aus einem Wafer, worauf die Negativform des Linsenrohlings aus PDMS befestigt ist. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die benötigten Nanostrukturen herzustellen. Dafür wird eine dünne UV-PDMS-Folie mit den Nanostrukturen gefertigt. Zur Strukturierung dieser Folie wird das Smart NIL-Verfahren von der EV Group (EVG) verwendet. Die Funktionsweise und die Besonderheiten dieses Verfahrens wurden bereits im ersten Forschungsbericht erläutert. Anders als der Stempel der in Kapitel 1.2 auf der Seite 3 beschrieben wird, soll dieser Stempel nicht aus den zwei Einzelkomponenten PDMS-Form und Folie bestehen. Das Ziel, welches in der Abbildung 1.4 gezeigt wird, ist, dass die Folie mit den Nanostrukturen fest auf die PDMS-Form angebracht wird. Wichtig dabei ist, dass durch das Aufbringen die Strukturen nicht stark verändert oder zerstört werden.



Abbildung 1.4: PDMS-Form auf einem Wafer, auf dem eine Folie mit Nanostrukturen aus UV-PDMS aufgebracht werden soll.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erklärt, die zum Verständnis nötig sind und noch nicht im ersten Forschungsbericht erläutert wurden. Zunächst wird der Brechungsindex, anschließend die Rotationsbeschichtung und zum Schluss die Oberflächenbehandlung mit einer Grundierung oder einer Anti-Haft-Beschichtung verdeutlicht.

2.1 Brechung

Ein einfallender Lichtstrahl wird an der Grenzfläche von zwei transparenten Materialien gebrochen, wie in Abbildung 2.1. Diese Abbildung wird zur Ableitung des Snelliusschen Brechungsgesetz verwendet. [9, 10]

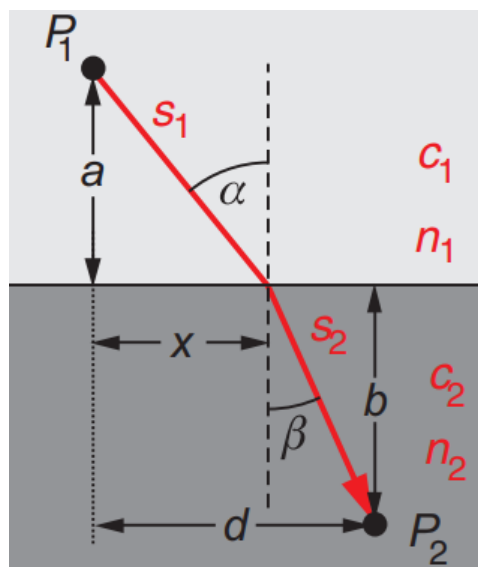


Abbildung 2.1: Das Brechungsgesetz von Snellius resultierend aus dem Extremalprinzip von Fermat. [10]

Das Extremalprinzip von Fermat besagt, dass aufgrund der Ausbreitungsgeschwindigkeit in beiden Medien, die kürzeste Verbindung von P_1 zu P_2 nicht die Gerade der Länge s , sondern die Verbindung mit der kürzesten optischen Weglänge [10]. Die optische Weglänge OWL gewichtet die metrische Weglänge s_m mit dem Brechungsindex des jeweiligen Mediums n_m . Die resultierende OWL ist die Summe aller gewichteten metrischen Weglängen, die in den propagierenden Medien m auftreten, wie in Formel 2.1.1. [9, 10]

$$OWL = \sum_{m=1}^N n_m s_m \quad (2.1.1)$$

Die gesamte optische Weglänge OWL_g von P_1 nach P_2 aus der Abbildung 2.1 ist in der Formel 2.1.2 definiert.

$$OWL_g = \sum_{m=1}^2 n_m s_m = n_1 s_1 + n_2 s_2 \quad (2.1.2)$$

$$OWL_g = n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d - x)^2}$$

Die gesamte optische Weglänge OWL_g hängt von der Länge x ab. Das Minimum der OWL_g wird durch den Nullpunkt der ersten Ableitung definiert, wie in Formel 2.1.3 gezeigt. [10]

$$\frac{dOWL_g}{dx} = \frac{n_1 x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{n_2 (d - x)}{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}} = 0 \quad (2.1.3)$$

Aus den geometrischen Verhältnissen in der Abbildung 2.1 können der Einfallswinkel und der Brechungswinkel beschrieben werden. Die beiden Winkel werden mit der Formel 2.1.4 beschrieben.

$$\sin \alpha = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}}; \sin \beta = \frac{d - x}{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}} \quad (2.1.4)$$

Die geometrischen Terme der Formel 2.1.3 können durch die Terme des Einfallswinkels α und des Brechungswinkels β aus der Formel 2.1.4 ersetzt werden. Durch eine Umstrukturierung der resultierenden Gleichung kann das Snelliusche Brechungsgesetz abgeleitet werden, welchen in Formel 2.1.5 dargestellt wird. [10]

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (2.1.5)$$

Die Größe des Brechungsindex wird von der Temperatur und der Wellenlänge beeinflusst. Aus diesem Grund, müssen diese beiden Parameter, bei der Messung des Brechungsindex eines Mediums, stets konstant sein. [11]

2.2 Rotationsbeschichtung

Mit der Rotationsbeschichtung, auch Spin Coating genannt, werden Flüssigkeiten gleichmäßig auf einem flachen Substrat aufgetragen. Das Spin Coating gewährleistet

mithilfe der resultierenden konstanten Schichtdicken einen reproduzierbaren Prozess. Der Prozess des Spin Coatings ist in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt. Beim Spin Coating wird ein Substrat, wie beispielsweise ein Wafer, auf einem Chuck mit Vakuum fixiert. Die Flüssigkeit wird manuell oder mithilfe einer Vorrichtung mittig auf dem Substrat aufgebracht, wie in Abbildung 2.2 a) gezeigt wird. Das Aufbringen kann entweder im statischen oder im dynamischen Zustand erfolgen. Bei dem dynamischen Aufbringen wird das Substrat mit geringer Geschwindigkeit in Rotation versetzt. Nach dem Aufbringen der Flüssigkeit wird das Substrat mit einer höheren Geschwindigkeit in Rotation versetzt. Mithilfe der Zentrifugalkraft wird dadurch die Flüssigkeit gleichmäßig auf dem Substrat verteilt. Das Verteilen der Flüssigkeit durch die Zentrifugalkraft wird in Abbildung 2.2 b) gezeigt. Die Zentrifugalkraft tritt auf, wenn ein Körper in Rotation versetzt wird und ist abhängig von der Masse, dem Radius zum Rotationspunkt und der Geschwindigkeit, wie in Formel 2.2.1 zu sehen ist. Die Formel zeigt außerdem, dass mit steigender Geschwindigkeit die Zentrifugalkraft ebenfalls größer wird. Nach dem Spin Coating ist die Flüssigkeit gleichmäßig auf dem Substrat verteilt, wie in Abbildung 2.2 c) zu sehen ist. [12]

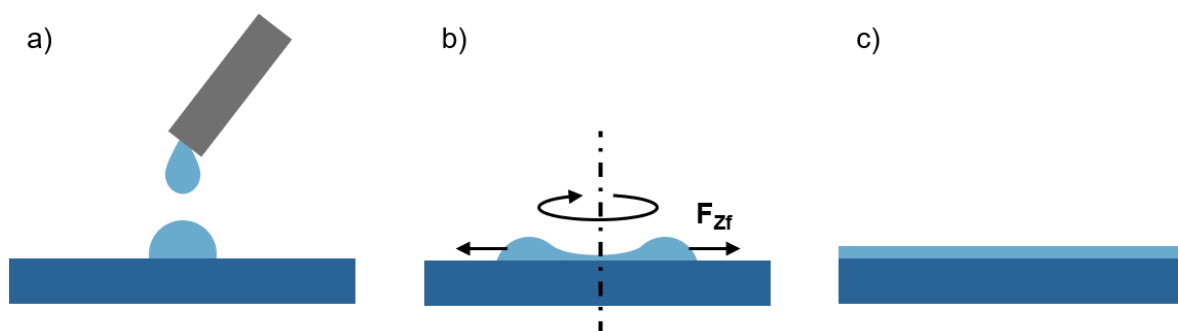


Abbildung 2.2: Schritte der Rotationsbeschichtung a) Aufbringen der Flüssigkeit auf einem Substrat. b) Verteilen der Flüssigkeit durch die Zentrifugalkraft bei der Rotation. c) Gleichmäßig beschichtetes Substrat.

$$F_{Zf} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2.2.1)$$

F_{Zf} ...Zentrifugalkraft

m ...Masse

v ...Geschwindigkeit

r ...Radius

Die Schichtdicke wird nicht nur von der Beschleunigung, der Dauer und der Drehgeschwindigkeit beim Spin Coating beeinflusst, sondern auch von der Viskosität der Flüssigkeit. Die zeitliche Viskosität ist abhängig von der Trocknungsgeschwindigkeit. Während die Flüssigkeit trocknet nimmt die Viskosität zu, bis die Zentrifugalkraft die Flüssigkeit nicht mehr über die Wafer Oberfläche bewegen kann. Somit sind die Schichtdicken limitiert, wenn die Viskositätskraft und die Zentrifugalkraft im Gleichgewicht stehen. Diese Gleichgewichtsgleichung ist in Formel 2.2.2 dargestellt. [12]

$$-\eta \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \rho \omega^2 r \quad (2.2.2)$$

η ...Viskosität

v ...Flüssigkeitsgeschwindigkeit

z ...Flüssigkeitshöhe

ρ ...Flüssigkeitsdichte

ω ...Rotationsgeschwindigkeit

r ...Radius

2.3 Oberflächenbehandlung

Ob sich zwei Materialien anziehen oder abstoßen, hängt von den Wechselwirkungen der Oberflächenenergien ab. Die Oberflächenenergie setzt sich aus dispersen und polaren Anteilen zusammen. Die dispersen Anteile bestehen aus Van-der-Waals-Wechselwirkungen, die durch zeitliche Veränderungen der Ladungsverteilung entstehen. Der polare Anteil der Oberflächenenergie besteht aus Coulomb-Wechselwirkungen, wie beispielsweise Wasserstoffbrückenbindungen. Die Van-der-Waals-Wechselwirkungen treten bei allen Atomen und Molekülen auf, somit besteht keine Oberfläche nur aus polaren Anteilen. Allerdings kann eine Oberfläche rein dispers sein. In Abbildung 2.3 werden zwei Oberflächen mit ihren dispersen (d, grün) und polaren (p, rot) Oberflächenenergieanteilen dargestellt. Wenn wenige Oberflächenenergieanteile übereinstimmen, wie in Abbildung 2.3 a), ist die chemische Bindung zwischen den beiden Oberflächen schwach. Wenn allerdings eine Bindung zwischen den Oberflächen gewünscht ist, muss die Oberfläche behandelt werden. Mit einer Oberflächenaktivierung wird die Anzahl der gleichen Oberflächenenergieanteile

erhöht und damit wird die chemische Bindung erhöht. In Abbildung 2.3 b) ist zu sehen, dass die Anzahl der gleichen Oberflächenenergieanteile, durch eine Polarisierung der Oberfläche 2, erhöht werden. Eine Polarisierung kann durch kaltes Sauerstoffplasma auf Silizium, Quarz, Glass oder Polymere erfolgen. Das Gegenteil der Oberflächenaktivierung ist die Oberflächenpassivierung. Bei einer Oberflächenpassivierung wird die Anzahl der gleichen Oberflächenenergieanteile gesenkt, damit die beiden Oberflächen sich nicht binden. [13]

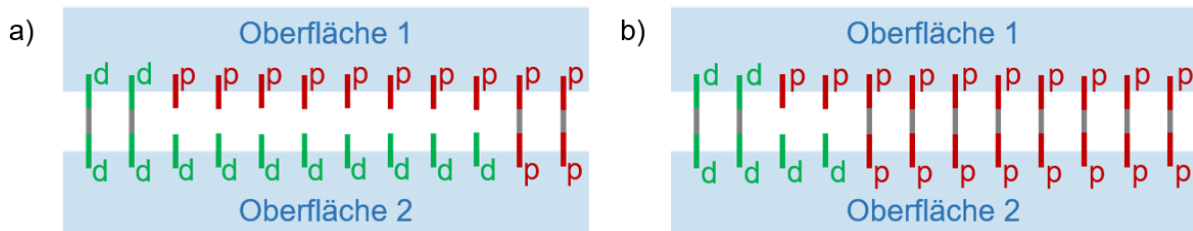


Abbildung 2.3: Zwei Oberflächen a) mit wenig gleichen Oberflächenenergieanteilen und damit einer schwachen chemischen Bindung und b) mit mehr gleichen Oberflächenenergieanteilen und einer stärkeren chemischen Bindung. [14]

Die Oberflächenenergie kann indirekt mit einem Kontaktwinkel zwischen der Oberfläche und einer Flüssigkeit, wie beispielsweise Wasser, gemessen werden. Diese Messmethode ist in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt. Bei einem Kontaktwinkel kleiner als 90° wird die Oberfläche mit Wasser benetzt und ist damit hydrophil. Eine vollständige Benetzung mit Wasser liegt bei einem Kontaktwinkel von 0° vor. Ist der Kontaktwinkel größer als 90° wird die Oberfläche nicht benetzt und ist damit hydrophob. Bei einem Kontaktwinkel nahe 180° ist die Oberfläche ultrahydrophob und ist somit vollständig flüssigkeitsabweisend. Dieser flüssigkeitsabweisende Effekt wird auch Lotuseffekt genannt. [15]

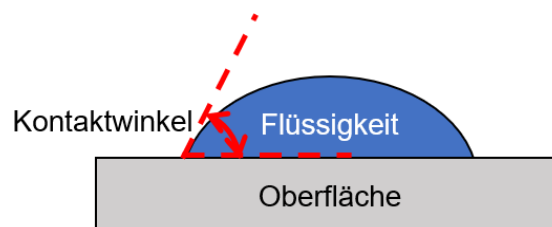


Abbildung 2.4: Kontaktwinkel zwischen einer Flüssigkeit und einer Oberfläche. Bei einem Kontaktwinkel zwischen 0 und 90° ist die Oberfläche hydrophil, über 90° ist die Oberfläche hydrophob. [15]

2.3.1 Grundierung

Eine Grundierung, auch Primer genannt, wird genutzt, um die Haftung zu verbessern. Dazu wird der Primer auf einem Wafer vor der Beschichtung aufgetragen. Wafer aus Silizium, Quarz, Glas und andere unedle Metalle mit Siliziumdioxidgruppen (SiO_2) hydrieren aufgrund der Luftfeuchtigkeit. Durch diese Hydratation erhalten die Wafer eine polare Hydroxidgruppen (OH). Dadurch ist die Waferoberfläche hydrophil. Beispielsweise ein Hexamethyldisilazan-Primer (HMDS), erzeugt durch die Bindung an den OH-Gruppen eine hydrophobe Oberfläche. Die Reaktion des HMDS-Primers ist in Abbildung 2.5 vereinfacht dargestellt. Die unpolare Trimethylsilylgruppe ($\text{Si}(\text{CH}_3)_3$) wird an dem Sauerstoffatom der OH-Gruppe gebunden und es wird Ammoniak (NH_3) abgespalten. [16]

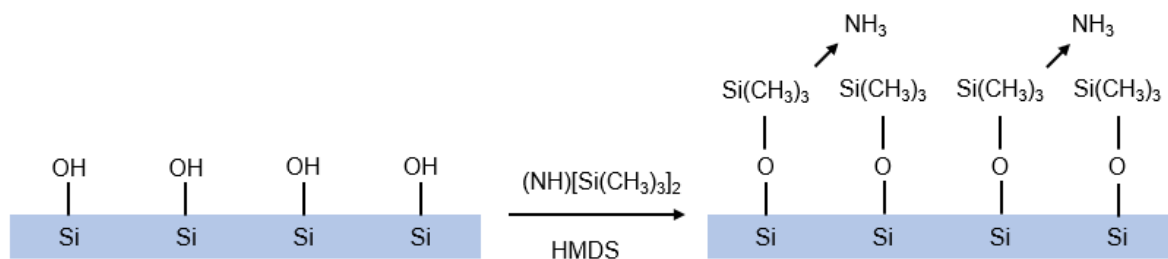


Abbildung 2.5: Bei der Anwendung eines HMDS-Primers auf einem SiO_2 -Substrat, wird die unpolare Trimethylsilylgruppe an das Sauerstoffatom gebunden und es wird Ammoniak abgespalten.[14]

Damit eine polare Flüssigkeit auf einem Substrat besser haftet, muss ein Primer verwendet werden, der die Substratoberfläche polarisiert. Diese Primer basieren auf organfunktionelle Silanen. Ein Beispiel für diese Primer ist der Primer K von EVG. Die chemische Zusammensetzung und der Mechanismus des Primer K sind nicht bekannt. Der Primer K wird nach der Prozessanleitung aufgetragen. Der Primer K besteht aus zwei Komponenten, die in einem Verhältnis von 95:5 gemischt werden. Anschließend wird das Gemisch für mindestens eine Stunde mit einem Magnetrührer verrührt. Der Primer K wird mit einem Spin Coater auf dem Substrat aufgetragen. Die Drehgeschwindigkeit liegt bei 2000 rpm und die Zeit bei 30 s. Anschließend muss das Substrat mit dem Primer K für 120 s bei 120 °C gebacken werden. Danach kann das Substrat mit einer polaren Flüssigkeit beschichtet werden. [17]

2.3.2 Anti-Haft-Beschichtung

Eine Anti-Haft-Beschichtung (Anti-Sticking-Layer, ASL) hat die entgegengesetzte Wirkung eines Primers. Mit einem ASL wird demnach die Haftung verringert. Wenn zwei Oberflächen mit der gleichen Oberflächenenergie getrennt werden sollen, wird

zuvor eine der Oberflächen mit dem ASL beschichtet, der die umgekehrte Polarität der Oberflächen aufweist. Beispielsweise wird ein Silizium-Master mit einem ASL passiviert, damit das hydrophile Stempelmateriale nach dem Aushärten gelöst werden kann, ohne die hydrophile Masteroberfläche zu beschädigen. Dafür wird ein ASL, wie beispielsweise der EVG ASL, genutzt. Die chemische Zusammensetzung des EVG ASL ist unbekannt, aber die Funktionsweise kann mit dem HDMS-Primer verglichen werden. Ein Teil des Moleküls bindet die Si-Atome und somit wird der nach außen gerichtete Teil des Moleküls unpolar. [17]

3 Materialien und Geräte

In diesem Kapitel werden die für die Experimente benötigten Materialien und Geräte erklärt. Für die Experimente werden die Materialien Sylgard 184 und KER-4690 benötigt. Im ersten Forschungsbericht wurde bereits die Umgangsweise mit Sylgard 184 beschrieben, somit wird in diesem Kapitel nur auf das KER-4690 eingegangen, wobei es sich um ein UV-Polydimethylsiloxan handelt. Für die Experimente werden ein Refraktometer und ein Weißlichtinterferometer verwendet. Beide Geräte werden in diesem Kapitel aufgezeigt, wobei für das Weißlichtinterferometer auch die genutzte Messmethode erläutert wird.

3.1 UV-Polydimethylsiloxan

Bei dem Material UV-Polydimethylsiloxan (UV-PDMS) handelt es sich um ein Silikonkautschuk, welches durch Photopolymersation aushärtet. Für die Experimente wird das UV PDMS KER-4690 von Microresist verwendet. Dieses Material ist transparent, besteht aus zwei Komponenten und ist zur Replizierung von Masterstempeln und zur Herstellung von Arbeitsstempeln für NIL gedacht. Die beiden Komponenten müssen in einem 1:1 Verhältnis vermischt werden. Für eine homogene Mischung wird das Vermischen mit einem Magnetrührer für eine Stunde bei 500 rpm durchgeführt. Nachdem die Komponenten vermischt wurden, muss das Gemisch innerhalb von 36 Stunden weiterverarbeitet werden. Nach dem Mischvorgang muss das Gemisch für 30 Minuten mit einem Vakuum entgast werden, damit die Luft aus dem Material, die durch das Rühren hineinkam, entfernt wird. Wenn das Substrat, auf dem das UV-PDMS aufgebracht wird, aus Silizium (Si) oder SiO_2 besteht, muss dieses mit Isopropanol oder Aceton gespincoatet werden. Anschließend müssen das Isopropanol oder das Aceton durch das Backen bei $200\text{ }^\circ\text{C}$ für 5 Minuten ausgedampft werden. Dies ist nötig, um die Substratoberfläche zu reinigen und zu aktivieren. Damit das UV-PDMS auf einem Substrat aus Quarz, Metall, Si oder anderen anorganischen Materialien haftet, muss ein HMDS Primer verwendet werden. Wenn mit dem UV-PDMS ein Master repliziert werden soll, muss ein ASL auf dem Master aufgebracht werden, damit dieser nicht beschädigt wird. Das UV-PDMS wird dann mit Spin Coating aufgetragen. Anschließend wird das Material direkt belichtet. Ein Vorbacken ist nicht nötig, da es sich um eine lösungsmittelfreie Rezeptur handelt. Die Belichtung wird mit einer Dosis von 2000 mJ/cm^2 bei einer Wellenlänge von 365 nm durchgeführt. Nach der UV-Belichtung muss das UV-PDMS nachhärten. Erfolgt die Nachhärtung bei

Raumtemperatur wird eine Zeit von 24 Stunden empfohlen. In Tabelle 3.1 ist die Änderung der Härte in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Dort ist zu sehen, dass das UV-PDMS bereits nach 3 Stunden konstante Materialeigenschaften behält. Bei einer Nachhärtung bei Raumtemperatur ist mit einem linearen Schrumpf von 0,1 % zu rechnen. Die Nachhärtung kann durch höhere Temperaturen beschleunigt werden, allerdings sind damit ein Verlust der Strukturtreue und ein höherer Schrumpf verbunden. [18]

Tabelle 3.1: Änderung der Härte von KER-4690 in Abhängigkeit der Zeit bei Raumtemperatur nach der UV-Belichtung [18]

Zeit nach der UV-Belichtung	10 min	30 min	1 h	2 h	3 h	24 h
Härte Durometer A	16	45	50	52	54	55
Elastizitätsmodul [MPa]	0,6	2,1	2,6	2,8	3,0	3,1

3.2 Refraktometer

Mit einem Refraktometer wird der Brechungsindex eines flüssigen oder festen Mediums gemessen. Daraus können die Identität, die Qualität, die Konzentration von binären oder quasibinären Mischungen, der Fortschritt einer Reaktion und die Stoffumsetzung abgeleitet werden. Bei einem Refraktometer wird die Tatsache genutzt, dass Licht an einem Medium nicht vollständig gebrochen wird, sondern auch teilweise reflektiert. Bei einem genug großen Einfallswinkel wird das Licht komplett reflektiert und nicht mehr gebrochen. Diese komplette Reflexion wird Totalreflexion genannt. Wenn die Totalreflexion gerade so auftritt und gerade so kein Licht mehr gebrochen wird, beträgt der Ausfallwinkel des Lichts 90° und wird als kritischer Winkel der Totalreflexion bezeichnet. Um den Brechungsindex zu ermitteln wird bei einem Refraktometer der Einfallswinkel gemessen, bei dem der kritische Winkel der Totalreflexion auftritt. [19]

Ein Refraktometer besteht aus einer Lichtquelle, einem Detektor und einem Prisma, auf dem die zu messende Probe aufgebracht wird. Wenn keine Probe auf dem Prisma liegt, tritt eine Totalreflexion über die gesamte Fläche des Prismas auf. Wenn dementsprechend eine Probe auf dem Prisma liegt, findet die Totalreflexion nicht über die gesamte Fläche des Prismas statt. Auf dem Detektor entsteht ein beleuchteter und ein unbeleuchteter Bereich, wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist. Der unbelichtete und

belichtete Teil wird durch den Winkel, ab dem die Totalreflexion auftritt, abgetrennt. Der Einfallswinkel wird also durch das Refraktometer bestimmt, der Ausfallwinkel ist der kritische Winkel der Totalreflexion, also liegt dieser bei 90° und der Brechungsindex des Prismas ist bekannt. Mit diesen Werten kann mit dem Snelliuschen Brechungsgesetz der Brechungsindex der Probe ermittelt werden. Bei einem Refraktometer wird automatisch die Berechnung durchgeführt und der Brechungsindex der Probe ausgegeben. [19]

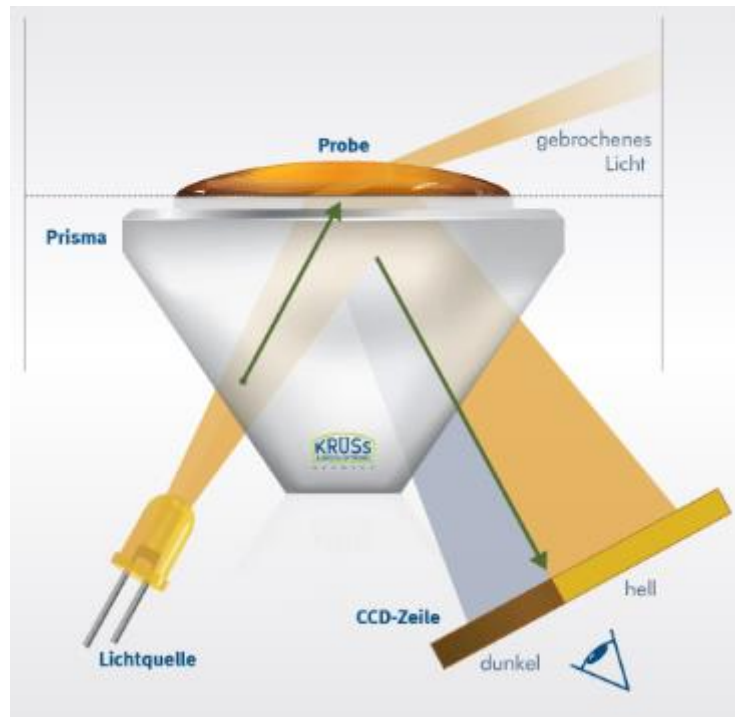


Abbildung 3.1 : Prinzip eines Refraktometers, wobei eine Lichtquelle auf ein Prisma mit einer daraufliegenden Probe strahlt. Dadurch entsteht ein beleuchteter und ein unbeleuchteter Bereich auf dem Detektor. [19]

3.3 Weißlichtinterferometer

Ein Weißlichtinterferometer (WLI) ist ein optisches Messgerät mit dem eine dreidimensionale Oberfläche gemessen werden kann. Für die kontaktlose Messung wird breitbandiges Licht im sichtbaren Bereich verwendet [20]. In den folgenden Unterkapiteln wird das Prinzip eines Weißlichtinterferometers und die verwendete Messmethode zur Ermittlung von Schichtdicken erklärt.

3.3.1 Prinzip eines Weißlichtinterferometers

Der Schematische Aufbau eines Michelson-Interferometers, wie es bei einem Weißlichtinterferometer zum Einsatz kommt, ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Ein WLI besteht aus einer Lichtquelle, einem Strahlteiler, einem Referenzspiegel und einem

Detektor. Die Lichtquelle strahlt breitbandiges Licht auf den Strahlteiler, der den Lichtstrahl in gleichen Teilen in einen Mess- und einen Referenzstrahl aufteilt. Der Referenzstrahl wird an einem Referenzspiegel zum Strahlteiler zurückreflektiert. Der Weg von dem Strahlteiler zum Referenzspiegel ist der Referenzstrahlengang. Der Referenzstrahlengang hat eine nicht veränderbare Länge. Der Messtrahl wird zu dem Messobjekt geleitet, an dem dieser zum Strahlteiler zurück reflektiert wird. Der Weg zwischen Strahlteiler und Messobjekt ist der Messtrahlengang. Dieser kann in der Länge verändert werden, indem die Messeinheit in der Z-Achse verschoben wird. Vom Strahlteiler werden die zurückreflektierten Strahlen zum Detektor geleitet. Der Gangunterschied Δz zwischen dem Mess- und dem Referenzstrahlengang entscheidet, ob messbare Interferenzstreifen (Hell-Dunkel-Schwankungen) auftreten. Bei einem Gangunterschied Δz , welcher einem Vielfachen der Wellenlänge entspricht und gleichzeitig kleiner als die Kohärenzlänge ist, entsteht konstruktive Interferenz am Detektor. Wenn der optische Weg für einen Objektpunkt in Mess- und Referenzstrahlengang übereinstimmt, registriert das Detektorpixel eine maximale Intensität. Für Objektpunkte, die nicht diese Bedingung erfüllen, wird eine geringere Intensität registriert. Somit haben Objektpunkte mit derselben Höhe auch dieselbe Intensität auf dem Detektor. Dadurch wird eine Profiloberfläche des Objektes generiert. [21, 22]

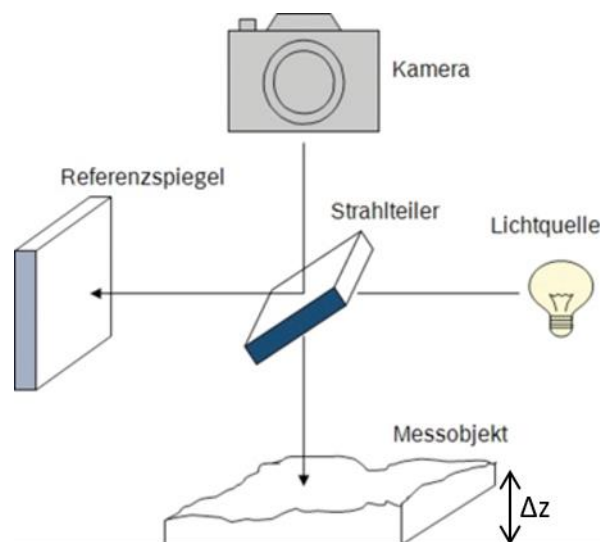


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers, wie es in Weißlichtinterferometern zum Einsatz kommt. Mit einer Lichtquelle und einem Strahlteiler, der das Licht in einen Mess- und Referenzstrahl aufteilt. Der Messtrahl wird auf das Messobjekt geleitet und dort zurückreflektiert. Der Referenzstrahl wird an einem Referenzspiegel zurückreflektiert. Beide Strahlen werden zu einem Detektor geleitet. [20]

3.3.2 Kippdistanzverfahren

Mit dem Kippdistanzverfahren werden für diesen Forschungsbericht die Schichtdicken von Materialien, die auf einem Wafer mit Spin Coating aufgebracht werden, gemessen. Bei dieser Methode wird der Wafer zunächst flach positioniert und dann auf dem WLI verkippt. Durch die Verkipfung erscheint die Projektion der Kohärenzlänge klein. Der Fokus ist im Kamerabild durch die Interferenzstreifen zu erkennen. Die Messung erfolgt nach dem Prinzip, welches in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Der Fokus des Kamerabildes wird zuerst auf die Wafer Oberfläche (P_1) gesetzt und die Z-Koordinate z_W wird gemessen. Anschließend wird die Z-Achse des WLIs nach oben bewegt, bis die Interferenzstreifen des Materials im gleichen Bereich des Kamerabildes zu sehen sind (P_{M2}). An dieser Stelle wird ebenfalls die Z-Koordinate z_M gemessen. Mit den Z-Koordinaten, dem Kippwinkel α und dem Brechungsindex des Materials n_M kann mit der Formel 3.3.1 die Schichtdicke des Materials H_M berechnet werden. [14]

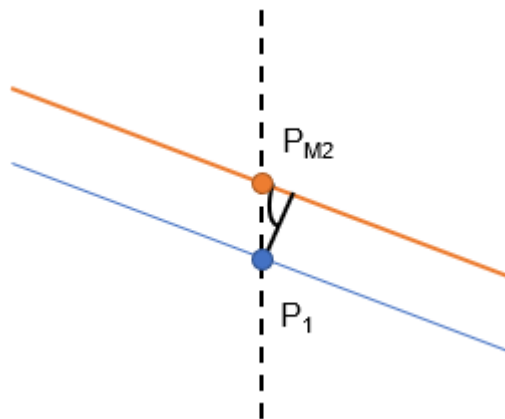


Abbildung 3.3: Kippdistanzverfahren. Der Punkt P_1 auf der Wafer Oberfläche und der Punkt P_{M2} auf der Oberseite des Materials werden gemessen. Der senkrechte Oberflächenabstand ist gleich dem vertikalen Abstand von P_1 zu P_{M2} multipliziert mit dem Cosinus des Kippwinkels. Die Brechungsindexkorrektur muss berücksichtigt werden. [14]

$$H_M = \frac{(z_M - z_W) \cdot \cos \alpha}{n_M} \quad (3.3.1)$$

Der Vorteil an dem Kippdistanzverfahren ist, dass ein sehr kleiner Bereich des Wafers gemessen wird. Außerdem ist der Messfehler aufgrund von Achsenbewegung und Rauheit der Wafer Oberfläche minimal, da nur die Z-Achseneinstellung verändert wird. Aus diesen Gründen hat das Kippdistanzverfahren eine kleinere Standardabweichung im Vergleich zu anderen Messmethoden mit dem WLI. Aufgrund der kleineren

Standardabweichung wird in diesem Forschungsbericht das Kippdistanzverfahren angewendet. [14]

4 Experimente

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Experimente behandelt. Dabei wird das jeweilige Ziel, die Vorbereitung, die Durchführung, die Ergebnisse und dessen Diskussion für die einzelnen Experimente aufgezeigt. Wenn nötig werden auch Vorversuche dargestellt. Es werden drei Experimente durchgeführt. Im ersten Experiment werden Strukturen im Mikrometerbereich mit einer 3D-gedruckten Gussform hergestellt, dabei wird direkt an die Ergebnisse aus dem ersten Forschungsbericht angeknüpft. Beim zweiten Experiment wird die Veränderung der Form des Sylgard 184 beim Aushärten gemessen. Im letzten und größten Experiment werden Strukturen im Nanometerbereich auf die abgeformte Linsenform aus dem ersten Forschungsbericht aufgebracht.

4.1 Modifizierung der Gussform

Im ersten Forschungsbericht wurden Gussformen mit Strukturen im Mikrometerbereich mit dem Keyence 3D Drucker für das Sylgard 184 (PDMS) hergestellt. Zunächst wurden Probleme bei der Aushärtung in dieser Gussform festgestellt, die bereits im ersten Forschungsbericht gelöst wurden. Ein weiteres Problem ist, dass die Strukturen beim Entfernen aus der Gussform abbrechen. In Abbildung 4.1 sind abgebrochene Strukturen unter dem Virtual Reality (VR) Mikroskop zu sehen. Das Hauptbild mit der eingezeichneten Profilmessung ist in Abbildung 4.1 a) und die Profilmessung selbst ist in Abbildung 4.1 b) zu sehen. Bei der Profilmessung ist mit einem roten Pfeil bei der vierten Struktur die konstruierte Höhe eingezeichnet. Wie zu sehen ist, ist die tatsächliche Höhe kleiner. In den Gussformstrukturen sind PDMS-Reste in den Strukturen vorzufinden. Dies lässt darauf schließen, dass die Strukturen abgebrochen sind und deshalb nicht die konstruierte Höhe besitzen. Dieses Experiment soll dazu führen, dass die PDMS-Strukturen nicht mehr beim Herauslösen aus der Gussform abbrechen.

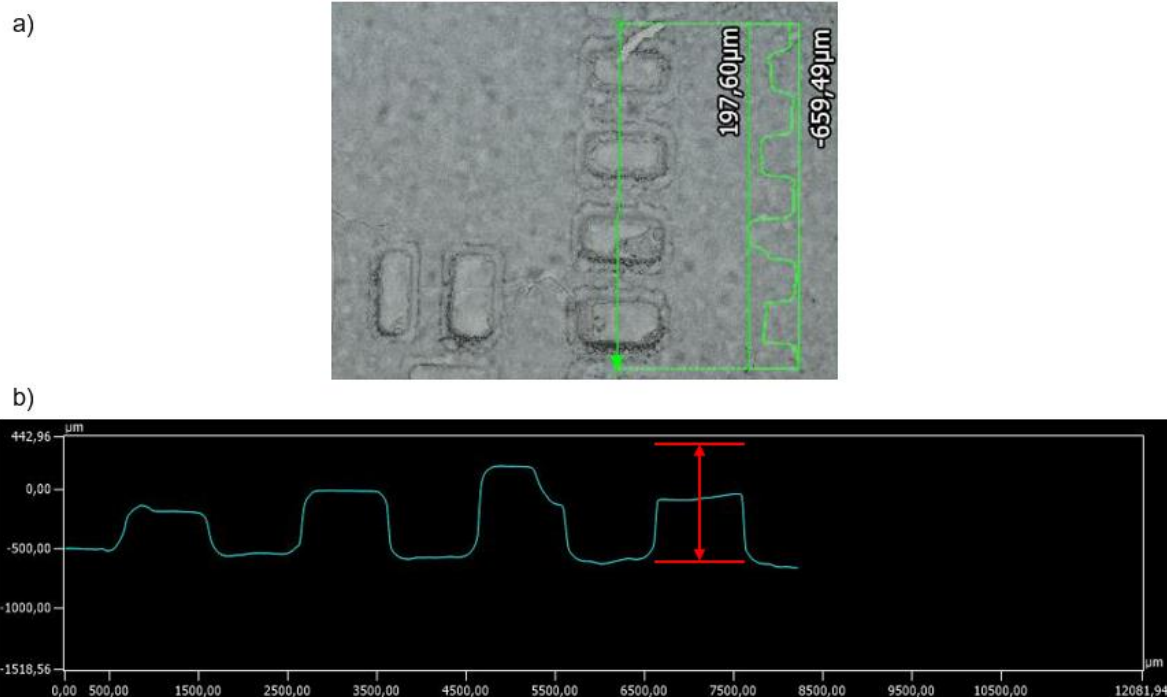


Abbildung 4.1: Abgebrochene Strukturen von ausgehärtetem PDMS unter dem VR-Mikroskop mit 25x Vergrößerung a) Hauptbild mit eingezeichneter Profilmessung b) Profilmessung mit rotem Pfeil für die konstruierte Höhe.

4.1.1 Fragen und Ziele

In diesem Experiment wird eine neue Gussform konstruiert, welche in Abbildung 4.2 dargestellt ist. Diese Gussform besitzt, im Gegensatz zu der bisherigen Gussform, nach außen gerichtete Strukturen, die mit Hohlräumen versehen werden. Das Ziel dieses Experiments ist es, dass durch die Hohlräume der Gussform-Strukturen diese Strukturen abbrechen und die PDMS-Strukturen vollständig bleiben. Dazu werden die Strukturen unter dem VR-Mikroskop vermessen.

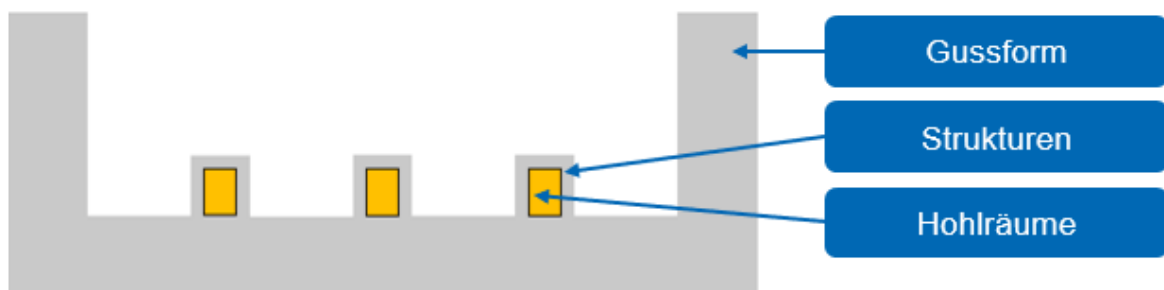


Abbildung 4.2: Skizzierte Darstellung der geplanten Gussform mit den Hohlräumen in den Strukturen

In diesem Experiment sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wird das Abbrechen der PDMS-Strukturen verhindert, wenn stattdessen die Strukturen der Gussform abbrechen?
- Führen Hohlräume in den Strukturen der Gussform zu den gewünschten Abbrüchen dieser Strukturen?
- Sind Hohlräume in den Strukturen der Gussform möglich?

4.1.2 Vorbereitung und Durchführung

Für dieses Experiment muss zunächst eine neue Gussform konstruiert werden. Dafür wird die Konstruktion der vorherigen Gussform nur leicht abgeändert. Die Konstruktion der vorherigen Gussform ist im ersten Forschungsbericht vorzufinden. Anstatt dass die Strukturen nach innen konstruiert werden, werden diese nun nach außen konstruiert. Außerdem werden die Strukturen mit Hohlräumen ausgestattet, sodass die Wanddicke der Strukturen nach links und rechts 0,1 mm und nach oben 0,2 mm betragen. In Abbildung 4.3 ist die Seitenansicht mit einem Schnitt durch die Mitte der Gussform zusehen. Durch den Schnitt sind die Hohlräume der Strukturen sichtbar. Die Gussform wird mit dem Keyence 3D-Drucker gedruckt. Die Funktionsweise des 3D-Druckers wurde bereits im ersten Forschungsbericht beschrieben. Es ist zu beachten, dass das Supportmaterial dieses Druckers wasserlöslich ist. Aus diesem Grund muss die Gussform nach dem Druck mit Wasser gesäubert werden, damit das Supportmaterial aufgelöst wird und die Hohlräume entstehen. Anschließend muss die Gussform für 80 min bei 100 °C vorbehandelt werden, damit das PDMS vollständig in der Gussform aushärten kann [23]. Um zu überprüfen inwieweit die Strukturen der Gussform durch die Hitze verändert werden, werden die Strukturen vor und nach der Hitzeeinwirkung unter dem VR-Mikroskop vermessen. Außerdem soll überprüft werden, inwiefern die Strukturen nach dem trennen von dem PDMS abbrechen und die Strukturen von dem PDMS abgeformt werden.

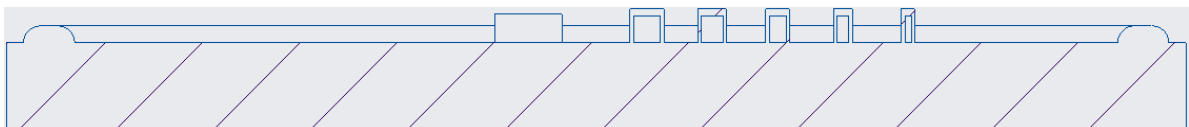


Abbildung 4.3: Konstruierte Gussform mit einem mittigen Schnitt und mit den Hohlräumen in den Strukturen

Wenn die Gussform soweit vorbereitet ist, wird das PDMS gewogen und gemischt. Es werden 5 g der Grundmasse mit 0,5 g des Härters abgewogen. Vermischt werden die beiden Komponenten des PDMS für 5 Minuten bei 500 rpm mit einem Magnetrührer.

Anschließend wird das Gemisch für 30 Minuten mittels Vakuum entgast, um dem Material die Luft zu entziehen. Somit kann das Material in die Gussform gegossen werden, ohne dass Luftblasen in dem Material sind. Das Material in der Gussform härtet 40 Minuten bei 100 °C aus. Abschließend wird das PDMS aus der Gussform entfernt und die Strukturen der Gussform und des abgeformten PDMS werden beide unter dem VR-Mikroskop vermessen.

4.1.3 Beobachtungen und Ergebnisse

Die ersten Beobachtungen werden bereits nach dem Druck der Gussform gemacht. In Abbildung 4.4 sind die Strukturen unter dem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung abgebildet. Die rot markierten Strukturen, die in X-Richtung angeordnet sind, weisen Verbindungen untereinander auf. Auch die kreisförmig angeordneten Strukturen (orange) weisen Verbindungen auf. Somit besitzt die Gussform nicht die Strukturen, die zuvor konstruiert wurden. Allerdings besitzen die in Y-Richtung angeordneten Strukturen (grün) keine Verbindungen. Also werden die einzelnen Strukturen in die Y-Richtung wie die Konstruktionsvorlage gedruckt.

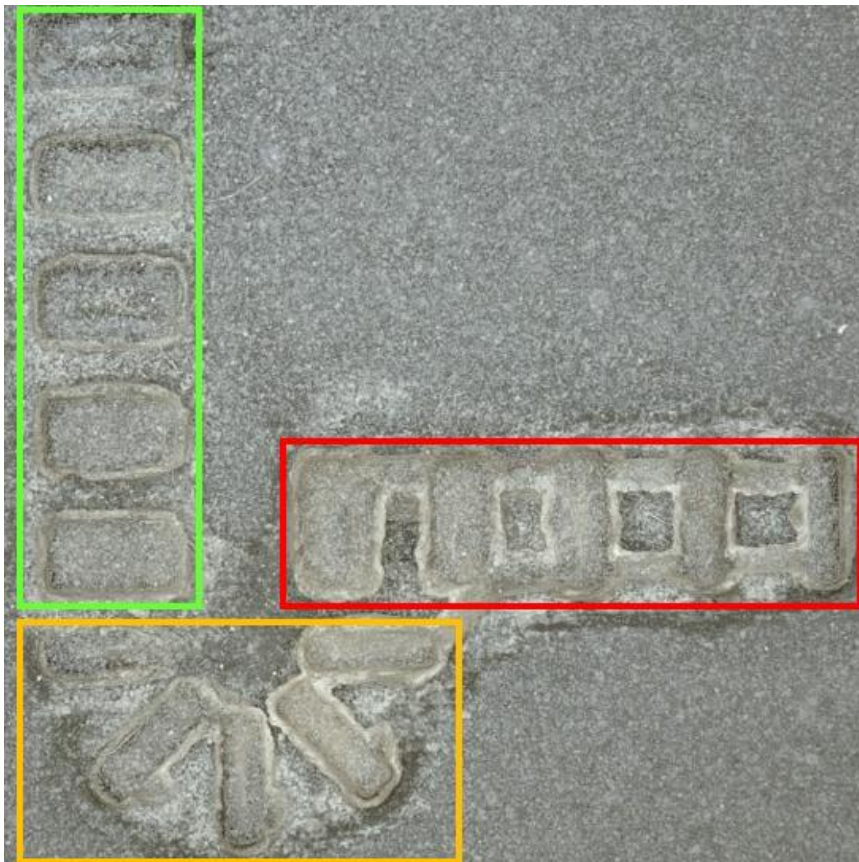


Abbildung 4.4: Strukturen der Gussform unter dem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung. Strukturen angeordnet in Y-Richtung sind grün markiert. Strukturen angeordnet in X-Richtung sind rot markiert und kreisförmig angeordnete Strukturen sind orange markiert.

Für einen Vergleich der Strukturen vor und nach der Hitzeentwicklung werden die grün markierten Strukturen vermessen. Die grün markierten Strukturen weisen keine Verbindungen und kaum Unregelmäßigkeiten in der Höhe der einzelnen Strukturen auf und sind damit für einen Vergleich besser geeignet, da nicht immer exakt dieselbe Stelle gemessen werden kann. In Abbildung 4.5 sind die Profilmessungen der ausgewählten Strukturen vor und nach der Hitzeentwicklung zu sehen, die mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung gemessen werden. Es ist zu erkennen, dass die Strukturen nach der Hitzeentwicklung kleine Veränderung aufweisen. Die erste und dritte Struktur von links besitzen keine gerade Oberfläche mehr, sondern zwei Erhöhungen. Außerdem weisen die Strukturen eine Neigung auf, wodurch die Positionen der Strukturen nicht übereinstimmen.

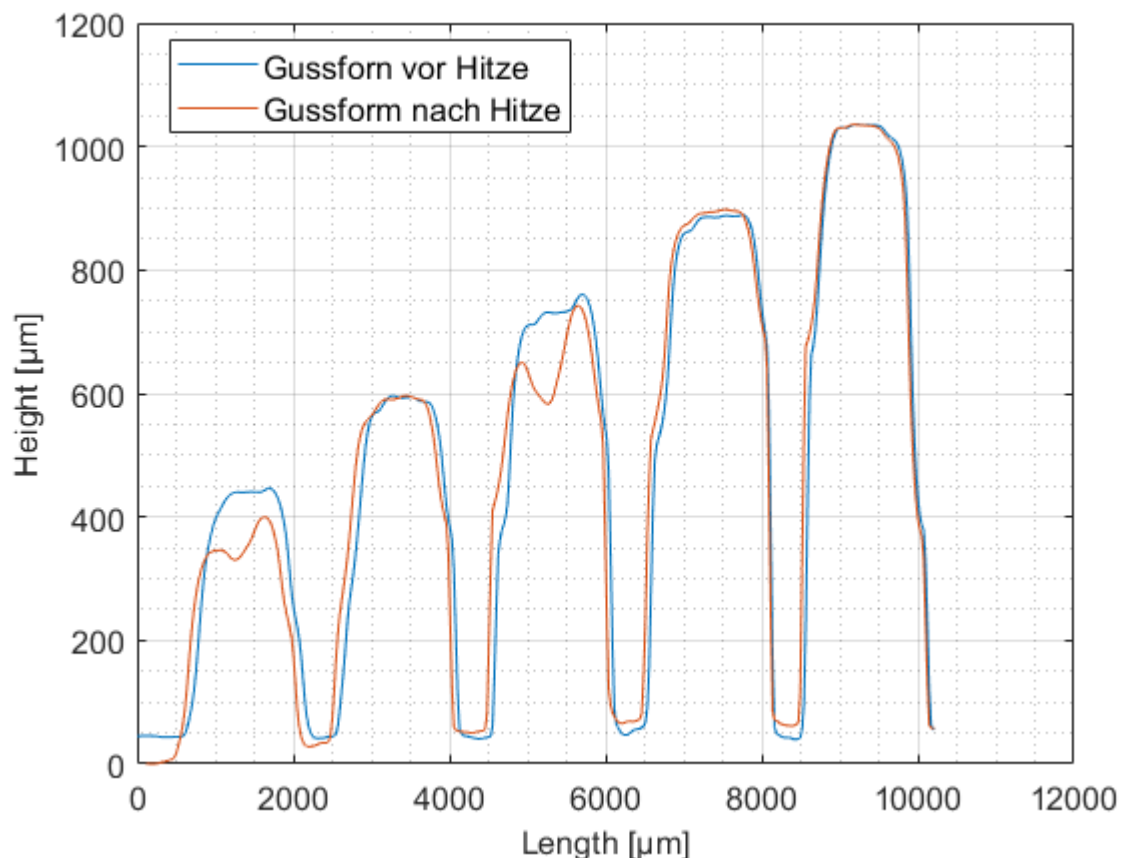


Abbildung 4.5: Profilmessungen der Strukturen der Gussform vor und nach der Hitzeentwicklung, gemessen mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung

In Abbildung 4.6 sind die Profilmessungen der Strukturen der Gussform vor und nach der Abformung mit PDMS zu sehen. Auch diese Messungen werden mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung durchgeführt. Es werden dieselben Strukturen

vermessen wie zuvor. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Strukturen sich von der Form kaum verändert haben nach der Abformung mit dem PDMS. Nur die Position der Strukturen hat sich leicht verändert, das auf eine andere Messposition zurückzuführen ist. Die erwarteten Abbrüche der Strukturen sind demnach nicht aufgetreten.

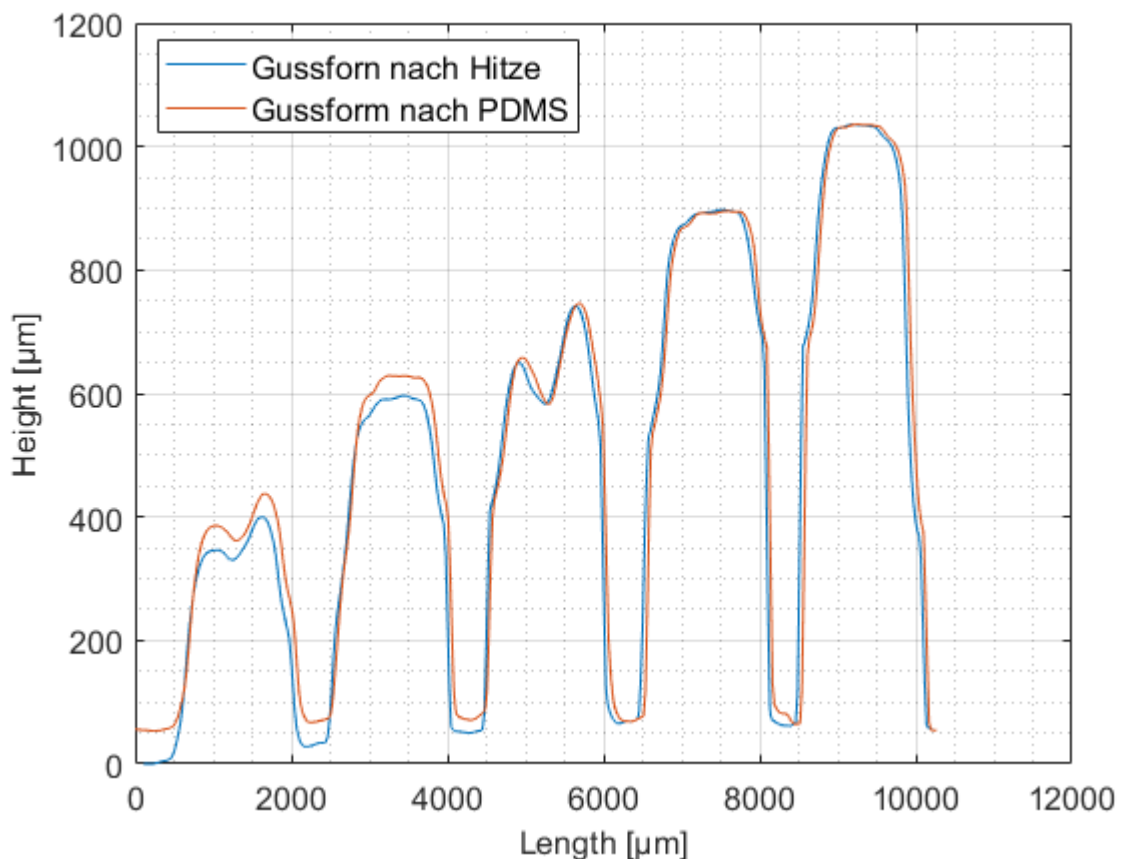


Abbildung 4.6: Profilmessungen der Strukturen der Gussform vor und nach der Abformung mit PDMS, gemessen mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung

Die Profilmessungen der Strukturen der Gussform nach der Abformung mit PDMS und der Strukturen des abgeformten PDMS sind in Abbildung 4.7 abgebildet. Auch diese Messungen werden mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung durchgeführt. Dass die Strukturen der Gussform nicht abgebrochen sind, ist bereits in Abbildung 4.6 zu sehen, dass aber auch die Strukturen des abgeformten PDMS vollständig sind, ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Die Strukturen des abgeformten PDMS stimmen mit den Strukturen der Gussform überein, nur die zweite Erhöhung der dritten Struktur wurde nicht korrekt abgeformt. Somit werden die Strukturen der Gussform mit dem PDMS

gut abgeformt, ohne dass die Strukturen der Gussform oder des PDMS abgebrochen sind.

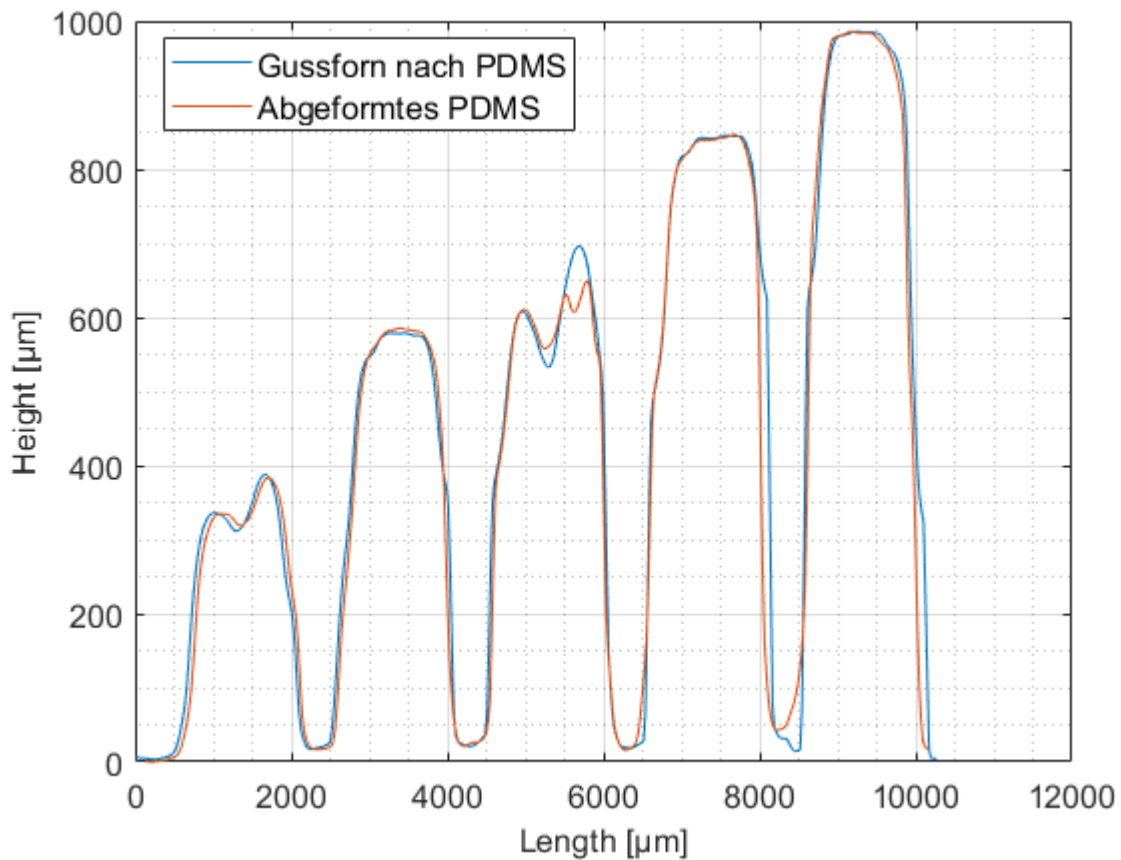


Abbildung 4.7: Profilmessung der Strukturen der Gussform nach der Abformung mit dem PDMS und die Profilmessung des abgeformten PDMS, gemessen mit einem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung

4.1.4 Diskussion der Ergebnisse

In X-Richtung sind die Strukturen der Gussform mit Material verbunden, in Y-Richtung ist das nicht der Fall. Das ist auf die Druckrichtung des 3D Druckers zurückzuführen. Der Druckkopf wird in X-Richtung bewegt, sodass Druckmaterialreste von einer Struktur zur anderen Struktur gezogen werden und somit Verbindungen der Strukturen in X-Richtung entstehen. [24]

Nach der Hitzeeinwirkung der Gussform ist die Form von zwei der fünf Strukturen leicht verändert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Druckmaterial AR-M2 eine Wärmeformbeständigkeit bis 54 °C aufweist [25]. Die Hitzeeinwirkung liegt bei 100 °C und überschreitet damit die Wärmeformbeständigkeit. Durch die Änderung der Form, aufgrund der Hitze, lässt sich auch die Neigung der Strukturen erklären.

Die PDMS Strukturen sind nach der Abformung vollständig. Diese Strukturen sind nun nach innen gerichtet und damit können auch keine Strukturen abbrechen. Auch die Strukturen der Gussform sind nach der Abformung nicht abgebrochen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Kohäsionskräfte der Moleküle der Gussform zueinander größer ist als die Adhäsionskräfte zu dem PDMS. Somit haften die Strukturen der Gussform nicht genug an dem PDMS um abgebrochen zu werden, sondern bleiben vollständig an der Gussform.

Trotz dessen, dass die Strukturen der Gussform mit dem PDMS gut abformt wurden, wird die 3D gedruckte Gussform mit den Strukturen im Mikrometerbereich nicht weiterverwendet. Der Grund dafür ist, dass die Strukturen der Gussform nach außen gerichtet sein müssen, damit die PDMS Strukturen nicht abbrechen. Wenn die Strukturen allerdings nach außen gerichtet sind, werden beim 3D Druck Unregelmäßigkeiten und Verbindungen zwischen den Strukturen festgestellt, die durch die Druckrichtung entstehen. Außerdem werden manche der Gussform-Strukturen durch die Hitzeeinwirkung verändert und schlussendlich sind die Strukturen nicht so kantig wie diese konstruiert wurden.

4.2 Verformung der PDMS-Form

Im ersten Forschungsbericht wurden PDMS-Formen durch das Abformen eines Linsenrohlings hergestellt. Beim Aushärten kommt es zu einem Schrumpf des PDMS, wodurch die Form nicht mehr exakt mit dem Linsenrohling übereinstimmt. In diesem Experiment wird die Formabweichung der PDMS-Form von der ursprünglichen Linsenform ermittelt.

4.2.1 Fragen und Ziele

Das Ziel dieses Experimentes ist, die Formänderung der PDMS-Form aufgrund des Schrumpfes zu ermitteln. Die Ermittlung der Formänderung ist nötig, um die Qualität der Stempelform zu bewerten. Damit die Formänderung ermittelt werden kann, muss außerdem das Ende der Vulkanisationsreaktion des PDMS bestimmt werden. Somit sollen in diesem Experiment folgende Fragen geklärt werden:

- Ist die Vulkanisation des PDMS nach der angegebenen Aushärtezeit vorbei?
- Wie hoch ist die Änderung der abgeformten PDMS-Form, nach dem Aushärten, im Vergleich zur Form des Linsenrohlings?
- Ändert sich die Form nach einer zweiten Hitzeeinwirkung?

4.2.2 Vorversuch: Refraktometer Messung

Die Ermittlung des Endes der Vulkanisationsreaktion des PDMS ist nötig, um die abzuwartende Zeit zwischen Aushärtung und Schrumpfmessung zu bestimmen. Dazu wird mit einem Refraktometer die Änderung des Brechungsindex während und nach der Aushärtung ermittelt. Wenn der Brechungsindex sich kaum bis gar nicht mehr verändert bedeutet das, dass die Reaktion abgeschlossen ist, bzw. zum größten Teil abgeschlossen ist. Danach wird sich der Schrumpf des PDMS nicht nennenswert weiter verändern.

Als erstes wird die Veränderung des Brechungsindex bei vier verschiedenen Aushärtungstemperaturen gemessen. Die vier Aushärtungstemperaturen sind 25, 40, 60 und 80 °C. Es werden diese vier Temperaturen gemessen, um eine Aussage über die Veränderung des Brechungsindex im Verhältnis zur Temperatur zu treffen. Die gemessenen Brechungsindexe sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Temperatur der Brechungsindex sinkt. Außerdem ist bei allen vier Aushärtungstemperaturen ein asymptotischer Verlauf der Brechungsindex Kurve zu erkennen. Anfangs steigt der Brechungsindex stark an und anschließend nähert er

sich einem Grenzwert an. Wobei der anfänglicher Anstieg des Brechungsindex mit höherer Temperatur schneller verläuft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Aushärtung des PDMS mit einer höheren Temperatur schneller verläuft. Nach dem steilen Anstieg nähert sich der Brechungsindex einem jeweiligen Grenzwert an, dies deutet darauf hin, dass zu diesem Zeitpunkt die Vulkanisation ganz oder zum größten Teil abgeschlossen ist.

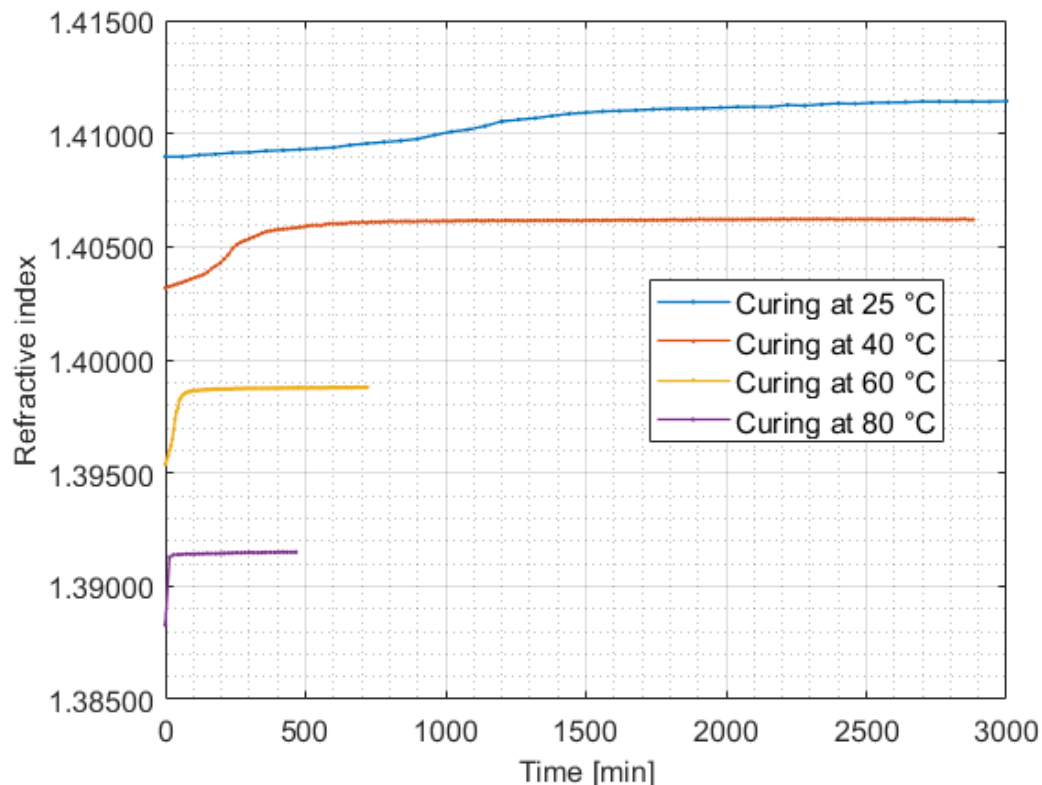


Abbildung 4.8: Die Veränderung des Brechungsindexes von Sylgard 184 während der Aushärtung bei 25, 40, 60 und 80 °C, gemessen mit einem Refraktometer

Die Aushärtung des PDMS soll bei 80 °C stattfinden, da dadurch die Aushärtezeit geringgehalten werden kann. Um sicherzustellen, dass der Verlauf des Brechungsindex und damit das Ende der Vulkanisation des PDMS bei 80 °C reproduzierbar ist, wird die Messung bei 80 °C noch drei Mal an unterschiedlichen Tagen wiederholt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Es sind leichte Unterschiede bei der Höhe des Brechungsindex zwischen den einzelnen Messungen zu erkennen. Da allerdings dn/dt betrachtet wird, ist die Höhe des Brechungsindex nicht von Bedeutung. Der Verlauf von dn/dt sind bei allen ähnlich. Zunächst ein steiler Anstieg und ab den Minuten 50 bis 60 nähern sich die Kurven einem Grenzwert an.

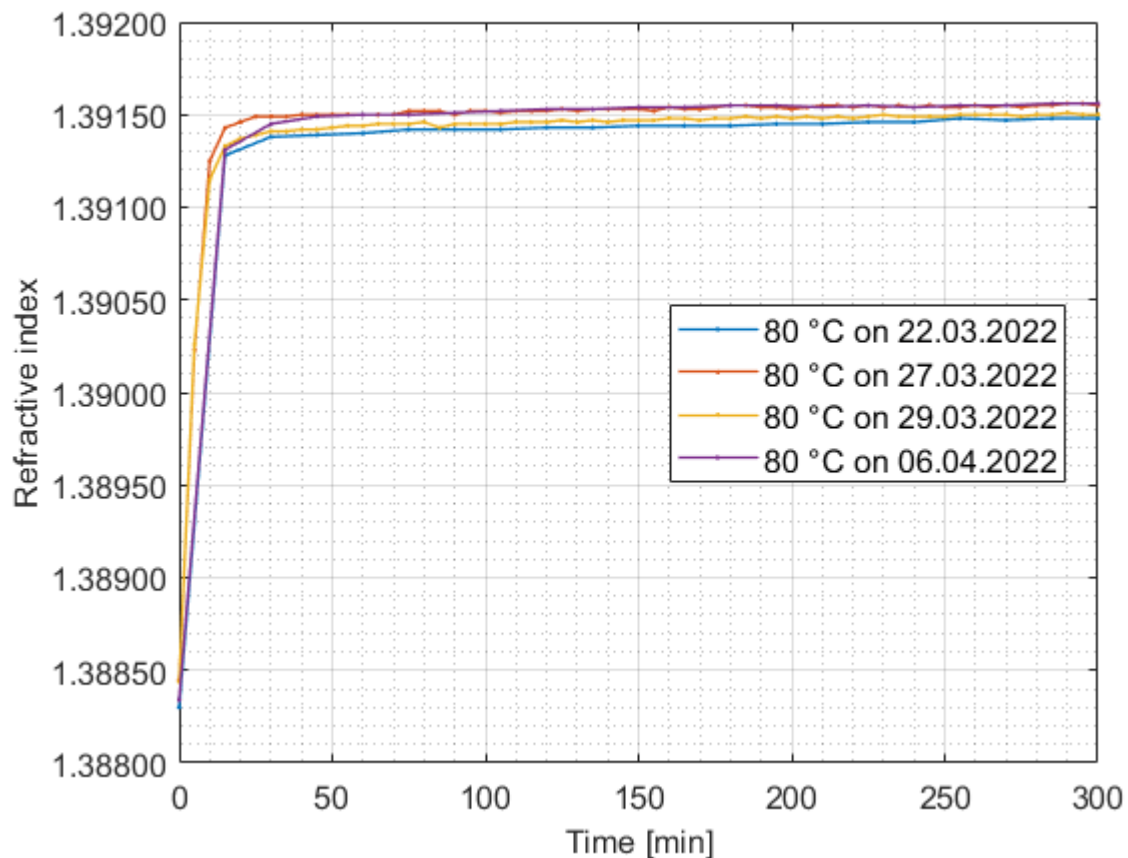


Abbildung 4.9: Die Veränderung des Brechungsindexes von Sylgard 184 während der Aushärtung bei 80 °C an unterschiedlichen Tagen, gemessen über die Zeit mit einem Refraktometer.

Im nächsten Versuch wird die Änderung des Brechungsindexes bei 80 °C über einen längeren Zeitraum von 108 Stunden gemessen. Diese längere Messung wird durchgeführt, um den Langzeitverlauf zu untersuchen und sicherzustellen, dass keine weitere Änderung stattfindet. Eine große Änderung würde bedeuten, dass die Vulkanisation nicht nach den 50 bis 60 Minuten zum größten Teil abgeschlossen ist. In Abbildung 4.10 ist das Ergebnis der Langzeitmessung zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Gerade nach dem starken Anstieg weiter leicht steigt und sich keinem Wert annähert, aber es ist kein weiterer steiler Anstieg zu erkennen. Somit ist davon auszugehen, dass die Vulkanisation des PDMS nach 50 bis 60 Minuten abgeschlossen ist. Dies bedeutet, dass nach diesem Zeitraum auch kein weiterer Schrumpf des PDMS zu erwarten ist.

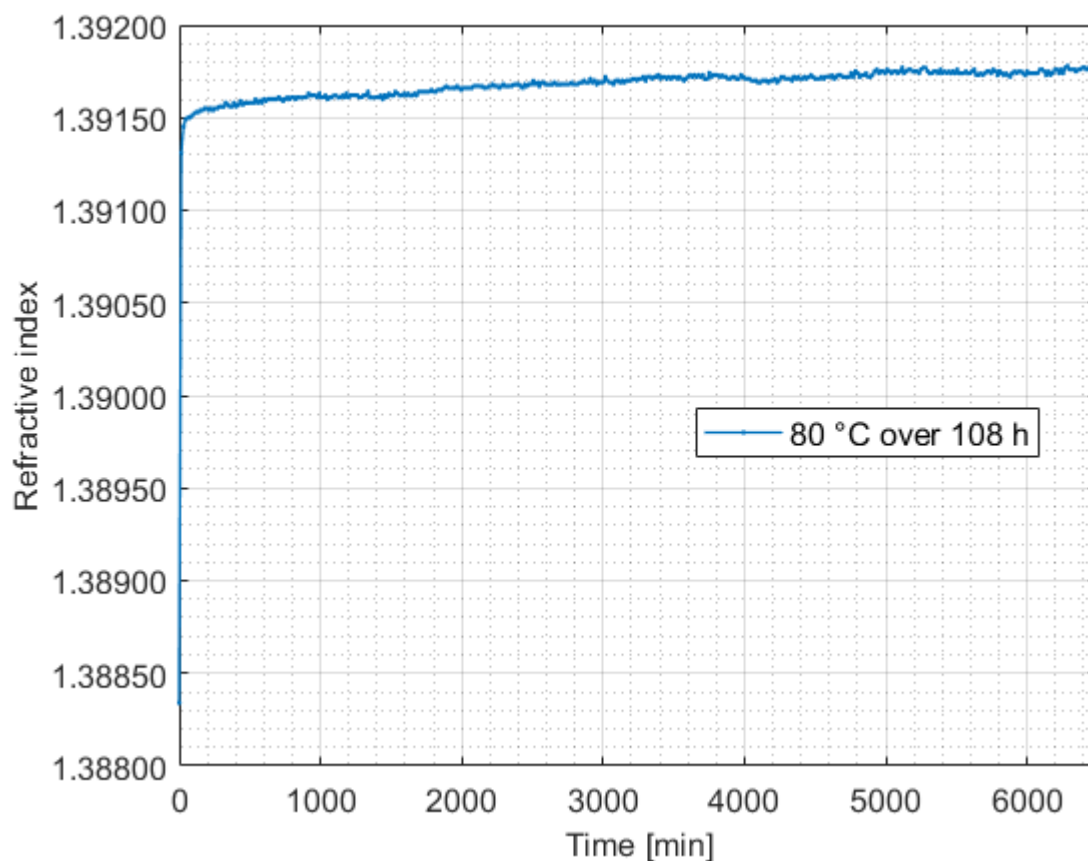


Abbildung 4.10: Veränderung des Brechungsindexes von Sylgard 184 während der Aushärtung bei 80 °C über 108 Stunden, gemessen mit einem Refraktometer.

Die Messungen der PDMS-Form erfolgen nicht bei 80 °C, aus diesem Grund muss ermittelt werden, ob die Abkühlung des PDMS nach der Aushärtung bei 80 °C noch Auswirkungen auf den Brechungsindex hat. Erst wenn der Wert des Brechungsindex keine starken Schwankungen hat, ist das PDMS soweit stabil, dass der Schrumpf stabil und reproduzierbar ist. Im nächsten Versuch wird das PDMS bei 80 °C ausgehärtet und anschließend wird die Temperatur des Refraktometers auf 25 °C geändert. Die Messung des Refraktometers beginnt, sobald das Refraktometer von den 80 °C auf die 25 °C abgekühlt ist. Die gemessenen Werte sind in Abbildung 4.11 mit blauen Punkten dargestellt. Die gemessenen Werte schwanken stark. Grund hierfür ist vermutlich ein Diskretisierungsfehler. Aufgrund der Schwankungen wird ein Durchschnittsfilter angewendet mit einer Filterbreite von 3. Die gefilterten Werte sind in der Abbildung 4.11 mit einer orangenen Linie eingetragen. Die Schwankungen sind nicht gänzlich verschwunden, aber der Verlauf ist dennoch deutlicher als bei den ungefilterten Messwerten zu erkennen. Bei der Abkühlung des PDMS auf die 25 °C steigt der Brechungsindex anfangs an. Nach ca. 500 Minuten ist der Anstieg vorbei

und die Werte schwanken um einer Gerade mit sehr geringem Anstieg. Somit ist das PDMS nach einer Abkühlung von 500 Minuten stabil.

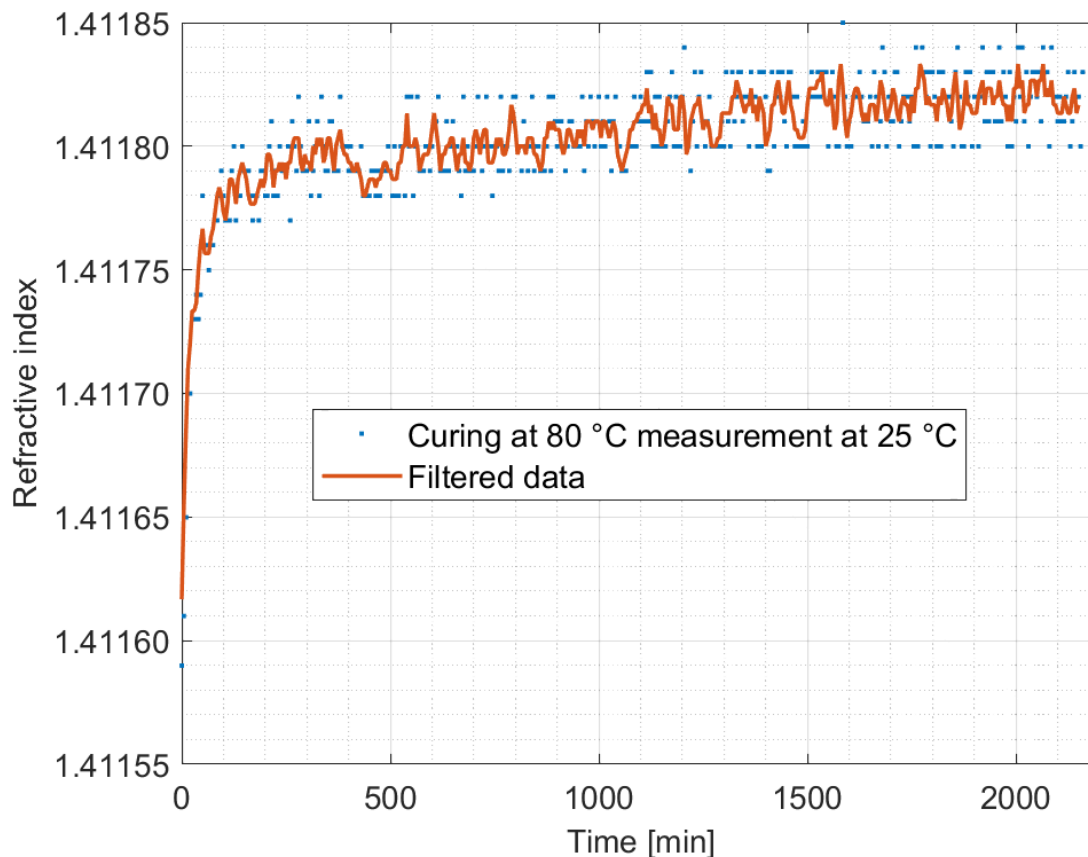


Abbildung 4.11: Die Veränderung des Brechungsindexes von Sylgard 184 über die Zeit, gemessen mit einem Refraktometer. Das Sylgard 184 wurde bei 80 °C ausgehärtet und wird anschließend auf 25 °C abgekühlt. Die Messung beginnt ab der Temperaturänderung auf 25 °C. Die Messpunkte werden in blau dargestellt und in orange die Werte gefiltert mit einem Durchschnittsfilter mit der Filterbreite 3.

Mit den Refraktometer Messungen wurde die Aushärtezeit bei 80 °C und die Abkühlzeit ermittelt, nach denen die Vulkanisation abgeschlossen und kein weiterer starker Anstieg des Brechungsindexes des PDMS zu messen ist. Nach der Ermittlung dieser Werte, kann die eigentliche Messung der Formänderung erfolgen.

4.2.3 Durchführung

Für die Schrumpfmessung wird das Profil durch den Apex des Linsenrohrlings mit einem VR-Mikroskop gemessen, mit diesem Profil wird das abgeformte PDMS verglichen, um den Schrumpfung zu ermitteln. Zur Abformung des Linsenrohrlings wird die Metallform verwendet, die bereits im ersten Forschungsbericht vorgestellt wurde. Das PDMS wird in einem Verhältnis von 10:1 abgewogen und für 5 Minuten bei 500 rpm mit einem Magnetrührer vermischt. Anschließend wird das PDMS in die Gussform

gegossen und für 40 Minuten einer Vakuumbehandlung unterzogen, um die Luft aus dem Material zu entfernen und Luftblasen zu verhindern. Danach wird das PDMS bei 80 °C in einem Ofen ausgehärtet. Um sicherzustellen, dass die Aushärtung vollständig ist, beträgt die Aushärtezeit 70 Minuten. Nach der Aushärtung wird das PDMS aus der Gussform entfernt. Über die Nacht kann das PDMS abkühlen, somit sind in jedem Fall die 500 Minuten Abkühlzeit eingehalten. Am nächsten Tag wird von dem abgeformten PDMS das Profil durch den niedrigsten Punkt mit dem VR-Mikroskop gemessen. Diese Messung wird mit der Messung des Linsenrohlings verglichen. Im Normalfall wird ein Wafer auf die PDMS Form aufgebracht, wodurch die PDMS-Form erneut Hitze ausgesetzt wird. Um möglichen weiteren Schrumpf zu ermitteln wird das PDMS erneut in den Ofen bei 80 °C für 70 Minuten gestellt. Erneut wird eine Nacht abgewartet und das Profil durch den niedrigsten Punkt erneut am nächsten Tag mit dem VR-Mikroskop vermessen. Erneut wird die Messung mit dem Linsenrohling und mit der Messung nach einmaliger Hitzeeinwirkung verglichen. Um die Reproduzierbarkeit sicherzustellen wird dieser Versuch drei Mal durchgeführt.

4.2.4 Beobachtungen und Ergebnisse

Die Profilmessungen des Linsenrohlings und der drei abgeformten PDMS-Formen, nach der ersten Hitzeeinwirkung, sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Hochpunkte der drei Formen und des Linsenrohlings sind in dem Diagramm auf derselben Position. Die Formen der drei PDMS-Formen (grün, violett, türkis) weichen leicht voneinander und von der Form des Linsenrohlings (blau) ab. Dabei ist auffällig, dass die PDMS-Formen oberhalb der Form des Linsenrohlings verlaufen. Nur die erste abgeformte PDMS-Form (grün) schneidet bei der Länge von 8000 µm und der Höhe 350 µm die Profillinie des Linsenrohlings und verläuft anschließend unterhalb.

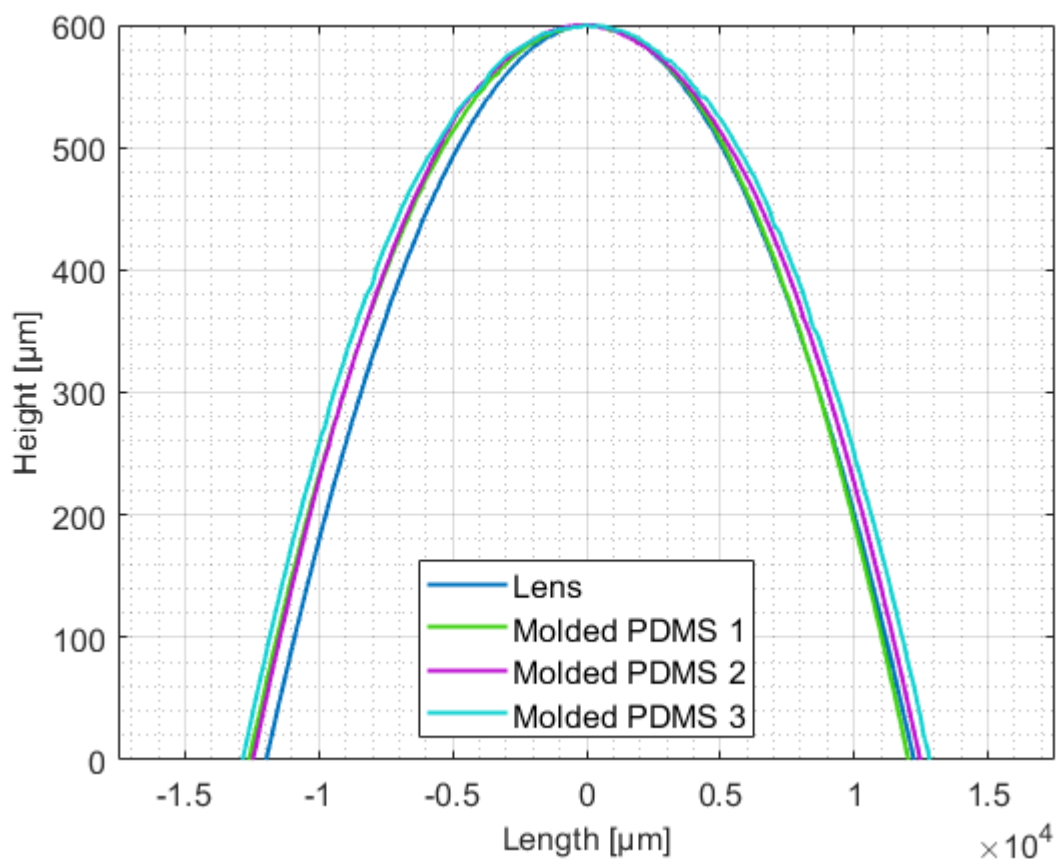


Abbildung 4.12: vergleich der Profilmessungen des Linsenrohlings mit drei PDMS-Abformungen, gemessen mit dem VR-Mikroskop mit 12x Vergrößerung.

Um die Formänderung der PDMS-Formen im Vergleich zu der Linsenform zu ermitteln, wird die Differenz der jeweiligen Formen berechnet. In Abbildung 4.13 sind die Differenzen der jeweiligen PDMS-Formen zur Linsenform zu sehen. Die Differenz von dem ersten abgeformten PDMS ist in Abbildung 4.13 a), von dem zweiten abgeformten PDMS in Abbildung 4.13 b) und von dem dritten abgeformten PDMS in Abbildung 4.13 c) abgebildet. Für den Vergleich wird der Hochpunkt aller PDMS-Formen und der Linsenform auf einen Punkt gesetzt. Aus diesem Grund beträgt die Differenz bei allen PDMS-Formen an der X-Position null gleich null. Die Differenz ist am Anfang bei den drei PDMS-Formen zwischen 50 und 100 μm und nimmt dann bis zu der Nullposition ab. Nach dem Nullpunkt nimmt die Differenz bei der ersten PDMS-Form nur leicht zu und ist bei der Länge von 8000 μm wieder Null. Dies ist an dem Punkt, an dem die Form des PDMS die Form der Linse schneidet. Nach dieser Schnittstelle nimmt die Differenz wieder zu. Im Gegensatz dazu steigt die Differenz bei der zweiten abgeformten PDMS-Form direkt nach dem Nullpunkt bis zu einer Länge von 10.000 μm . Anschließend nimmt die Differenz wieder leicht ab, aber wird nicht erneut null. Bei

der dritten abgeformten PDMS-Form steigt die Differenz nach dem Nullpunkt ebenfalls und wird auch nicht mehr kleiner. Die Mittelwerte der Differenzen sind jeweils mit einer roten Linie in Abbildung 4.13 eingezeichnet.

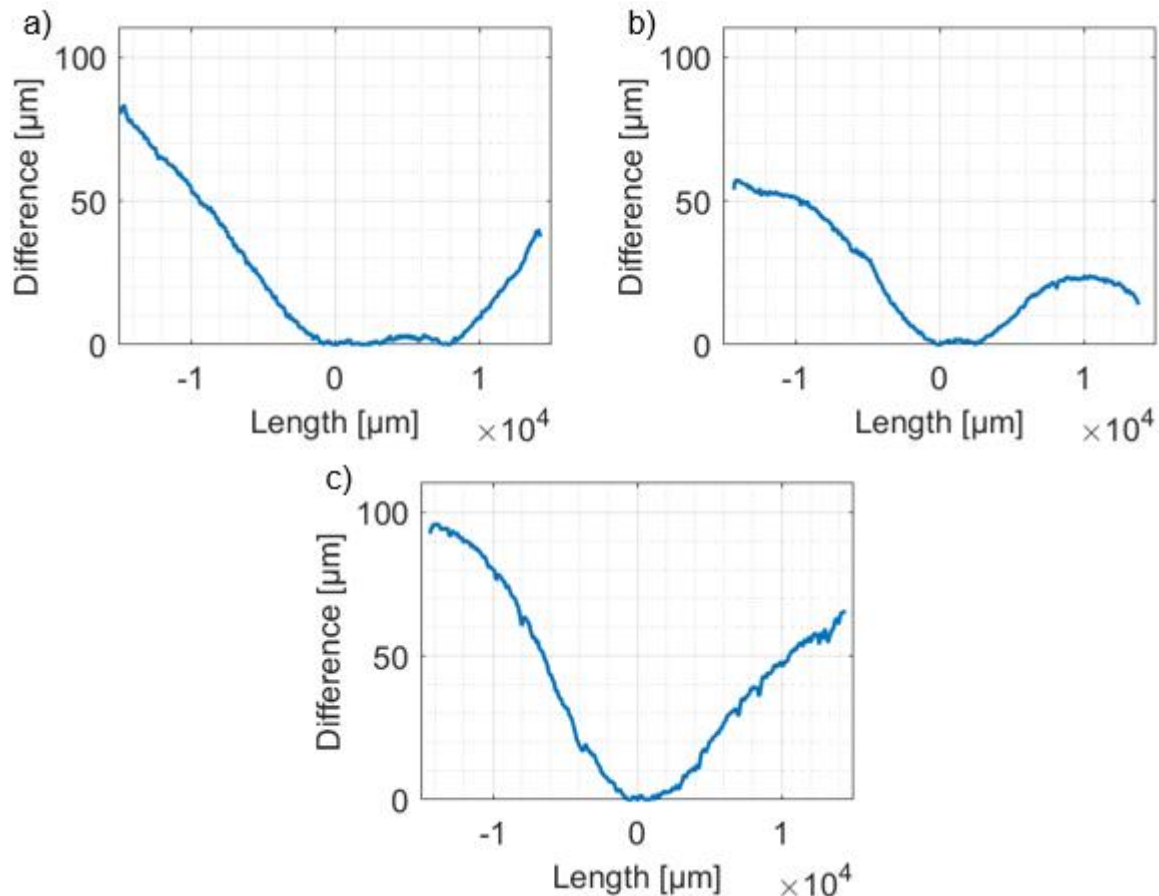


Abbildung 4.13: Differenz zwischen der Linsenform und a) der ersten, b) der zweiten und c) der dritten abgeformten PDMS-Form nach der Aushärtung.

Nach der zweiten Hitzeeinwirkung wird das PDMS erneut gemessen. Die einzelnen Abbildungen mit der jeweiligen PDMS-Form vor und nach der zweiten Hitzeeinwirkung und der Linsenform sind in Anhang A zu finden. Die Differenzen jeweils zwischen den einzelnen PDMS-Formen nach der zweiten Hitzeeinwirkung und der Linsenform sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Die Differenz von der ersten PDMS-Form ist in Abbildung 4.14 a), von der zweiten PDMS-Form in Abbildung 4.14 b) und von der dritten PDMS-Form in Abbildung 4.14 c) abgebildet. Wieder sind die Positionen von den jeweiligen PDMS-Formen und der Linsenform im Nullpunkt gleich, wodurch die Differenz am Nullpunkt null beträgt. Anders als nach der ersten Hitzeeinwirkung nimmt die Differenz nach der zweiten Hitzeeinwirkung nicht zum Nullpunkt ab und danach wieder zu. Nach der zweiten Hitzeeinwirkung verläuft die Differenz bei allen PDMS-Formen

unregelmäßiger und ist mindestens zwei Mal null. Die Nullstellen zeigen Berühr- oder Schnittpunkte mit der Linsenform.

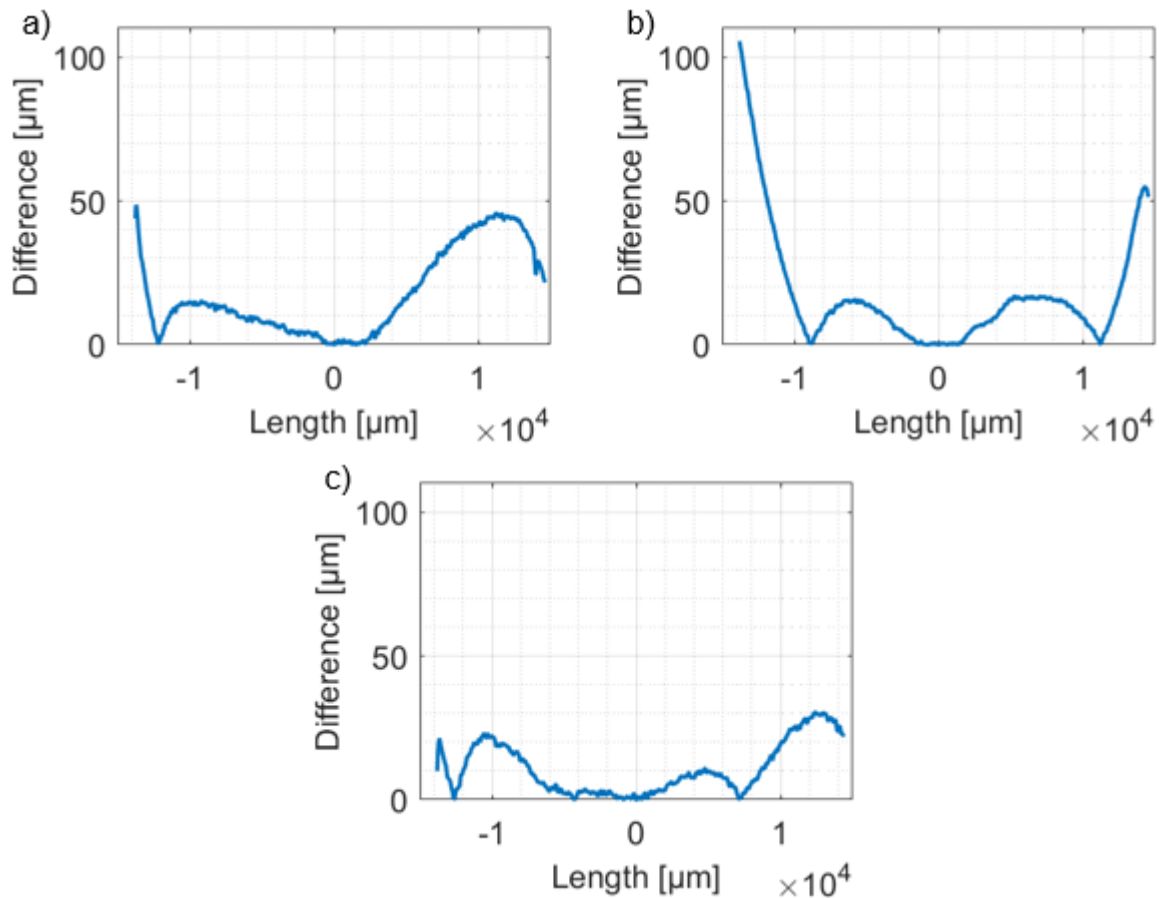


Abbildung 4.14: Differenz zwischen der Linsenform und a) der ersten, b) der zweiten und c) der dritten abgeformten PDMS-Form nach der zweiten Hitzeinwirkung.

4.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Nach der ersten Hitzeinwirkung ist die Form der zweiten und dritten PDMS-Abformung breiter, als die Linsenform. Dies ist zu erwarten, da bei der Aushärtungsreaktion die Moleküle des PDMS neu verknüpft werden und das führt zu einem Schrumpf. Durch diesen Schrumpf wird die Form breiter. Durch die zweite Hitzeinwirkung sollte die Form entweder gleichbleiben oder noch weiter verformt (breiter) werden. Dies ist nicht eingetreten. Die Differenzen haben sich bei allen drei PDMS-Formen verkleinert. Das bedeutet, dass die PDMS-Formen näher an der Linsenform anliegen. Allerdings wird die Linsenform häufiger berührt oder geschnitten. Somit ist die Oberfläche nach der zweiten Hitzeinwirkung soweit verändert, dass die Form nicht breiter wird, sondern komplett verändert wird. Eine Schnittstelle tritt

allerdings bereits nach der ersten Hitzeeinwirkung bei der ersten abgeformten PDMS-Form auf. Das könnte ein Hinweis dafür sein, dass bei der VR-Messung nicht direkt der niedrigste Punkt der Form ermittelt wird und die Profilmessung somit leicht verschoben ist. Wenn die Profilmessung nicht durch den niedrigsten Punkt verläuft kann diese nicht mit der Profilmessung der Linse übereinstimmen. Es ist davon auszugehen, dass dies bei den Messungen nach der zweiten Hitzeeinwirkung und bei der ersten PDMS-Form auch nach erster Hitzeeinwirkung passiert ist. Somit sind nur die Messungen nach der ersten Hitzeeinwirkung der zweiten und dritten PDMS-Form richtig gemessen. Bei diesen Messungen liegen die Mittelwerte der Differenzen allerdings weit auseinander. Dennoch ist zu sagen, dass die Differenz niemals 100 μm überschreitet und somit relativ gering ist.

4.3 Nanostrukturen

In diesem Experiment wird eine Folie mit Nanostrukturen aus UV-PDMS hergestellt. Diese Folie wird anschließend auf die PDMS-Form aufgebracht. Aufgrund des Umfangs dieses Experiments wird dieses in drei Teilversuche aufgeteilt. Der erste Teilversuch besteht darin eine Kurve mit den Schichtdicken bei unterschiedlichen Schleuderdrehzahlen beim Spin Coating des UV-PDMS zu erstellen. Anschließend wird im zweiten Teilversuch eine UV-PDMS-Folie hergestellt und mithilfe des Smart NIL Prozesses mit Nanostrukturen versehen. Der Letzte Teilversuch besteht darin mit unterschiedlichen Herangehensweisen die strukturierte Folie auf die PDMS-Form aufzubringen, ohne das Falten entstehen oder die Strukturen zerstört werden.

4.3.1 Rotationsbeschichtung mit UV-PDMS

Die Schichtdicken von dem UV-PDMS KER-4690 bei definierten Prozessparametern muss bekannt sein, um zuverlässig Nanostrukturen eines Masters abformen zu können. Die Schichtdicke muss hoch genug sein, um die tiefste Struktur vollständig abzuformen und eine Folie herzustellen, die nicht aufgrund einer zu geringen Schichtdicke reißt. Dennoch darf die Schichtdicke nicht zu hoch sein, da eine dünne Folie beim Aufbringen auf die PDMS-Form flexibler ist und weniger Falten wirft. Für die Prozessparameter beim Smart NIL-Prozess ist die Schichtdicke ebenfalls von Bedeutung. Aus diesen Gründen muss die Schichtdicke bekannt und reproduzierbar sein. In diesem Experiment werden die Prozessparameter des Spin-Coating-Prozesses anhand der Schichtdicke des UV-PDMS analysiert und bewertet.

4.3.1.1 Fragen und Ziele

In diesem Experiment werden die Parameter des Spin Coating variiert und die Schichtdicke des UV-PDMS gemessen. Bekannte Parameterkombinationen von Schleuderdrehzahl, Schleuderzeit und Dosis der UV-Belichtung zum Aushärten werden aus dem Materialdatenblatt als Referenz entnommen. Die Analyse der selbsterzeugten Schichtdicken ist notwendig, da der verwendete Spin Coater, menschliche Einflüsse und Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Feuchtigkeit und Luftzirkulation einen Einfluss auf die Schichtdicke haben. Die gemessene Schichtdickenkurve wird in Abhängigkeit der Schleuderdrehzahl aufgetragen. Es sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Schleuderdrehzahl und -zeit ist für bestimmte Schichtdicken erforderlich?

- Wird die Schichtdicke mit steigender Schleuderdrehzahl kleiner?
- Ist die minimale Schichtdicke begrenzt?

4.3.1.2 Vorbereitung und Durchführung

In diesem Experiment wird die Schleuderdrehzahl bei gleicher Schleuderzeit variiert. Es werden die Schleuderdrehzahlen 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm und 3000 rpm bei einer Schleuderzeit von 30 s überprüft. Die gewählten Parameter, mit den erwarteten Schichtdicken aus dem Datenblatt, sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Spin Coating Parameter

Schleuderdrehzahl [rpm] für 30 s	500	1000	2000	3000
Erwartete Schichtdicke [μm]	145	75	35	25

Bevor der 4 inch Si-Wafer beschichtet wird, wird dieser mit Isopropanol gereinigt und gebacken. Die Vorgehensweise wird in Kapitel 3.1 genau erläutert. Zur besseren Haftung wird normalerweise ein HMDS-Primer verwendet. Beim Herstellen der UV-PDMS-Folie soll das UV-PDMS von dem Wafer abgezogen werden. Damit dies nicht erschwert wird, wird kein Primer zur besseren Haftung verwendet. Damit alle Prozessparameter gleich sind, wird auch beim Ermitteln der Schichtdicke kein Primer genutzt. Die genutzten Prozessparameter, für die Ermittlung der Schichtdicke des UV-PDMS, sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die Variation der Schleuderzahl beim schnellen schleudern sind aus Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Tabelle 4.2: Prozessparameter von der Schichtdickenermittlung von UV-PDMS KER-4690

Prozess	Parameter	Einstellungen
Spin Coating UV-PDMS	Volumen [ml]	0,6-0,7
Dosieren, schnelles schleudern	Schleuderdrehzahl [rpm], Zeit [s]	500, 10
	Schleuderdrehzahl [rpm], Zeit [s]	Variiert, 30
Belichtung	Dosis [mJ/cm]	2000
Aushärten bei Raumtemperatur	Zeit [h]	24

Insgesamt werden die vier Schleuderdrehzahlen in je drei Durchläufen durchgeführt. Die drei Durchläufe werden an unterschiedlichen Tagen ausgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu testen. Die resultierenden Schichtdicken werden mit dem WLI gemessen. Dabei wird das Kippdistanzverfahren angewendet, welches in Kapitel 3.3.2 erklärt wird. Bei der Ermittlung der Schichtdicke muss der Brechungsindex des UV-PDMS berücksichtigt werden. Da bei einem WLI mit breitbandigem Licht gemessen wird, wird der Brechungsindex bei der mittleren Wellenlänge verwendet. Der Brechungsindex von dem UV-PDMS bei der mittleren Wellenlänge beträgt 1,42 [26].

4.3.1.3 Beobachtungen und Ergebnisse

Jede Probe der drei Durchläufe wird drei Mal mit dem Kippdistanzverfahren gemessen. Aus diesen drei Messungen werden jeweils ein Mittelwert der Schichtdicke und eine Standardabweichung berechnet. Die Ergebnisse aller Proben sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Außerdem sind die Mittelwerte mit den Standardabweichungen in Abbildung 4.15 graphisch dargestellt. Zur besseren Übersicht werden vier Graphen, einen je Schleuderdrehzahl, dargestellt. In der Abbildung 4.15 a) sind die Werte der drei Durchläufe bei einer Schleuderdrehzahl von 500 rpm, in Abbildung 4.15 b) von 1000 rpm, in Abbildung 4.15 c) von 2000 rpm und in Abbildung 4.15 d) von 3000 rpm. In diesen Abbildungen ist zu sehen, dass die Mittelwerte mit den Standardabweichungen der drei Durchläufe für die jeweilige Schleuderdrehzahl sich überschneiden. Bei dem Vergleich der Standardabweichungen der unterschiedlichen Schleuderdrehzahlen in einem Durchlauf ist zu erkennen, dass die Standardabweichungen mit höherer Schleuderdrehzahl geringer werden, mit jeweils einer Ausnahme pro Durchlauf. Diese Ausnahmen sind im ersten Durchlauf bei 1000 rpm, im zweiten Durchlauf bei 1000 rpm und im dritten Durchlauf bei 3000 rpm.

Tabelle 4.3: Gemessene Schichtdicken der drei Durchläufe mit unterschiedlichen Schleuderdrehzahlen und die Standardabweichung

Schleuderdreh- zahl [rpm]	Durchlauf 1: 02.05.22		Durchlauf 2: 06.05.22		Durchlauf 3: 09.05.22	
	Schicht- dicke	Std [%]	Schicht- dicke	Std [%]	Schicht- dicke	Std [%]
	[μm]		[μm]		[μm]	
500	150,91	1,0111	152,03	0,5473	149,38	2,1959
1000	79,27	0,0793	79,60	0,6607	79,23	0,2615
2000	40,40	0,2182	40,51	0,0851	40,63	0,0609
3000	27,25	0,0899	27,45	0,0439	27,34	0,0711

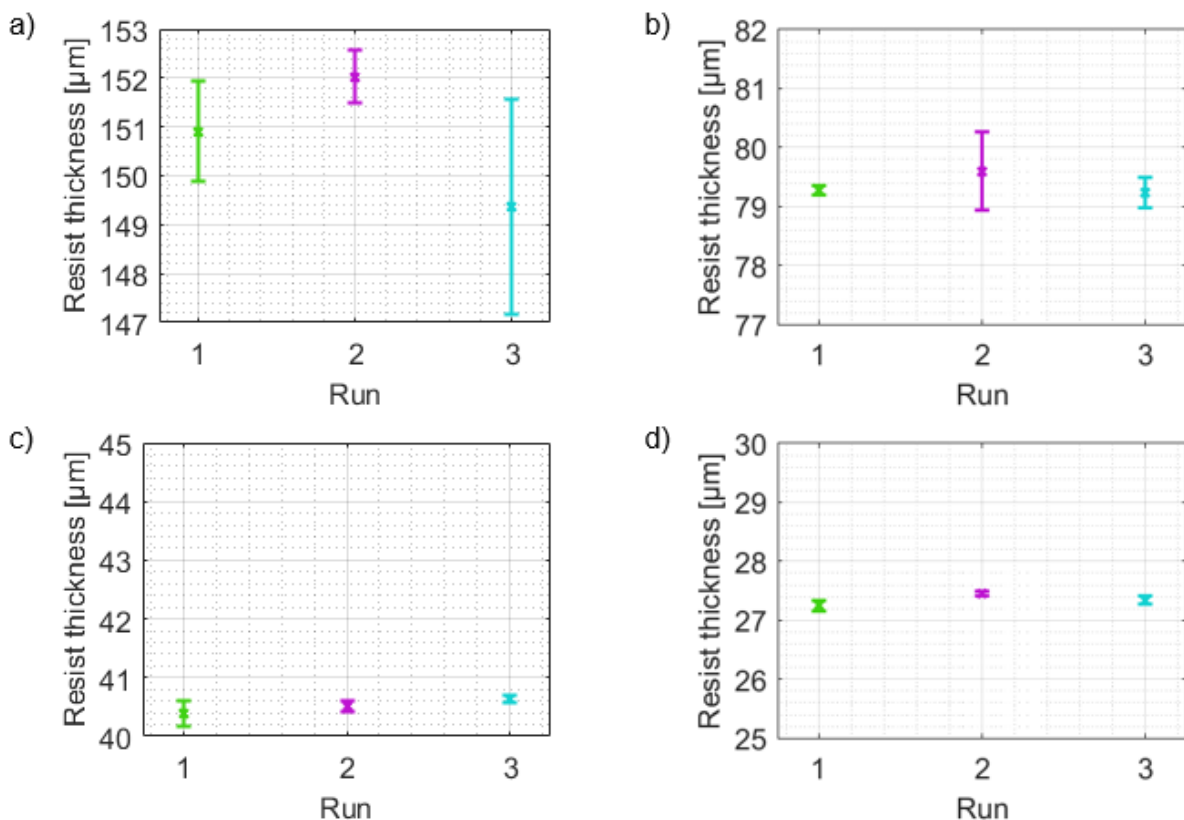


Abbildung 4.15: Gemessene Schichtdicken des UV-PDMS KER-4690 mit der Standardabweichung bei einer Schleuderdrehzahl von a) 500 rpm, b) 1000 rpm, c) 2000 rpm und d) 3000 rpm.

Aus den gemessenen Werten soll ein Verlauf der Schichtdicken in Korrelation mit der Schleuderdrehzahl abgeleitet werden. Dafür werden die Messdaten gefittet. Die gefittete Kurve besitzt ein Maß der Bestimmtheit (R^2) von 0,9987. Das bedeutet, dass die gefittete Kurve die Messwerte gut beschreibt. Diese gefittete Kurve kann mit einer

zweigliedrigen Exponentialfunktion beschrieben werden. Die Schichtdicke $T_{UV-PDMS}$ bei einer Schleuderdrehzahl sp kann mit der Formel 4.3.1 berechnet werden.

$$T_{UV-PDMS} = 286,5 \cdot e^{-0,00174 \cdot sp} + 30,94 \cdot e^{-2,995 \cdot 10^{-5} \cdot sp} \quad (4.3.1)$$

Die gemessenen Werte der drei Durchläufe aus Tabelle 4.3 und die angepasste Kurve sind in Abbildung 4.16 abgebildet. Die angepasste Kurve für die Schichtdicken in Korrelation zur Schleuderdrehzahl ist in orange eingezeichnet. Die erwarteten Schichtdicken aus dem Datenblatt des UV-PDMS KER-4690 sind mit rot ebenfalls in der Abbildung 4.16 eingezeichnet. Beide Kurven zeigen, dass die Schichtdicke mit steigender Schleuderdrehzahl abnimmt. Ab einer Schleuderdrehzahl von 3000 rpm nimmt die Schichtdicke laut dem Datenblatt nicht mehr ab [18]. In der Abbildung ist zu sehen, dass die Schichtdicke der gefitteten Kurve ebenfalls ab 3000 rpm kaum abnimmt. Nach der gefitteten Kurve wird eine minimale Schichtdicke von 26,7 µm bei einer Schleuderdrehzahl von 5000 rpm erreicht. Bei 3000 rpm wird eine Schichtdicke von 29,83 µm errechnet. Somit liegt die errechnete Schichtdicke bei 3000 rpm leicht über der erwarteten Schichtdicke von 25 µm. Die erwartete Schichtdicke bei 3000 rpm ist gleichzeitig die erwartete minimale Schichtdicke. Allgemein liegen die gemessenen Werte leicht über den erwarteten Werten aus dem Datenblatt.

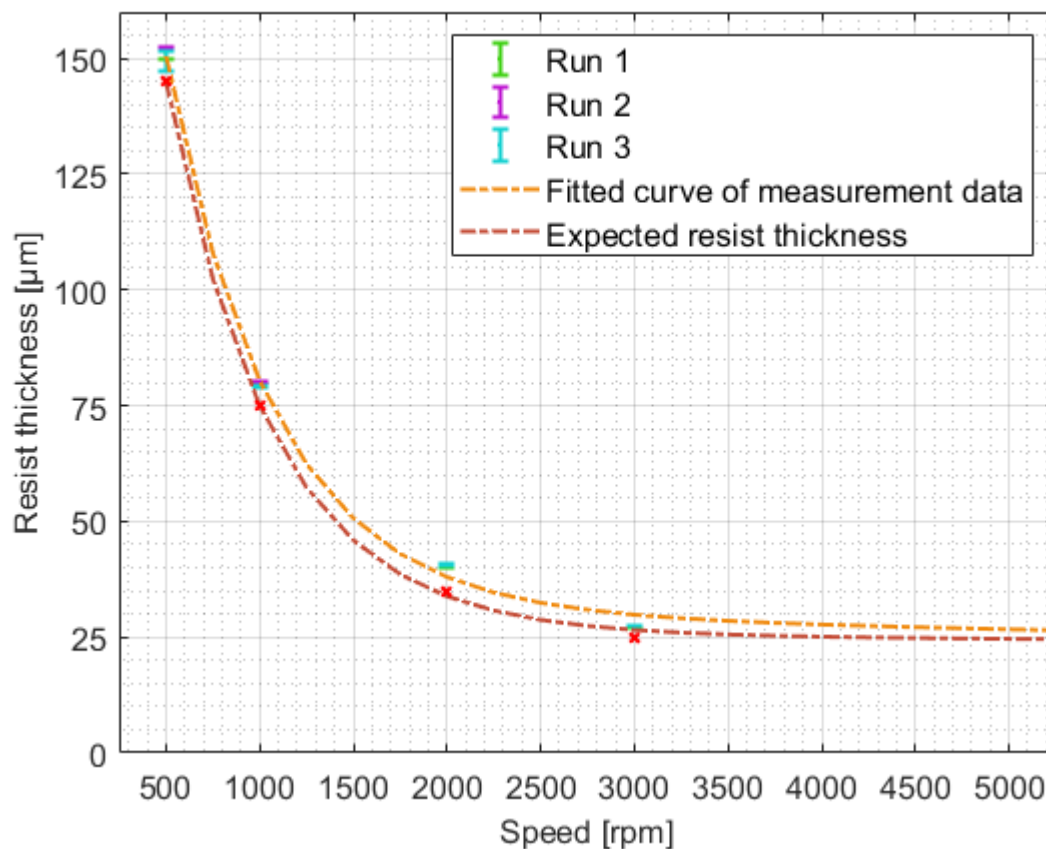


Abbildung 4.16: Schichtdicke von UV-PDMS KER-4690 in Abhängigkeit von der eingestellten Schleuderdrehzahl für 30 s, gemessen mit dem WLI mit dem Kippdistanzverfahren

4.3.1.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Standardabweichungen der Messdaten werden, mit drei Ausnahmen, mit sinkender Schleuderdrehzahl größer. Mit sinkender Schleuderdrehzahl wird aber auch die Schichtdicke größer. Bei einer höheren Schichtdicke wird die Messgenauigkeit kleiner und somit die Standardabweichung der Schichtdicke größer. Die Ausnahmen sind auf Messfehler zurückzuführen.

Die Übereinstimmung der Standardabweichungen der drei Durchläufe bei den einzelnen Schleuderdrehzahlen deutet darauf hin, dass die Messungen reproduzierbar sind. Das bedeutet, bei einer weiteren Messung müsste die Schichtdicke erneut in diesem Bereich liegen.

Die gemessenen Werte liegen leicht über den erwarteten Werten der Schichtdicke. Dies ist auf den Spin Coater, auf menschliche Einflüsse und auf Umwelteinflüsse zurückzuführen, die in Kapitel 2.2 beschrieben werden. Die Schichtdicke sinkt mit steigender Schleuderdrehzahl. Das liegt daran, dass mit steigender

Schleuderdrehzahl die Zentrifugalkraft steigt. Durch die höhere Zentrifugalkraft wird das Material besser verteilt und die Schichtdicke nimmt ab. Die Schichtdicke nimmt ab einer Schleuderdrehzahl von 3000 rpm nicht mehr signifikant ab. Wenn die Viskositätskraft gleich der Zentrifugalkraft ist, wird das Material nicht weiter verteilt und die Schichtdicke bleibt gleich. [12]

4.3.2 Herstellung der Nanostrukturen

Auf die PDMS-Formen sollen Nanostrukturen aufgebracht werden. Dafür wird eine flexible Folie mit Nanostrukturen hergestellt. In diesem zweiten Teilexperiment wird diese strukturierte Folie aus UV-PDMS gefertigt.

4.3.2.1 Fragen und Ziele

Das Ziel dieses Teilexperimentes ist es eine strukturierte Folie aus dem UV-PDMS herzustellen. Dafür soll das UV-PDMS mit der Smart NIL strukturiert werden. Die Funktionsweise der Smart NIL wurde bereits im ersten Forschungsbericht erklärt. Für die Smart NIL muss das UV-PDMS auf einem Wafer aufgebracht werden. Um später die Folie zu erhalten soll das UV-PDMS von dem Wafer abgelöst werden. Dabei müssen mögliche Veränderungen der Strukturen beobachtet werden. Somit sollen in diesem Experiment folgende Fragen beantwortet werden:

- Kann die Smart NIL mit dem UV-PDMS angewendet werden? Welche Parameter müssen angepasst werden?
- Wird ein ASL benötigt um die Folie von dem Wafer abzuziehen?
- Werden die Strukturen durch das Abziehen der Folie verändert?

4.3.2.2 Vorbereitung und Durchführung

In diesem Experiment werden die Nanostrukturen eines Masters in das UV-PDMS übertragen. Dafür wird ein Si-Wafer mit UV-PDMS mittels Spin Coating beschichtet. Damit das UV-PDMS in einem späteren Schritt von dem Wafer abgezogen werden kann, darf die Schichtdicke des UV-PDMS nicht zu klein sein. Aus diesem Grund wird eine niedrige Schleuderdrehzahl von 1000 rpm gewählt. Die restlichen Parameter für das Spin Coating können aus dem Kapitel 4.3.1.2 entnommen werden, wobei die Belichtung zu diesem Zeitpunkt noch nicht durchgeführt wird. Nach dem Spin Coating wird der Smart NIL-Prozess durchgeführt. Als Stempel wird bei der Smart NIL eine strukturierte Folie genutzt. Die Strukturen dieser Folie wurden von einem Master abgeformt. Für dieses Experiment wird eine bereits vorhandene Folie mit Gitterstrukturen verwendet. Auf dem verwendeten Master werden 10 verschiedene Gitterstrukturen wiederholt dargestellt. In der Abbildung 4.17 a) ist ein Ausschnitt des Masters mit den 10 Gitterstrukturen zu sehen. Um die Anordnung zu verdeutlichen sind die Gitterstrukturen in Abbildung 4.17 b) schematisch dargestellt und nummeriert. Im Verlauf der Experimente werden diese Strukturen abgeformt und immer wieder

vermessen. Dabei werden für die Vergleiche immer die Gitterstrukturen drei und vier vermessen, die mit einem roten Rechteck in der Abbildung 4.17 eingerahmt sind.

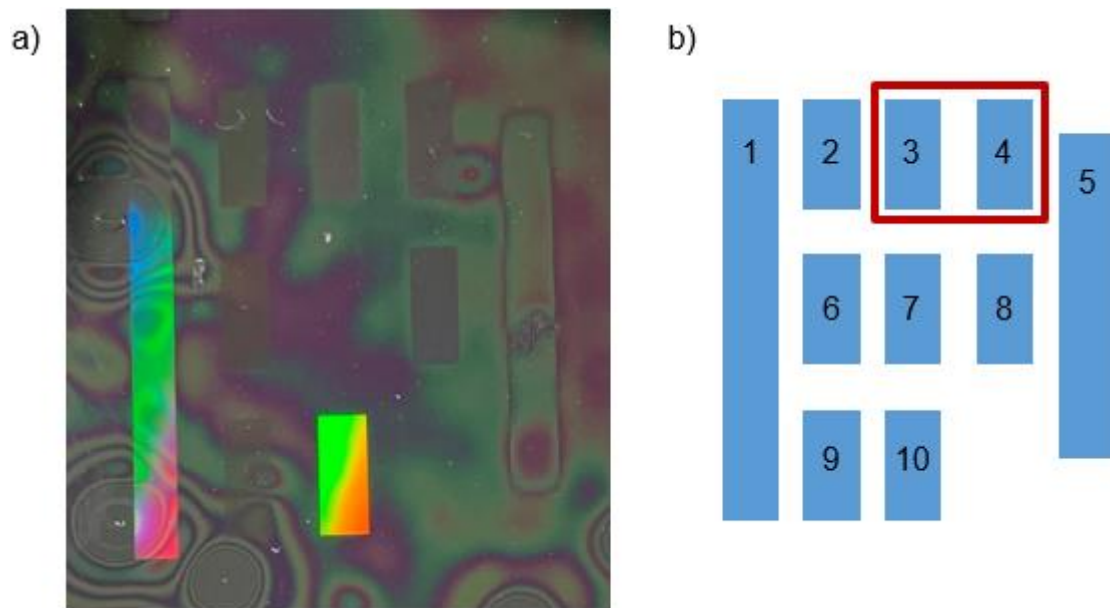


Abbildung 4.17: Gitterstrukturen des Masters, a) abfotografiert und b) schematische Darstellung der Anordnung mit roter Markierung für die zu messenden Strukturen.

Vor Beginn des Prozesses müssen der Chuck und das Cover mit der Stempelfolie und der Rolle in die NIL-Anlage eingesetzt werden. Anschließend werden die verschiedenen Parameter eingestellt, die in Tabelle 4.4 zu sehen sind. Nach dem ersten Durchlauf wird festgestellt, ob Parameter geändert werden müssen. Vor allem auf die Höhe der Annäherung und der Verzögerung zwischen Belichtung und Ablösung der Smart NIL-Folie wird geachtet. Die Schichtdicke des UV-PDMS ist im Vergleich zu anderen Imprint Materialien recht hoch und dementsprechend müsste die Annäherung weiter angepasst werden. Außerdem benötigt das UV-PDMS nach der Belichtung 24 Stunden, um vollständig auszuhärten. Im Datenblatt wird eine Verzögerung nach der Belichtung von mehr als 15 Minuten empfohlen, diese muss gegebenenfalls auch angepasst werden.

Tabelle 4.4: Prozessparameter für den Smart NIL-Prozess

Menü	Parameter	Einstellungen
Generell	Belichtungsmodus	Konstante Dosis
	Annäherung	200 μm
Belichtungs- einstellungen	Belichtungsdosis	2000 mJ/cm^2
	Verzögerung vor Belichtung	5 s
	Intensität	365 nm (100 %)
	Verzögerung nach Belichtung	0 s
Trennungs- einstellungen	Verzögerung vor Ablösung Smart NIL	15 min
	Folie	
Smart NIL Einstellungen	Imprint Geschwindigkeit	9,980 mm/s (50%)
	Roller Home Geschwindigkeit	19,960 mm/s (100%)
	Smart NIL Home Position	0 mm
	Smart NIL Imprint Position	107 mm

Nach dem Smart NIL-Prozess kann der mit UV-PDMS beschichtete Wafer entnommen werden und die Strukturen sollten abgeformt sein. Anschließend wird der Wafer für die restlichen 24 Stunden in einen Exsikkator gestellt, damit das UV-PDMS vollständig aushärten kann. Nach dieser Zeit wird das strukturierte UV-PDMS mit einer Pinzette von dem Wafer abgezogen. Sollten bei diesem Schritt Probleme auftreten wird ein weiterer Versuch durchgeführt, wobei der Wafer mit ASL beschichtet wird, bevor das UV-PDMS darauf aufgetragen wird. Wenn das UV-PDMS erfolgreich von dem Wafer abgezogen wird, werden die Strukturen dieser UV-PDMS-Folie mit dem WLI vermessen. Diese Messung ist nötig, um die Struktur vor und nach dem Aufbringen auf die PDMS-Form zu vergleichen. Das Aufbringen der Folie wird im nächsten Teilexperiment durchgeführt.

4.3.2.3 Beobachtungen und Ergebnisse

Bei dem ersten Versuch ist das UV-PDMS seitlich herausgelaufen, als die Stempelfolie auf den Wafer gelegt und mit der Rolle in das UV-PDMS gedrückt wird. Nach dem Smart NIL-Prozess sind keine Strukturen auf dem UV-PDMS zu erkennen, somit hat die Abformung von der Stempelfolie nicht funktioniert. Außerdem ist das UV-PDMS nicht ausgehärtet. Auf der Stempelfolie ist nicht ausgehärtetes UV-PDMS vorzufinden.

Vor dem nächsten Versuch wird die Stempelfolie mit dem Lösungsmittel Propylenglykolmonomethylacetat (PGMEA) gereinigt.

Für den nächsten Versuch wird die Annäherung der Stempelfolie, also der Abstand zwischen Stempelfolie und Wafer, auf 300 μm hochgesetzt, damit das UV-PDMS nicht hinausläuft. Außerdem wird die Verzögerung vor dem ablösen der Stempelfolie auf 3 Stunden gesetzt, damit das UV-PDMS aushärten kann. In Abbildung 4.18 a) ist das Ergebnis dieses Versuches zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Nanostrukturen der Smart NIL-Folie nur in der Mitte (rotes Rechteck) des Wafers abgeformt wurden. Um den abgeformten Teil befindet sich nicht ausgehärtetes UV-PDMS ohne abgeformte Strukturen. Außerdem ist erneut nicht ausgehärtetes UV-PDMS auf der Smart NIL-Folie vorzufinden. Das UV-PDMS auf der Folie befindet sich an den Stellen, die nicht abgeformt wurden. Es ist davonauszugehen, dass die Annäherung der Stempelfolie an den Wafer für die hohe Schichtdicke des UV-PDMS immer noch zu gering ist, aber es ist eine Verbesserung zum Versuch zuvor zu erkennen. Aus diesem Grund wird der nächste Versuch mit einer Annäherung von 350 μm durchgeführt. Außerdem wird die Verzögerung vor dem Ablösen der Stempelfolie auf 24 Stunden und die Belichtungs-dosis auf 4000 mJ/cm^2 erhöht, damit das UV-PDMS vollständig aushärtet. Die Stempelfolie wird außerdem erneut mit PGMEA gereinigt. In der Abbildung 4.18 b) ist das Ergebnis zu sehen. Es ist zu erkennen, dass eine größere Fläche der Strukturen der Stempelfolie abgeformt wurde (rotes Rechteck). Dennoch ist auf dem Wafer noch ein Teil mit nicht ausgehärtetem UV-PDMS, welches nicht die Strukturen abgeformt hat, vorzufinden. Auch auf der Stempelfolie sind erneut nicht ausgehärtete UV-PDMS-Reste vorzufinden.

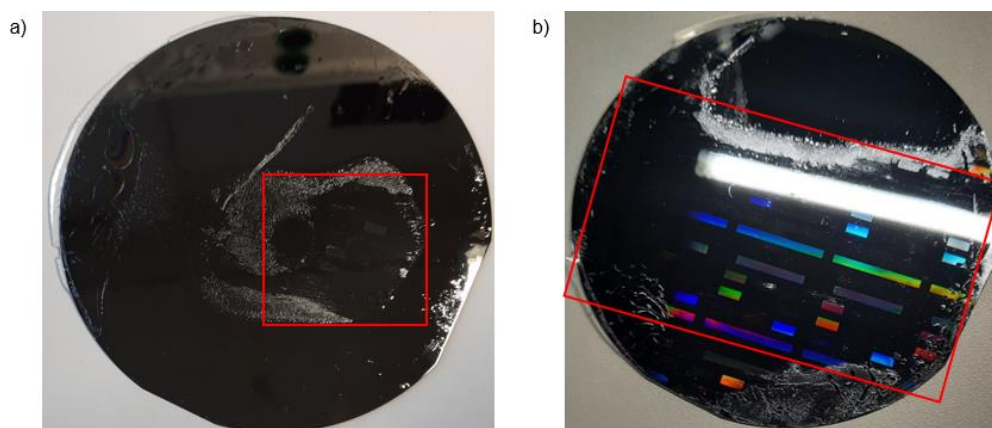


Abbildung 4.18: Mit UV-PDMS beschichteter Si-Wafer nach dem Smart Nil-Prozess, mit einer Annäherung der Stempelfolie an den Wafer von a) 300 μm und b) 350 μm , zum Teil mit den abgeformten Strukturen von der Stempelfolie (rote Rechtecke).

Die Erhöhungen der Annäherung haben zu besseren Ergebnissen geführt. Aus diesem Grund wird im nächsten Versuch erneut die Annäherung erhöht. In diesem Versuch wird die Annäherung der Stempelfolie an den Wafer auf 400 μm gesetzt. Die Verzögerung vor dem Ablösen der Stempelfolie und die Belichtungs-dosis werden aus dem vorherigen Versuch beibehalten. Die Stempelfolie wird erneut vor dem neuen Versuch mit PGMEA gereinigt. Beim Trennen der Stempelfolie von Wafer ist ein Teil des Wafers am Chuck haften geblieben und der andere Teil an der Stempelfolie. Der Wafer ist also in zwei Teile zerbrochen. Es ist zu erkennen, dass bei dem Teil auf dem Chuck UV-PDMS zwischen Chuck und Wafer gelaufen ist und dort zu Teilen ausgehärtet ist. Bei dem Versuch die jeweiligen Teile von dem Chuck und der Stempelfolie zu entfernen, sind die beiden Teile in noch kleinere Stücke zerbrochen. Diese Teile sind in der Abbildung 4.19 zu sehen. Auf den Einzelteilen ist zu erkennen, dass die Strukturen vollständig abgeformt werden konnten und das UV-PDMS vollständig ausgehärtet ist. Dennoch ist der Wafer in Einzelteile zerbrochen und dadurch unbrauchbar.

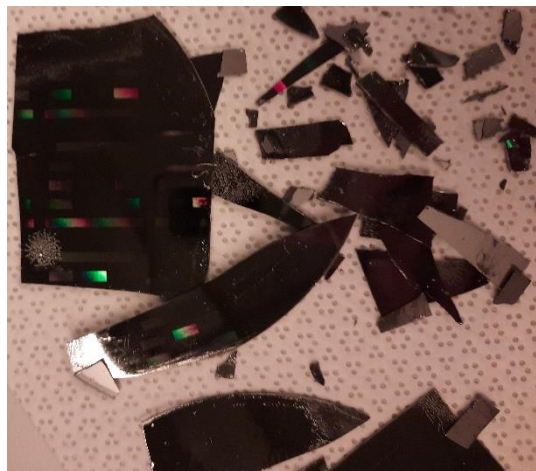


Abbildung 4.19: Zersplitterter mit UV-PDMS beschichteter Si-Wafer, nach dem Smart NIL-Prozess mit einer Annäherung der Stempelfolie von 400 μm , wobei die Strukturen abgeformt wurden.

Aufgrund des zerstörten Wafers muss der Chuck gesäubert werden, da in den Vakuumrillen sowohl nicht ausgehärtetes UV-PDMS und Teile des Wafers zu finden sind. Außerdem ist die Smart NIL-Folie zerstört, da diese durch Teile des Wafers zerkratzt wurde. Aus diesem Grund muss eine neue Stempelfolie hergestellt werden, indem die Strukturen des Masters abgeformt werden. Somit besitzt die neue Stempelfolie dieselben Strukturen wie die vorherige. Um nicht zu riskieren erneut den

Chuck mit Partikeln zu verunreinigen und die Stempelfolie zu zerstören, wird eine neue Versuchsdurchführung ausgeführt.

Neue Versuchsdurchführung:

Bei der neuen Versuchsdurchführung wird als erstes ein Replikat der Strukturen der Smart NIL-Folie bzw. des Masters erstellt. Dafür wird das EVG Material UV/A2 verwendet. Mit diesem Material wurde bereits in der Vergangenheit der Smart NIL-Prozess erfolgreich durchgeführt und somit wird das Risiko einer Zerstörung der Stempelfolie verringert. Vor dem Smart NIL-Prozess wird ein Si-Wafer mit dem Primer K von EVG beschichtet, damit anschließend das UV/A2 besser auf dem Wafer haftet. Die Vorgehensweise für die Beschichtung mit Primer K ist in Kapitel 2.3.1 nachzulesen. Anschließend wird das UV/A2 mit einem Spin Coater aufgetragen. Die genauen Prozessparameter sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Es ist zu beachten, dass das UV/A2 vor dem Schleudern auf den Wafer gegossen wird und nicht währenddessen.

Tabelle 4.5: Prozessparameter für das Auftragen von UV/A2

Prozess	Parameter	Einstellungen
Spin Coating UV/A2	Schleuderdrehzahl [rpm], Zeit [s]	300, 10 s
Einschleudern, schnelles schleudern	Schleuderdrehzahl [rpm], Zeit [s]	2000, 60
Backen	Temperatur [°C], Zeit [s]	120, 60

Anschließend wird der UV/A2 beschichtete Wafer mit dem Smart NIL-Prozess strukturiert. Die Prozessparameter können aus dem Smart NIL-Prozess mit UV-PDMS aus der Tabelle 4.4 übernommen werden. Allerdings muss der Belichtungsmodus auf Konstante Zeit geändert werden. Statt der Belichtungs-dosis wird nun die Belichtungszeit mit 600 s und die Intensität mit allen UV-Lampen mit 364 nm, 405 nm und 436 nm (100 %) angegeben. Außerdem wird die Annäherung auf 200 µm und die Verzögerung vor der Ablösung der Smart NIL-Folie auf 0 ms gesetzt. Nachdem das Replikat fertiggestellt wurde, werden die Strukturen mit dem WLI vermessen. Die Messung ist nötig, um die Strukturen des Replikats mit den Strukturen der späteren UV-PDMS-Folie zu vergleichen. Um nun die UV-PDMS-Folie herzustellen wird das Replikat mit UV-PDMS beschichtet. Dafür werden die Prozessparameter aus der Tabelle 4.2 übernommen. Als erstes wird eine Schleuderdrehzahl von 1000 rpm

gewählt. Nach der Belichtung und der Aushärtungszeit bei Raumtemperatur von 24 Stunden wird die UV-PDMS-Folie von dem Replikat abgezogen. Wenn es zu Problemen bei dem Abziehen der Folie kommt, wird die Schichtdicke durch eine geringere Schleuderdrehzahl erhöht. Außerdem kann durch einen ASL, der auf das Replikat aufgebracht wird, das Abziehen erleichtert werden. Auch der ASL wird nur genutzt, wenn das Abziehen nach dem ersten Versuch zu Problemen führt. Nach dem Abziehen der UV-PDMS-Folie von dem Replikat, werden die abgeformten Strukturen auf der Folie mit dem WLI vermessen.

Ergebnisse der neuen Durchführung:

Die Herstellung des Replikats mit dem Smart NIL-Prozess funktioniert ohne Probleme. Die beiden gemessenen Gitterstrukturen des Replikats sind in Abbildung 4.20 zu sehen. In Abbildung 4.20 a) ist die Gitterstruktur 3 und in Abbildung 4.20 b) die Gitterstruktur 4 zu sehen.

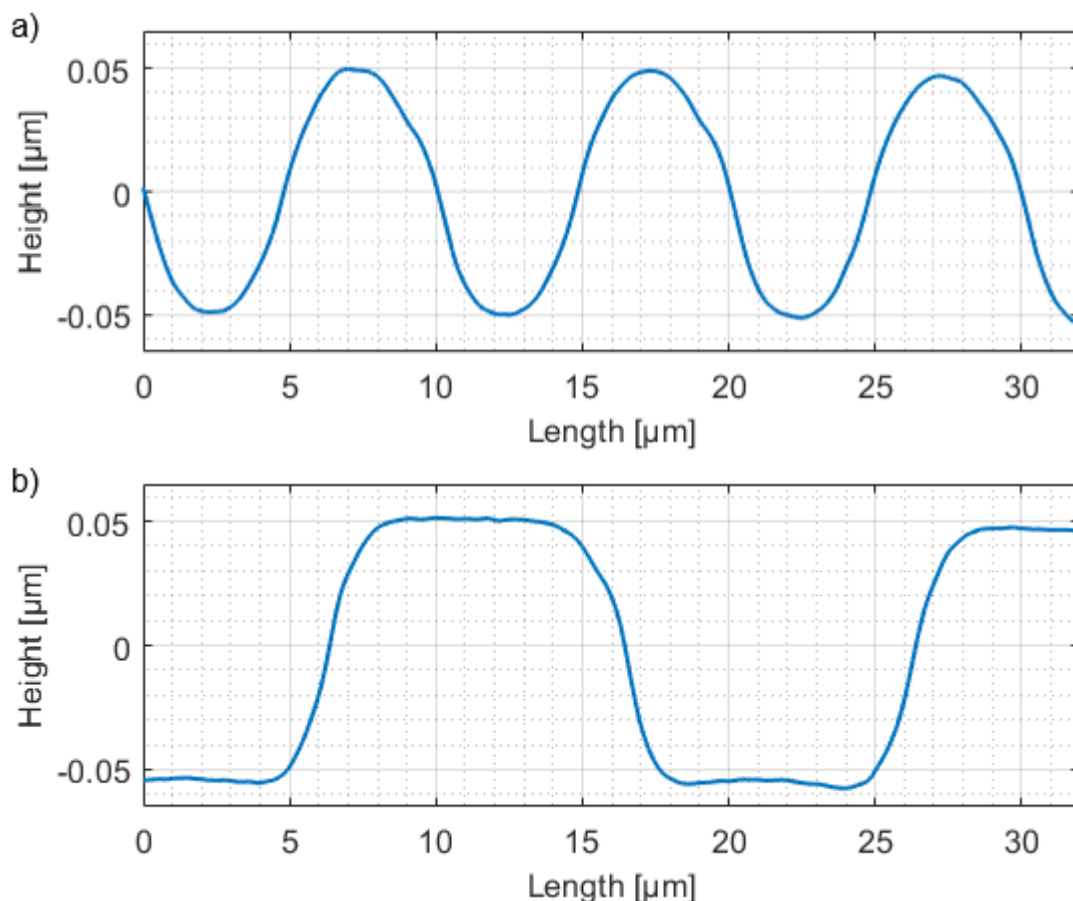


Abbildung 4.20: Profillinien des Replikats von a) Gitterstruktur 3 und b) Gitterstruktur 4.

Bei dem Versuch die UV-PDMS-Folie von dem Replikat abzuziehen, kann die Folie nicht im Gesamten abgezogen werden und zerreißt immer wieder. Um dies zu verhindern, wird ein neuer Versuch mit geänderten Prozessparametern durchgeführt. Auf einem Replikat wird UV-PDMS mittels Spin Coating aufgebracht. Um die Schichtdicke des UV-PDMS zu erhöhen, und damit das zerreißen zu verhindern, wird die Schleuderdrehzahl auf 500 rpm abgesenkt. Ansonsten bleiben die Prozessparameter wie bei dem Versuch zuvor. Nach der Aushärtung kann die Folie im gesamten abgezogen werden. Somit können diese Prozessparameter beibehalten werden und es muss kein ASL genutzt werden. In der Abbildung 4.21 sind die Strukturen der Folie und die Strukturen des Replikats zu sehen. Die Gitterstruktur 3 ist in Abbildung 4.21 a) und die Gitterstruktur 4 in Abbildung 4.21 b) abgebildet. Die Höhe der Gitterstruktur 3 ist bei der UV-PDMS-Folie kleiner als bei dem Replikat. Außerdem ist zu erkennen, dass die Gitterstruktur von der UV-PDMS-Folie eine Schräglage hat. Bei der Gitterstruktur 4 ist zu sehen, dass die Strukturen der UV-PDMS-Folie eine Neigung besitzen und darum ist der Hochpunkt der zweiten Struktur in der Abbildung 4.21 b) über der Replikat Struktur. Die Gesamthöhe dieser Struktur ist dennoch geringer, als die des Replikats. Auch bei der Gitterstruktur 4 ist bei dem UV-PDMS eine Schräglage zu erkennen.

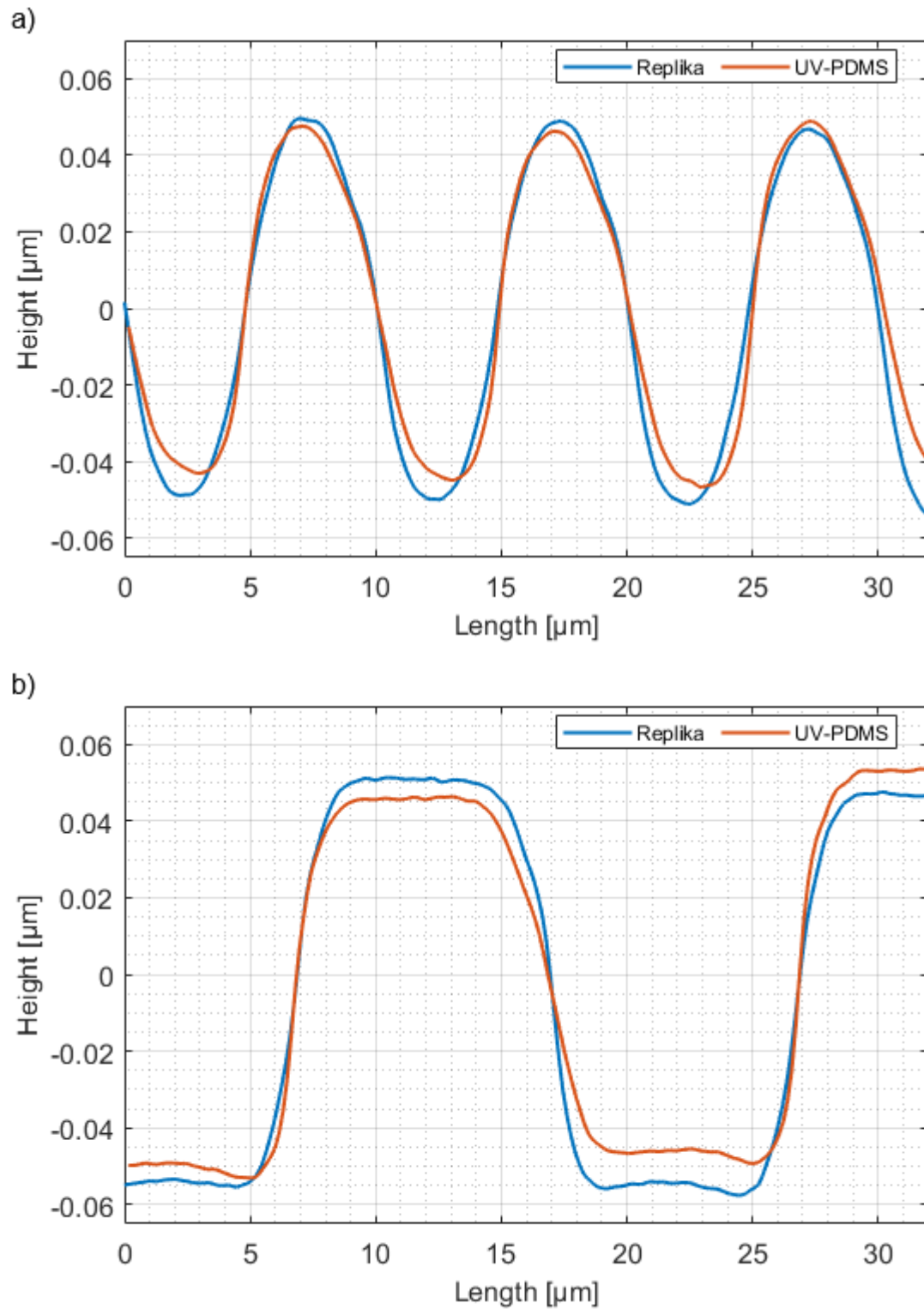


Abbildung 4.21: Vergleich der Profillinien zwischen Replika und UV-PDMS-Folie von a) Gitterstruktur 3 und b) Gitterstruktur 4.

4.3.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Bei dem ersten Versuch das UV-PDMS mit Smart NIL zu beschichten, läuft das UV-PDMS seitlich heraus. Die Strukturen werden nicht abgeformt und das UV-PDMS ist noch flüssig. Die Schichtdicke des UV-PDMS ist im Vergleich zu den normalerweise verwendeten Materialien, wie beispielsweise UV/A2 von EVG, höher. Die höhere Schichtdicke führt dazu, dass bei ansonsten gleichen Einstellungen die Stempelfolie zu tief in das UV-PDMS gedrückt wird, sodass das UV-PDMS herausgedrückt wird. Außerdem ist die Härte des UV-PDMS nach 15 Minuten nicht hoch genug, sodass die Strukturen von der Stempelfolie nicht abgeformt und erhalten bleiben. Dadurch, dass die Stempelfolie stark in das UV-PDMS gedrückt wird und beim Ablösen das UV-PDMS noch nicht ausgehärtet ist, bleibt ein Teil des UV-PDMS an der Stempelfolie haften. Im darauffolgenden Versuch können durch einen höheren Abstand in der Mitte die Strukturen abgeformt werden. Seitlich ist die Folie noch zu tief, wodurch hier dieselben Ergebnisse, wie im ersten Versuch, auftreten. Die Zeiterhöhung von drei Stunden hat keinen Einfluss darauf, dass das UV-PDMS an den Stellen, an denen die Strukturen nicht abgeformt werden, nicht aushärtet. Mit einer Erhöhung des Abstandes auf 350 μm werden mehr Strukturen abgeformt, aber immer noch nicht vollständig. Auch die Erhöhung auf 24 Stunden Abwartezeit vor dem Ablösen der Stempelfolie und die Erhöhung der Belichtungs-dosis auf 4000 mJ/cm^2 hat nicht dazu beigetragen, dass das UV-PDMS an den nicht strukturierten Stellen aushärtet. Das bedeutet, dass nicht die Zeit oder die Belichtungs-dosis der Grund für die Nichtaushärtung ist, sondern der zu hohe Kontakt zu der Stempelfolie die Aushärtung des UV-PDMS hemmt. Ein Abstand von 400 μm ist hoch genug, dass die Strukturen komplett abgeformt werden, da die Folie nicht mehr zu tief in das Material gedrückt wird. Dennoch fließt UV-PDMS unter den Wafer und härtet dort aus, sodass ein Teil des Wafers durch das UV-PDMS an den Chuck befestigt wird. Der andere Teil des Wafers haftet an der Stempelfolie. Das bedeutet, dass viele gleiche Oberflächenenergieanteile bei der Stempelfolie und dem UV-PDMS vorhanden sind. Durch die Haftung am Chuck und an der Stempelfolie zerbricht der Wafer beim Entfernen der Stempelfolie.

Um die neue Stempelfolie nicht erneut zu zerstören wird ein Replikat mit dem Material UV/A2 hergestellt. Von diesem Material ist die Schichtdicke geringer, wodurch der gewohnte Abstand von 200 μm ausreicht. Außerdem besitzen das UV/A2 und die Stempelfolie nicht genug gleiche Oberflächenenergieanteile, sodass diese nicht aneinanderhaften.

Die UV-PDMS-Folie, die mit einer Schleuderdrehzahl von 1000 rpm hergestellt wird, zerreißt beim Abziehen vom Wafer. Die Schichtdicke ist zu gering, um die Folie im Ganzen abzuziehen. Die Haftung ist nicht dafür verantwortlich, da bei einer geringeren Schleuderdrehzahl von 500 rpm und damit einer höheren Schichtdicke, die Folie ohne Probleme abgezogen werden kann. Das bedeutet, dass nur eine geringe Menge der Oberflächenenergieanteile des Wafers und des UV-PDMS gleich sind.

Die Strukturen der UV-PDMS-Folie sind kleiner als die Strukturen des Replikats. Das liegt daran, dass es während der Aushärtung des UV-PDMS zu einem Schrumpf kommt [18]. Außerdem besitzen die Strukturen eine Schräglage, wodurch die Höhe ebenfalls verringert wird. Die Schräglage wird durch das Abziehen der UV-PDMS-Folie von dem Replikat herbeigeführt. Bei dem Abziehen werden die Strukturen, die im Mikrometerbereich liegen, verformt.

4.3.3 Aufbringen der Folie

In dem Telexperiment zuvor wurde eine strukturierte UV-PDMS Folie hergestellt. Der nächste Schritt ist nun diese Folie auf die PDMS-Form aufzubringen. Die Herstellung der PDMS-Form wurde bereits im ersten Forschungsbericht dargestellt. In diesem Telexperiment wird das Aufbringen der UV-PDMS-Folie behandelt.

4.3.3.1 Fragen und Ziele

Das Ziel dieses Telexperimentes ist das Aufbringen der UV-PDMS-Folie auf eine PDMS-Form. Dabei soll beachtet werden, dass die Folie faltenfrei aufgebracht wird. Außerdem sollen die Gitterstrukturen nach dem Aufbringen noch vollständig sein. Damit die UV-PDMS-Folie auf der PDMS-Form haftet, soll PDMS (Sylgard 184) als Kleber fungieren. In diesem Telexperiment sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Kann Hitze zum Aushärten des PDMS verwendet werden, ohne dass die Folie Falten bekommt?
- Können die Gitterstrukturen beim Aufbringen der Folie erhalten werden?
- Ist die Folie flexibel genug sich an die PDMS-Form anzupassen?

4.3.3.2 Vorbereitung und Durchführung

Um nicht zu viel des UV-PDMS zu verbrauchen, wird als erstes das Aufbringen mit einer Folie aus Sylgard 184 (PDMS) getestet. Dafür wird die PDMS-Folie nach derselben Methodik hergestellt wie die UV-PDMS-Folie. Zunächst wird ein Replikat mit dem Smart NIL-Prozess gefertigt und das PDMS anschließend mittels Spin Coating auf das Replikat aufgetragen. Die Prozessparameter können aus dem Kapitel 4.3.2.3 entnommen werden. Das beschichtete Replikat wird für 70 Minuten bei 80 °C gebacken, damit das PDMS aushärtet. Nach der Aushärtung wird die PDMS-Folie mit einer Pinzette von dem Replika abgezogen. Anschließend wird das eigentliche Telexperiment durchgeführt, wobei mit unterschiedlichen Arten das Aufbringen der Folie auf der PDMS-Form getestet wird. Dafür wird die PDMS-Folie in kleinere Teile zerschnitten, da die Größe eines Wafers zu groß für die PDMS-Formen ist. Für die Haftung der Folie auf der PDMS-Form wird erneut PDMS als Kleber genutzt. Das Vorbereiten des PDMS, also das Verhältnis der beiden Komponenten, der Mischvorgang und das Entgasen kann aus dem Kapitel 4.2.3 übernommen werden. Die Aushärtung des PDMS wird sowohl bei Raumtemperatur, als auch bei 80 °C getestet. Damit die Folie auf die PDMS-Form aufgebracht wird und gleichzeitig die Form der PDMS-Form bzw. des Linsenrohlings annimmt, wird der Linsenrohling

verwendet. Der Linsenrohling wird während dem Aushärtvorgang auf die Folie, die auf der PDMS-Form liegt, aufgelegt. Gegebenenfalls wird die Metallvorrichtung, für eine genauere Positionierung des Linsenrohlings, genutzt. Wenn das Aufbringen der PDMS-Folie ein zufriedenstellendes Ergebnis ohne Faltenbildung liefert, wird diese Methodik mit der UV-PDMS-Folie durchgeführt.

4.3.3.3 Beobachtungen und Ergebnisse

Bei dem ersten Versuch wird auf die PDMS-Form drei Tropfen flüssiges PDMS aufgetragen. Darauf wird die PDMS-Folie gelegt und darauf der Linsenrohling und ein Gewicht. Das Aushärten des PDMS erfolgt bei Raumtemperatur für 48 Stunden. Anschließend wird der Linsenrohling abgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.22 a) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Folie Falten geworfen hat. Die Luftblase war bereits in der PDMS-Form und ist darum nicht aufgrund des Aufbringens der Folie entstanden. Im nächsten Versuch wird die Folie wie im ersten Versuch aufgetragen. Der Unterschied zum Versuch zuvor besteht darin, dass die PDMS-Form mit der Folie für 30 Minuten in einen Exsikkator gestellt wird, indem ein Vakuum mit einer Vakuumpumpe eingestellt wird. Das Ziel dabei ist, dass durch das Vakuum die Folie besser an die PDMS-Form anpasst wird. Anschließend wird die Form mit der Folie aus dem Exsikkator geholt, der Linsenrohling und das Gewicht wird aufgelegt und das PDMS härtet erneut bei Raumtemperatur aus. Das Ergebnis nach der Aushärtung ist in Abbildung 4.22 b) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die Folie am Rand der PDMS-Form gut angepasst hat (im roten äußeren Kreis), aber in der Mitte sind dennoch Falten entstanden.

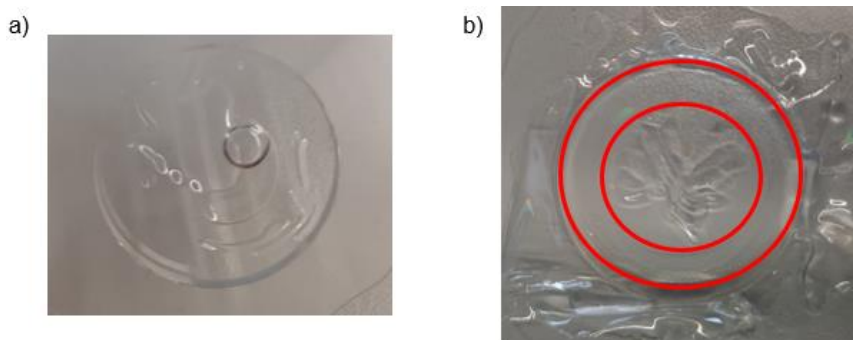


Abbildung 4.22: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht a) ohne Exsikkator und b) mit Exsikkator, wobei der Rand (rot umkreist) gut aufliegt.

Im nächsten Versuch wird die Metallvorrichtung, die zum Herstellen der PDMS-Formen verwendet wird, genutzt. Die Metallvorrichtung soll dafür sorgen, dass die

PDMS-Form besser zum Linsenrohling positioniert wird und die Folie ohne Falten aufgelegt werden kann. Dafür wird in die Metallvorrichtung der Linsenrohling gelegt und darauf der Metallring mit demselben Durchmesser der PDMS-Form. Auf diesen Metallring wird die Folie gelegt, ohne dass sich dabei Falten bilden. Die Folie haftet von selbst an dem Metall und verrutscht darum nicht. Nun werden zwei PDMS-Tropfen auf der Folie und einen auf der PDMS-Form aufgebracht. Die PDMS-Form wird von oben in den Metallring reingedrückt. Da die PDMS-Form durch die Folie aus dem Metallring rausgedrückt wird, wird ein Gewicht aufgelegt. Nach dem Aushärten von 48 Stunden bei Raumtemperatur wird die PDMS-Form mit der Folie aus der Metallvorrichtung entnommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.23 zu sehen. Die Folie hat sich nicht der PDMS-Form angepasst. Die Folie ist über die PDMS-Form gespannt und besitzt nur am Rand Verbindungen zu der Form.

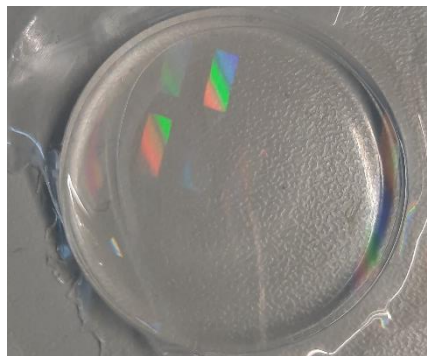


Abbildung 4.23: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht indem die Folie über der Metallvorrichtung gespannt wird. Die Folie liegt nur am Rand auf der Form auf.

Im nächsten Versuch soll die Folie nicht auf dem Metallring, sondern direkt auf den Linsenrohling in der Metallvorrichtung aufgelegt werden, damit die Form von Anfang an gegeben ist. Da die Folie stark an dem Linsenrohling haftet, ist es schwierig die Folie ohne Falten aufzulegen. Aus diesem Grund wird Seifenwasser auf den Linsenrohling aufgebracht und darauf die Folie. Somit kann die Folie faltenfrei aufgelegt werden, da die Haftung am Linsenrohling nicht mehr gegeben ist. Auf den Linsenrohling mit der Folie wird der Metallring aufgelegt. Es werden zwei PDMS-Tropfen auf die Folie und einen auf die PDMS-Form aufgetragen. Anschließend wird die PDMS-Form durch den Metallring auf die Folie gelegt. Zum Aushärten wird alles zusammen für 70 Minuten bei 80 °C gebacken. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.24 zu sehen. Es ist zu beachten, dass die Luftblasen bereits in der PDMS-Form vorhanden waren und nicht durch diesen Versuch entstanden sind. Die Folie hat sich der PDMS-

Form bzw. der Linsenform angepasst. Obwohl vor dem Aushärten keine Falten zu sehen waren, sind in der Abbildung, nach dem Aushärten, Falten zu erkennen.



Abbildung 4.24: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht indem Seife auf den Linsenrohling aufgebracht wird, darauf die Folie und der Metallring und dann die PDMS-Form und wird für 70 Minuten bei 80 °C ausgehärtet. Die Folie hat Falten geworfen.

Die Folie war vor dem Aushärten im Ofen faltenfrei. Aus diesem Grund werden im nächsten Versuch dieselben Schritte wie im vorherigen Versuch durchgeführt, bis auf die Aushärtung. Auf die Metallvorrichtung mit dem Linsenrohling, der Folie und der PDMS-Form wird ein Gewicht während der Aushärtung gelegt, damit die PDMS-Form besser auf die Folie gedrückt wird. Außerdem erfolgt die Aushärtung für 48 Stunden bei Raumtemperatur, damit der Schrumpf nicht so hoch ist und die Folie damit nicht zusammengezogen wird und keine Falten bildet. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.25 zu sehen. Die Folie hat sich gut an die PDMS-Form angepasst, es haben sich keine Luftblasen gebildet und es haben sich nur Falten am Rand der PDMS-Form gebildet. Die Gitterstrukturen sind auch gut auf der Folie auf der PDMS-Form zu erkennen.



Abbildung 4.25: PDMS-Form mit PDMS-Folie, aufgebracht indem Seife auf den Linsenrohling aufgebracht wird, darauf die Folie und der Metallring und dann die PDMS-Form und wird für 48 Stunden bei Raumtemperatur ausgehärtet. Die Folie hat sich gut an die Form angepasst, bis auf vereinzelte Falten am Rand.

Das Ergebnis des letzten Versuches ist zufriedenstellend. Es sind zwar Falten aufgetreten, aber nur am Rand und in der Mitte hat sich die Folie gut der Form angepasst. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt die UV-PDMS-Folie nach demselben Prinzip auf eine PDMS-Form aufgetragen. Die Herstellung der UV-PDMS-Folie wurde bereits in Kapitel 4.3.2 behandelt. Bisher wurden PDMS-Formen ohne Wafer zum Aufbringen der Folie genutzt, um nicht unnötig Wafer zu verschwenden. Im nächsten Schritt sollen aber die richtigen Stempel hergestellt werden, aus diesem Grund werden PDMS-Formen, die auf einem Wafer befestigt sind, verwendet. Das Ergebnis beim Aufbringen der UV-PDMS-Folie nach der Methodik von dem Versuch zuvor ist in Abbildung 4.26 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Folie Falten wirft. Außerdem kann die Folie von der PDMS-Form abgezogen werden. Der Grund hierfür ist, dass das PDMS, welches als Kleber fungiert, nicht ausgehärtet ist.

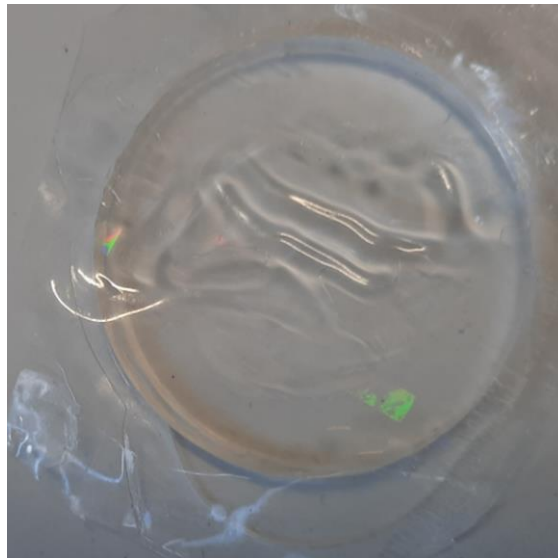


Abbildung 4.26: PDMS-Form mit UV-PDMS-Folie, aufgebracht indem Seife auf den Linsenrohling aufgebracht wird, darauf die Folie und der Metallring und dann die PDMS-Form und wird für 48 Stunden bei Raumtemperatur ausgehärtet. Die Folie hat Falten geworfen und das PDMS zwischen Form und Folie ist nicht ausgehärtet.

Da das PDMS nicht ausgehärtet ist, wird ein anderes Material als Kleber verwendet. Es wird „Prototyping Resin“ (PR 48) genutzt. Dieses Material härtet innerhalb kürzester Zeit mithilfe von UV-Strahlung aus. Die Methodik für das Aufbringen der UV-PDMS-Folie bleibt wie im Versuch zuvor. Es wird nur statt dem PDMS das PR48 als Kleber genutzt. Außerdem wird statt der Aushärtung bei Raumtemperatur, das PR48 von unten mit einer UV-Lampe mit 405 nm für 2 Minuten bestrahlt. Nach der Bestrahlung kann die UV-PDMS-Folie dennoch wieder abgezogen werden. Auf der PDMS-Form ist ausgehärtetes PR48, welches aber auch von der PDMS-Form ohne Probleme

abgelöst werden kann. Da das PR48 weder an der Kontaktfläche zu dem UV-PDMS, noch an der Kontaktfläche zu dem PDMS aushärtet, wird dieses Material nicht weiterverwendet.

Das PDMS härtet nicht mit einer UV-PDMS-Folie aus, aber mit einer PDMS-Folie hat dies bereits funktioniert. Aus diesem Grund wird der Versuch, wobei die PDMS-Folie zufriedenstellend aufgebracht wurde, wiederholt. Dieses Mal werden die Strukturen der PDMS-Folie, vor und nach dem Aufbringen auf die PDMS-Form, mit dem WLI gemessen und mit dem Replikat verglichen. In der Abbildung 4.27 sind die Gitterstrukturen der PDMS-Folie im Vergleich zu den Gitterstrukturen des Replikats abgebildet. Die Gitterstruktur 3 ist in Abbildung 4.27 a) und die Gitterstruktur 4 in Abbildung 4.27 b) zu sehen. Bei der Gitterstruktur 3 von der PDMS-Folie ist eine Neigung zu sehen. In der ersten Periode der Gitterstruktur 3 ist die Neigung noch nicht so stark und es ist zu erkennen, dass die Höhe bei dem Replika und der PDMS-Folie fast gleich ist. Die Strukturen der PDMS-Folie besitzen eine Schräglage, wie bei der UV-PDMS-Folie. Die Eigenschaften der Gitterstruktur 3 sind auch bei der Gitterstruktur 4 zu erkennen.

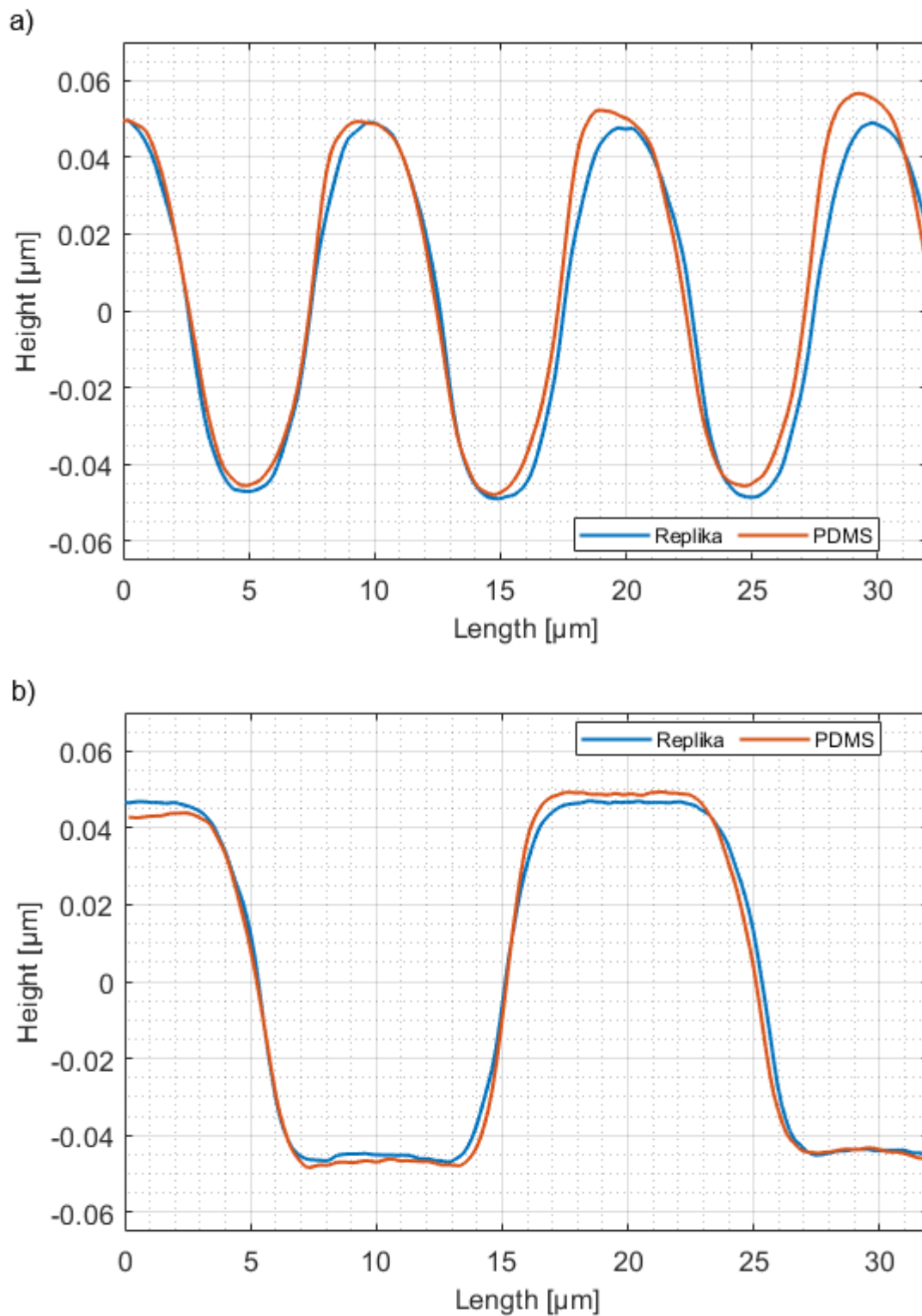


Abbildung 4.27: Vergleich der Profillinien zwischen Replika und PDMS-Folie von a) Gitterstruktur 3 und b) Gitterstruktur 4.

Anschließend an das Aufbringen der Folie werden 48 Stunden zum Aushärten des PDMS abgewartet. Das PDMS ist nach den 48 Stunden nicht ausgehärtet. Auch nach weiteren 72 ist das PDMS nicht vollständig ausgehärtet. Um die Temperatur als

Störfaktor auszuschließen wird die PDMS-Form mit der Folie und dem Linsenrohling in der Metallvorrichtung für 70 Minuten bei 80 °C gebacken. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.28 zu sehen. Ein Teil der Folie ist nicht mehr in Kontakt zu der PDMS-Form, weil an dieser Stelle die Aushärtung des PDMS überprüft wurde, indem die Folie abgezogen wird. Da auch nach der Hitzeeinwirkung das PDMS nicht vollständig ausgehärtet ist, kann die Temperatur als Faktor ausgeschlossen werden.



Abbildung 4.28: Wiederholung des Versuchs eine PDMS-Folie auf eine PDMS-Form aufzubringen nach den bereits zufriedenstellenden Bedingungen. Faltenbildung durch das Abziehen der Folie, um die Aushärtung des PDMS zu überprüfen.

Im nächsten Schritt wird die Aushärtung des PDMS kontrolliert. Dafür wird PDMS wie immer behandelt. Es wird in einem Verhältnis von 10:1 abgewogen und für 5 Minuten bei 500 rpm vermischt. Anschließend wird das PDMS für 30 Minuten entgast. Nun werden 3 PDMS-Tropfen auf 6 Glasobjektträger aufgetragen. Die Glasobjektträger werden zuvor mit Isopropanol gereinigt. Die Glasobjektträger mit den PDMS-Tropfen werden für 70 Minuten bei 80 °C gebacken. Nach dem Backen wird mit einer Pinzette die Aushärtung geprüft. Wenn das PDMS klebt oder die Pinzette den PDMS-Tropfen zerstören kann, ist das ein Anzeichen dafür, dass das PDMS nicht vollständig ausgehärtet ist. Das Ergebnis nach dem Backen ist in Abbildung 4.29 zu sehen. Die beiden Tropfen 1 und 4 sind vollständig ausgehärtet. In der Abbildung sind bei diesen Tropfen Löcher zusehen, da mit der Pinzette Teile entfernt wurden, um die Aushärtung besser zu kontrollieren. Die restlichen Tropfen besitzen alle einen kleinen Anteil, der nicht ausgehärtet ist. Mit der Pinzette kann an diesen Stellen das Material aufeinander geschoben werden. Dieses übereinander geschobene Material ist bei den Tropfen in der Abbildung zu sehen. Dieser nicht ausgehärtete Teil ist entweder klebrig oder noch

flüssig. Auch eine Verlängerung der Hitzeeinwirkung um 15 Minuten ändert das Ergebnis nicht.

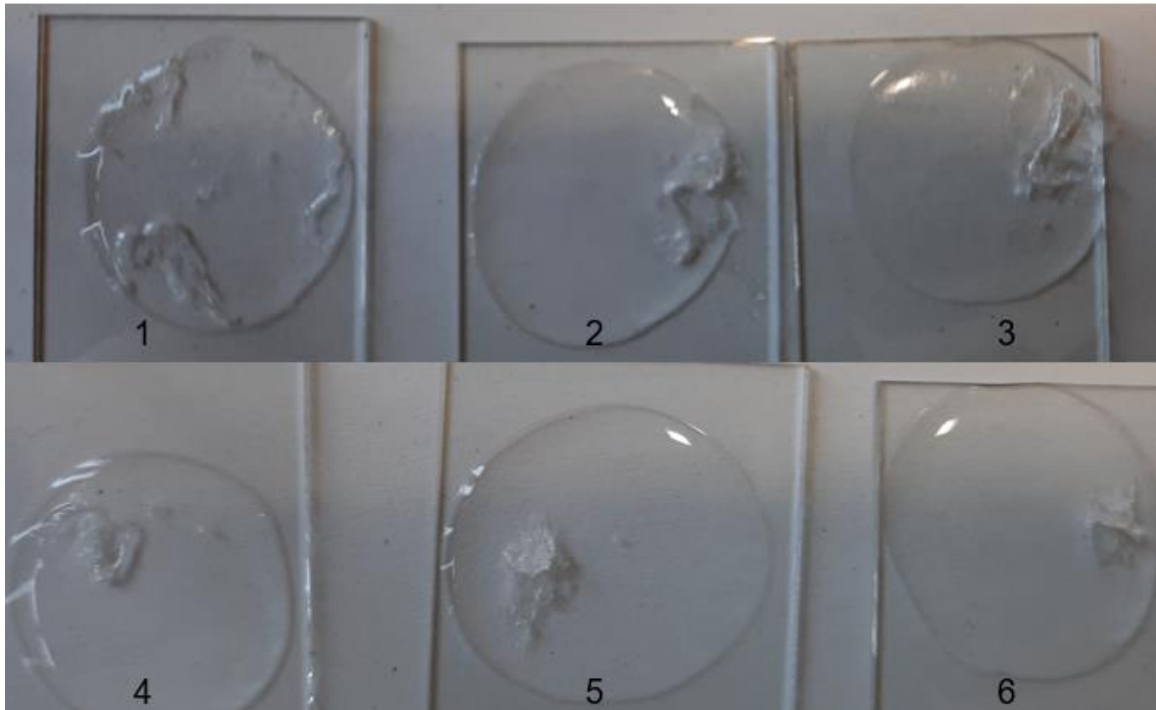


Abbildung 4.29: 6 PDMS-Proben auf Glasobjektträgern, wobei nur die Probe 1 und 4 vollständig ausgehärtet sind.

4.3.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Bei dem Versuch, die Folie über die PDMS-Form zu legen und mithilfe des Linsenrohrlings und einem Gewicht aufzubringen, entstehen Falten. Die Folie ist bei diesem Versuch nicht fest und kann sich bewegen, wenn der Linsenrohrling und das Gewicht daraufgelegt werden. Bei dieser Bewegung haftet die Folie, aufgrund von starken Anziehungskräften, an sich selbst. Dadurch entstehen Falten. Eine Vakuumbehandlung führt dazu, dass die Folie in die PDMS-Form gesogen wird. Allerdings zuerst der Rand und in der Mitte ist dann zu viel der PDMS-Folie und Luft ist zwischen Folie und PDMS-Form, wodurch in der Mitte die Folie nicht an die Form gesogen wird und es entstehen mittig Falten.

Damit die Folie sich nicht zu viel frei bewegen kann, wird diese über den Metallring der Metallvorrichtung aufgespannt. Aufgrund der starken Adhäsionskräfte haftet die Folie an dem Metallring und lässt sich nicht mehr bewegen. Wenn die Folie über den Metallring der Metallvorrichtung gespannt wird, ist die Folie unter einer hohen Spannung. Aufgrund dieser Spannung kann die PDMS-Form nur mit Druck in die Folie

und den Metallring gedrückt werden. Die Spannung ist aber zu hoch, so dass die Form nicht gänzlich in den Metallring gedrückt werden kann. Aus diesem Grund wird die Folie nicht bis zum Linsenrohling gedrückt und nimmt darum nicht die Form des Linsenrohlings an. Das Ergebnis ist, dass die Folie eben aufgespannt auf der PDMS-Form angebracht wird.

Im nächsten Versuch wird die Folie schon im Vorhinein an die Form angepasst, indem die Folie auf den Linsenrohling gelegt wird. Damit die Folie auf dem Linsenrohling glattgezogen werden kann und nicht direkt an dem Linsenrohling haften bleibt, wird Seifenwasser verwendet. Durch das Seifenwasser werden die Adhäsionskräfte verringert und die Folie kann auf dem Linsenrohling glattgezogen werden. Vor der Aushärtung unter Hitze ist die Folie glatt, aber anschließend sind Falten zu erkennen. Durch die Hitze erleidet das anfangs noch flüssige PDMS während dem Aushärten einen Schrumpf. Durch diesen Schrumpf wird auch die Folie, die auf diesem PDMS liegt, zusammengezogen und es entstehen Falten. Bei einer Aushärtung bei Raumtemperatur ist der Schrumpf des PDMS kleiner [27]. Durch den kleineren Schrumpf wird die Folie nicht so stark zusammengezogen und es entstehen keine Falten.

Bei der UV-PDMS-Folie kann PDMS nicht als Kleber fungieren. Da das PDMS nicht aushärtet ist anzunehmen, dass das UV-PDMS die Aushärtung von PDMS hemmt. Es ist bekannt, dass einige Chemikalien die Aushärtung des PDMS hemmen können [28]. Da die genaue Zusammensetzung des UV-PDMS KER-4690 unbekannt ist, ist unklar aufgrund welches Stoffes die Aushärtung gehemmt wird.

Als Alternative wird PR48 als Kleber getestet. Das PR48 härtet an den Kontaktflächen zum UV-PDMS und zum PDMS nicht aus. Das Problem ist die Sauerstoffinhibition. Das PR48 härtet durch eine radikalische Polymerisation aus und Sauerstoff verhindert diese Reaktion [29]. In PDMS und UV-PDMS ist Sauerstoff enthalten. Aus diesem Grund kann das PR48 nicht an den Kontaktflächen zu diesen Materialien aushärten.

Da eine PDMS-Folie bereits erfolgreich auf die PDMS-Form aufgebracht werden konnte, wird diese Methode weiterverfolgt und es werden Messungen der PDMS-Strukturen durchgeführt. Die Strukturen des PDMS sind im Vergleich zu den Strukturen des Replikats fast gleichhoch. Das bedeutet, dass kaum bis gar kein Schrumpf die Höhe der Strukturen des PDMS beeinflusst hat. Die Strukturen des PDMS besitzen eine leichte Schräglage, allerdings nicht so stark wie bei den UV-

PDMS-Strukturen. Die Schräglage ist auf das Abziehen der Folie zurückzuführen. Eine nicht so starke Schräglage, lässt auf eine geringere Krafteinwirkung beim Abziehen der Folie schließen. Aufgrund einer geringeren Schräglage ist die Höhe der PDMS-Strukturen näher an den Höhen beim Replikat, als bei den UV-PDMS-Strukturen.

Bei dem erneuten Versuch eine PDMS-Folie auf die PDMS-Form aufzubringen, ist das PDMS nicht nach 48 Stunden ausgehärtet. Das Vorgehen ist genau dasselbe wie bei dem Versuch, bei dem es bereits funktioniert hat. Nur die Umwelteinflüsse haben sich geändert. Da die Aushärtung nach einer längeren Zeit und bei einer höheren Temperatur nicht funktioniert hat, kann die Temperatur als Einflussfaktor ausgeschlossen werden. Der Aushärtungstest des PDMS hat ergeben, dass Stellenweise eine nicht vollständige Aushärtung erfolgt. Aufgrund dessen, dass dies nur Stellenweise auftritt, ist die Homogenität der Mischung der Grund für die nicht Aushärtung. An dem Mischvorgang wurde nichts geändert und bisher sind nicht solche Effekte aufgetreten. Das bedeutet, dass das PDMS zu alt ist und dadurch die Homogenität der Mischung beeinflusst wird, wodurch die Aushärtung nicht vorhergesehen werden kann. Für weitere Versuche muss ein neues PDMS verwendet werden, um die Aushärtung vorherzusehen und ein reproduzierbares Ergebnis zu erzeugen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass das PDMS in Verbindung zu UV-PDMS ebenfalls aushärten kann und nur aufgrund des zu alten PDMS bei dem Versuch nicht funktioniert hat.

5 Fazit

Durch die Änderung an der 3D-gedruckten Gussform, wobei die Strukturen nun nach außen gerichtet werden, können die Strukturen des abgeformten PDMS erhalten bleiben. Dennoch wird die Methode mit der 3D-gedruckten Gussform nicht weiterverfolgt. Das Problem ist, dass bei dem Druck der Gussform unerwünschte Verbindungen zwischen den Strukturen in X-Richtung entstehen. Außerdem werden die Konstruierten Strukturen nicht exakt gedruckt und durch die Hitze einwirkung auch weiter verändert.

Die Verformung der PDMS-Form durch die Aushärtung und einer erneuten Hitze einwirkung kann nicht exakt bemessen werden. Das Problem ist, dass die Profilmessung durch den Höhepunkt des Linsenrohrlings bzw. der Tiefpunkt der PDMS-Form gemessen werden muss, damit diese miteinander verglichen werden können. Den exakten Punkt zu bestimmen ist allerdings mit dem VR-Mikroskop nicht immer genau und auch durch die Verformung kann der Punkt des Tiefpunkts verfälscht werden. Dennoch kann gesagt werden, dass die Differenz zwischen Linsenrohrling und PDMS-Form 100 µm nicht überschreitet. Die Formänderung ist damit akzeptabel.

Eine UV-PDMS Folie direkt mit dem Smart NIL-Prozess herzustellen ist nicht möglich. Im Vergleich zu anderen Materialien für die Smart NIL, ist die Schichtdicke des UV-PDMS höher, wodurch die Stempelfolie mit den üblichen Parametern zu tief fährt. Außerdem haftet das UV-PDMS an der Stempelfolie und bei dem Ablösen von der Stempelfolie zerbricht der Wafer und die Stempelfolie wird zerstört. Mit einer alternativen Herangehensweise, wobei ein Replikat mit dem bereits bekannten Material UV/A2 mit dem Smart NIL-Prozess hergestellt und mit UV-PDMS oder PDMS beschichtet wird, funktioniert. Die abgeformten Strukturen sind bei dem UV-PDMS etwas kleiner als die des Replikats und besitzen eine Schräglage. Dies ist bei dem PDMS ebenfalls der Fall, allerdings ist die Schräglage kleiner und dadurch auch der Höhenunterschied, womit die Strukturen des PDMS und des Replikats fast gleich hoch sind. Die geringere Schräglage ist auf einen geringen Zug bei dem Abziehen der Folie von dem Replikat zurückzuführen. Die Strukturen werden von beiden Materialien gut abgeformt.

Das Aufbringen der hergestellten Folie ohne Faltenbildung ist aufgrund der Haftung schwierig. Um Falten zu vermeiden, muss die Folie bereits vor dem Aufbringen auf die PDMS-Form in der richtigen Form sein. Mit Seifenwasser kann die Folie faltenfrei auf

dem Linsenrohling aufgebracht werden. Hitze zum Aushärten sollte vermieden werden, denn durch den Schrumpf des PDMS, der mit steigender Hitze zunimmt, wird die Folie zusammengezogen. Eine PDMS-Folie konnte erfolgreich aufgebracht werden. Bei dem Übertragen der Methodik auf eine UV-PDMS Folie kann das PDMS nicht aushärten, da anscheinend das UV-PDMS die Reaktion hemmt. Aufgrund des Sauerstoffs im PDMS und UV-PDMS kann auch kein PR48 aushärten. In Zukunft wird die PDMS-Folie genutzt, da diese bereits erfolgreich aufgebracht werden konnte und die Strukturen dennoch zufriedenstellend abformt. In einem neuen Versuch härtet das PDMS auch bei einer PDMS-Folie nicht aus. Ein Aushärtungstest zeigt, dass das PDMS zu alt ist und die Homogenität beeinträchtigt wird. Um erneut einen Stempel aus der PDMS-Form und der PDMS-Folie, wobei die PDMS-Folie mit PDMS aufgebracht wird, herzustellen, wird neues PDMS benötigt.

6 Ausblick

Mit neuem PDMS soll erneut eine strukturierte Folie hergestellt und mit dem WLI vermessen werden. Diese Folie soll mit der zufriedenstellenden Methode auf eine PDMS-Form aufgebracht werden. Anschließend sollen die Strukturen erneut mit dem WLI vermessen werden, um mögliche Änderungen der Strukturen durch das Aufbringen der Folie zu ermitteln. Dieser Schritt konnte in diesem Forschungsbericht nicht erledigt werden und soll nachgeholt werden, sobald neues PDMS zur Verfügung steht.

Im nächsten Schritt soll der hergestellte Stempel mit der Soft UV-NIL zum Einsatz kommen. Dieser Schritt ist in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Der Linsenrohling, der strukturiert werden soll, muss mit einem Resisten beschichtet werden. Dafür muss eine gute Methode für die Beschichtung ausgearbeitet und einen geeigneten Resisten gefunden werden, der UV aushärtend ist. Der Stempel wird in den Resisten gedrückt und das System wird mit UV-Strahlung beleuchtet, damit der Resist aushärtet und dabei die Strukturen des Stempels abformt. Das Ergebnis soll der Linsenrohling mit den Strukturen in dem Resisten sein.

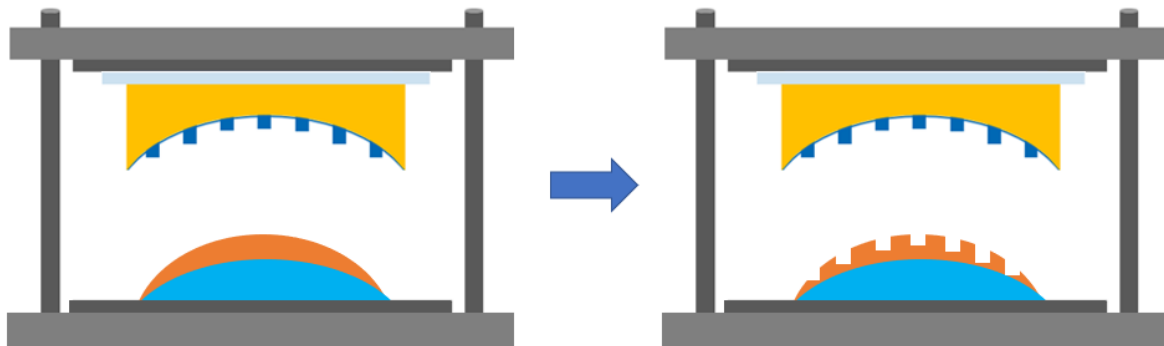


Abbildung 6.1: Beschichteter Linsenrohling, der mithilfe des gefertigten Stempels mit dem Soft UV-NIL-Verfahren strukturiert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Jang, C., Mercier, O., Bang, K., Li, G., Zhao, Y., Lanman, D.: Design and fabrication of freeform holographic optical elements. *ACM Trans. Graph.* (2020). <https://doi.org/10.1145/3414685.3417762>
- [2] Sankey, N.D., Prelewitz, D.F., Brown, T.G.: All-optical switching in a nonlinear periodic-waveguide structure. *Appl. Phys. Lett.* (1992). <https://doi.org/10.1063/1.107311>
- [3] Wang, M.: Three-Dimensional Integrated Photonics in Transparent Substrates Enabled by Femtosecond Laser Fabrication. Dissertation
- [4] Zhou, W.: Nanoimprint Lithography: An Enabling Process for Nanofabrication. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2013)
- [5] Supreeti, S.: Soft Nanoimprint Lithography on Curved Surfaces. Dissertation, Technische Universität Ilmenau (2020)
- [6] Fortuna, L., Frasca, M., Gioffre, M., Rosa, M., Malagnino, N., Marcellino, A., Nicolosi, D., Occhipinti, L., Porro, F., Sicurella, G., Umana, E., Vecchione, R.: On the way to plastic computation. *IEEE Circuits Syst. Mag.* (2008). <https://doi.org/10.1109/MCAS.2008.928417>
- [7] Farshchian, B., Amirsadeghi, A., Hurst, S.M., Wu, J., Lee, J., Park, S.: Soft UV-nanoimprint lithography on non-planar surfaces. *Microelectronic Engineering* (2011). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.07.010>
- [8] Li, Z., Gu, Y., Wang, L., Ge, H., Wu, W., Xia, Q., Yuan, C., Chen, Y., Cui, B., Williams, R.S.: Hybrid Nanoimprint-Soft Lithography with Sub-15 nm Resolution. *Nano Lett.* (2009). <https://doi.org/10.1021/nl9004892>
- [9] Hecht, E.: Optik, 7th edn. De Gruyter Studium. De Gruyter, Berlin, Boston (2018)
- [10] Rybach, J.: Physik für Bachelors. Lehr- und Übungsbuch, 4th edn. Hanser eLibrary. Hanser, München (2019)
- [11] Chemistry Online UTSC: Refractive Index Theory. <https://www.utsc.utoronto.ca/webapps/chemistryonline/production/refractive.php> (2022). Accessed 4 May 2022
- [12] Tyona, M.D.: A comprehensive study of spin coating as a thin film deposition technique and spin coating equipment. *Advances in materials Research* (2013). <https://doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.181>
- [13] DataPhysics Instruments GmbH: Disperse & polare Anteile der Oberflächenenergie - DataPhysics Instruments. <https://www.dataphysics->

- instruments.com/de/wissen/grenzflaechen-verstehen/disperse-polare-anteile/ (2022). Accessed 5 May 2022
- [14] Burkert, S.: Development of a Nanoimprint Stamp using a Lithography Master. Implementation and Evaluation of an Imprint Stamp Manufacturing Process. Research Report, Hochschule Aalen (2021)
- [15] Linseins Messgeräte GmbH: Kontaktwinkel: Definition, Bedeutung und Messgeräte. <https://www.linseis.com/messgroessen/kontaktwinkel/> (2022). Accessed 27 May 2022
- [16] MicroChemicals GmbH: Substrate Preparation: Cleaning and Adhesion Promotion (2013)
- [17] Burkert, S., Eder, C., Heinrich, A.: EVG User Manual (notes on EVG training). Lithography, SmartNIL und SoftNIL an der EVG Anlage (2021)
- [18] micro resist technology GmbH: Processing Guidelines - UV-PDMS KER-4690 (2016)
- [19] A.KRÜSS Optronic Laborgeräte: Wie funktioniert ein Refraktometer - Alles über den Brechungsindex. <https://www.kruess.com/campus/refraktometrie/wie-funktioniert-ein-refraktometer/> (03/16/2022 12:39:27). Accessed 03/16/2022 12:39:56
- [20] WOTech GbR: Weißlichtinterferometer - Oberflächenvermessung. https://www.wotech-technical-media.de/womag/lexikon/Messen_Pruefen/Weisslichtinterferometer.php (2022.000Z). Accessed 8 June 2022.627Z
- [21] Keyence Corporation: Weißlichtinterferometer. https://www.keyence.de/ss/products/microscope/roughness/equipment/surface_03.jsp (2022). Accessed 8 June 2022.002Z
- [22] Polytec GmbH: Grundlagen der Weißlichtinterferometrie nach Michelson. <https://www.polytec.com/de/oberflaechenmesstechnik/technologie/weisslichtinterferometrie> (2022). Accessed 8 June 2022.543Z
- [23] Schneelee, N.M.: Entwicklung eines Stempels für NIL auf gekrümmten Oberflächen. Forschungsbericht 1, Hochschule Aalen (2022)
- [24] Keyence Corporation: Verbesserung der Präzision mittels Inkjet-Technologie. <https://www.keyence.de/ss/products/3d-printer/agilista/3dprinter/inkjet/> (2022). Accessed 14 June 2022.228Z

- [25] Keyence Corporation: Materialdatenblatt. Modellreihe AGILISTA Serie-3000 | Hochauflösender 3D-Drucker (2020)
- [26] micro resist technology GmbH (Thesen, Manuel): UV-PDMS KER-4690 refractive index. E-Mail (2022)
- [27] Madsen, M.H., Feidenhans'l, N.A., Hansen, P.-E., Garnæs, J., Dirscherl, K.: Accounting for PDMS shrinkage when replicating structures. J. Micromech. Microeng. (2014). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/12/127002>
- [28] The Dow Chemical Company: SYLGARD 184 Silicone Elastomer. Technical Data Sheet
- [29] Arceneaux, J.A.: Mitigation of Oxygen Inhibition in UV-LED, UVA and Low-Intensity UV Cure. <https://uvebtech.com/articles/2015/mitigation-of-oxygen-inhibition-in-uv-led-uva-and-low-intensity-uv-cure/> (2015). Accessed 28 June 2022

Anhänge

A. Vergleich der Linsenform mit dem PDMS vor und nach der zweiten Hitzeeinwirkung

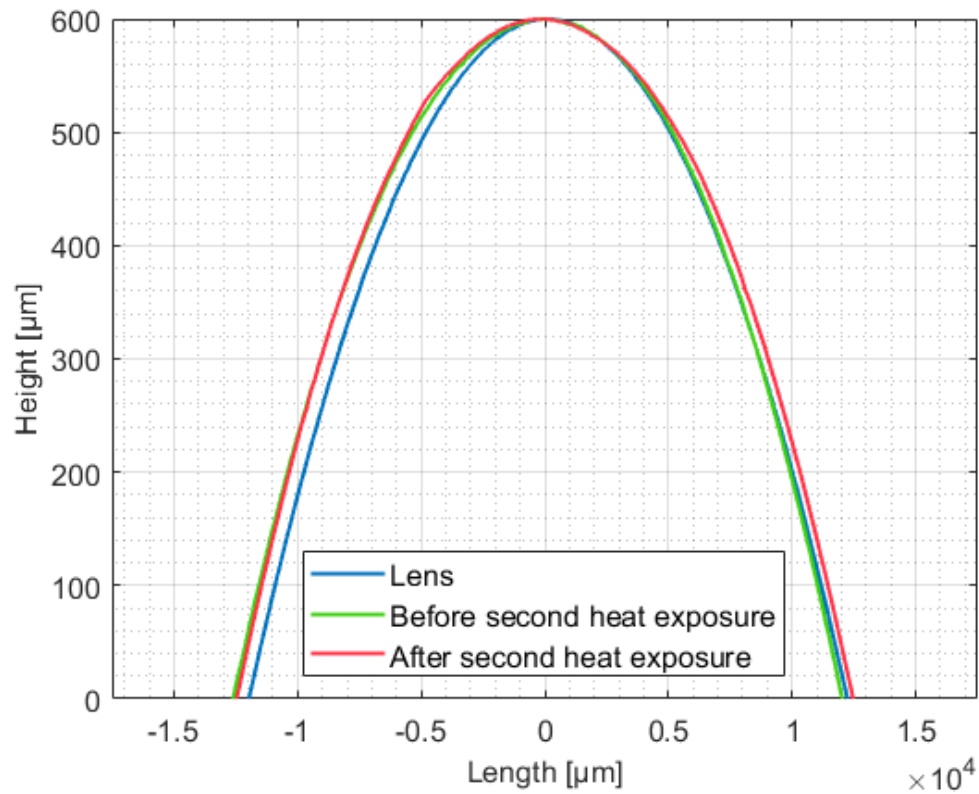


Abbildung 1: Vergleich der Linsenform mit der ersten abgeformten PDMS-Form vor und nach der zweiten Hitzeeinwirkung

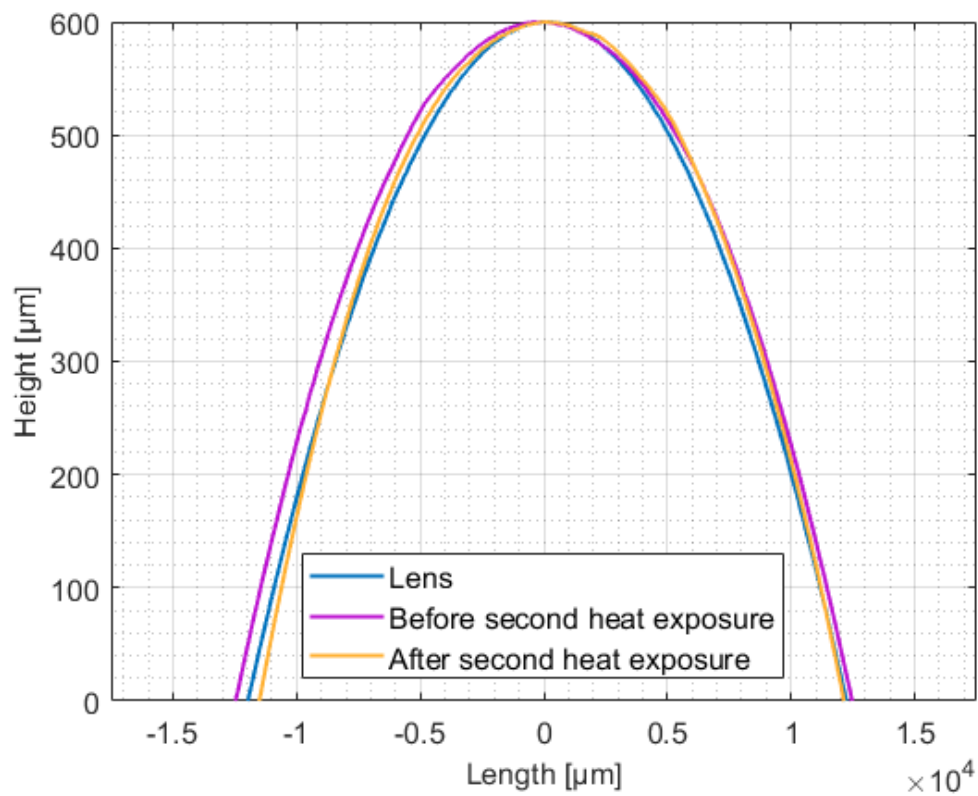


Abbildung 2: Vergleich der Linsenform mit der zweiten abgeformten PDMS-Form vor und nach der zweiten Hitzeeinwirkung

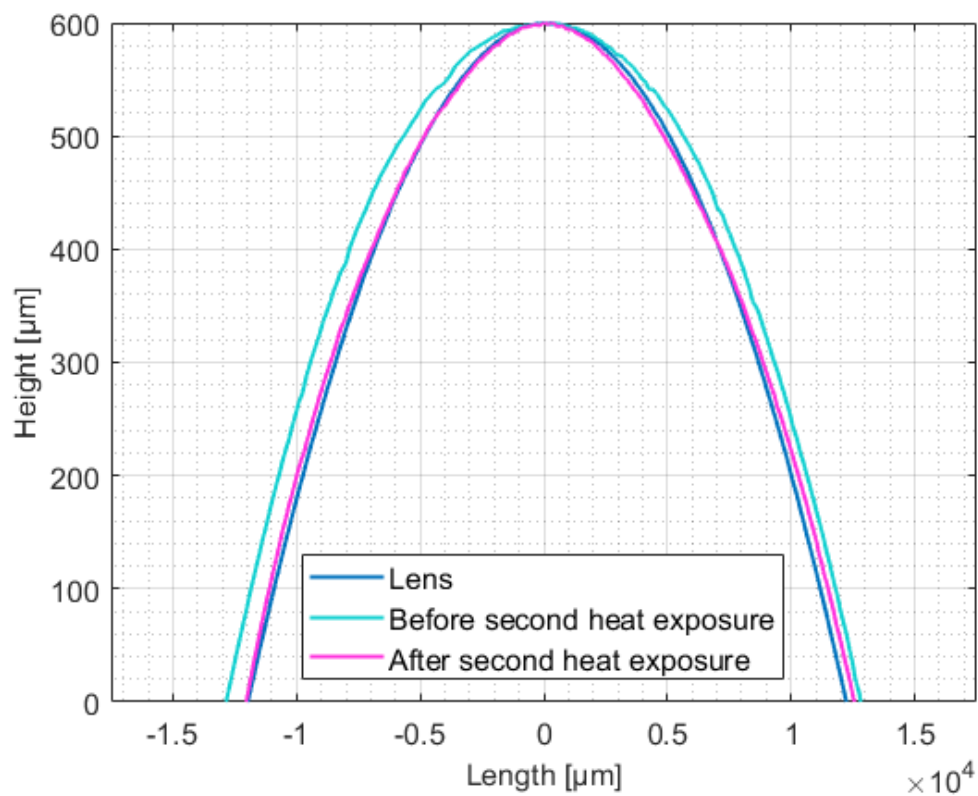


Abbildung 3: Vergleich der Linsenform mit der dritten abgeformten PDMS-Form vor und nach der zweiten Hitzeeinwirkung.