

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20182 N

Thema

Replizierte gekapselte diffraktive Optiken mittels lithographisch strukturierter 3D-Werkzeugeinsätze für komplexe optische Kunststofflinsensysteme (REDOLIS 3D)

Berichtszeitraum

01.11.2018- 30.04.2021

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Hahn-Schickard (Stuttgart), Institut für Technische Optik (Stuttgart)

Gefördert durch:

Beim Verfassen des Abschlussberichts zum IGF-Vorhaben Nr.: **20182 N** mit dem Thema „Replizierte gekapselte diffraktive Optiken mittels lithographisch strukturierter 3D-Werkzeugeinsätze für komplexe optische Kunststofflinsensysteme (REDOLIS 3D)“ haben folgende Autoren mitgewirkt:

- Stefan Wagner (HS-S)
- Marcel Röder (HS-S)
- Christof Pruss (ITO)
- Kevin Treptow (ITO)
- Martina Zach (ITO)

Inhalt

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung.....	1
Forschungseinrichtung(en)	1
Inhalt.....	3
1. Zusammenfassung.....	5
2. Problemstellung.....	5
3. Projektergebnisse.....	8
3.1. Recherche und Konzept für den Herstellungsprozess	8
3.2. Optikdesign.....	10
3.3. Füllsimulation des Bauteils	13
3.4. Bauteilkonzept und Spritzprägewerkzeug.....	15
3.5. Herstellung gekrümmter Linsenmasterstrukturen.....	19
3.6. Prozessentwicklung zur Herstellung von lithografisch strukturierten 3D- Werkzeugeinsätzen	20
3.7. Strukturierung des Resistmasters auf Werkzeugstempeln	24
3.8. Prozessentwicklung zur galvanischen Abformung gekrümmter mikrostrukturierter Oberflächen.....	27
3.9. Herstellung der optischen Komponenten für die gekapselten DOEs.....	32
3.10. Fügen der optischen Komponenten.....	34
3.11. Prozessmonitoring.....	36
3.12. Aufbau der Demonstratoren und Messungen:.....	43
3.13. Beschleunigte Umwelttests und Zuverlässigkeitsanalyse	44
4. Zusammenfassung der eingesetzten Mittel.....	45
5. Ergebnistransfer	46
5.1. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse.....	46
6. Veröffentlichung der Projektergebnisse	48

6.1. Weitere Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	48
6.2. Realisierbarkeit des Transferkonzepts	49
7. Danksagung.....	50

1. Zusammenfassung

In diesem IGF-Vorhaben wurden **gekapselte, diffraktive Kunststofflinsen** erfolgreich mittels **Spritzprägen** hergestellt. Dazu wurde eine Prozesskette etabliert, welche die Herstellung einer gekrümmten, mikrostrukturierten Masterstruktur mittels **Laserdirektschreiben auf einem UPM-gefertigten Grundkörper**, die **galvanotechnische Replikation** des Masters und den anschließenden **Werkzeugbau** zeigt. Der Werkzeugbau unterteilt sich dabei in die Konzeption und den Aufbau eines geeigneten Spritzprägewerkzeugs und dem passgenauen Einbringen einer galvanisch abgeformten Nickelstruktur in das Werkzeug.

2. Problemstellung

Die Motivation für den vorliegenden Forschungsantrag ist die **Herstellung gekapselter diffraktiver optischer Elemente in Kunststoff mittels Thermoplastspritzguss**. Demzugrunde liegt die Problematik, dass mikrooptische Kunststoffbauteile oftmals einer hohen Anfälligkeit gegenüber Verschmutzung und Schädigung in Form von Rissen und Kratzern unterliegen. Um diese Problematik einzudämmen, sollten innerhalb des Forschungsvorhabens Lösungen zu **Herstellung und Kapselung von gekrümmten, optischen Strukturen**, welche mit **diffraktiven Mikrostrukturen** kombiniert wurden, erarbeitet werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht ist vom optischen Medium abhängig, welches es durchdringt. Dabei finden die physikalischen Effekte Diffraktion (Beugung) und Refraktion (Brechung) statt, mit denen gezielt die Ausbreitungsrichtung beeinflusst werden kann. Die Änderung der Propagationsrichtung ist vom durchdrungenen Material und der Wellenlänge des Lichts abhängig. Breitbandiges Licht wird beim Durchschreiten einer Linse chromatisch aufgespalten (*Abbildung 1a*), d.h. die refraktive Linse hat i.d.R. eine kürzere Brennweite für blaues Licht als für rotes Licht, was auch als chromatische Längsaberration bezeichnet wird. Trifft Licht auf mikrostrukturierte Oberflächen, tritt Diffraktion auf. Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit führt die Beugung ebenfalls zur chromatischen Aufspaltung des Lichts an der mikrostrukturierten Oberfläche. Die chromatische Aufspaltung bei Refraktion und Diffraktion wirken entgegengesetzt. Das hat zur Folge, dass der chromatischen Aberration einer refraktiven Linse mit einem diffraktiven optischen Element entgegengewirkt werden kann. Kombiniert man beide Effekte in einem optischen Bauteil, welches sowohl aus einer refraktiven Linse als auch einer mikrostrukturierten Oberfläche aufgebaut ist, kann man ein Bauteil realisieren, welches für verschiedene Wellenlängen in guter Näherung die gleiche Brennweite aufweist.

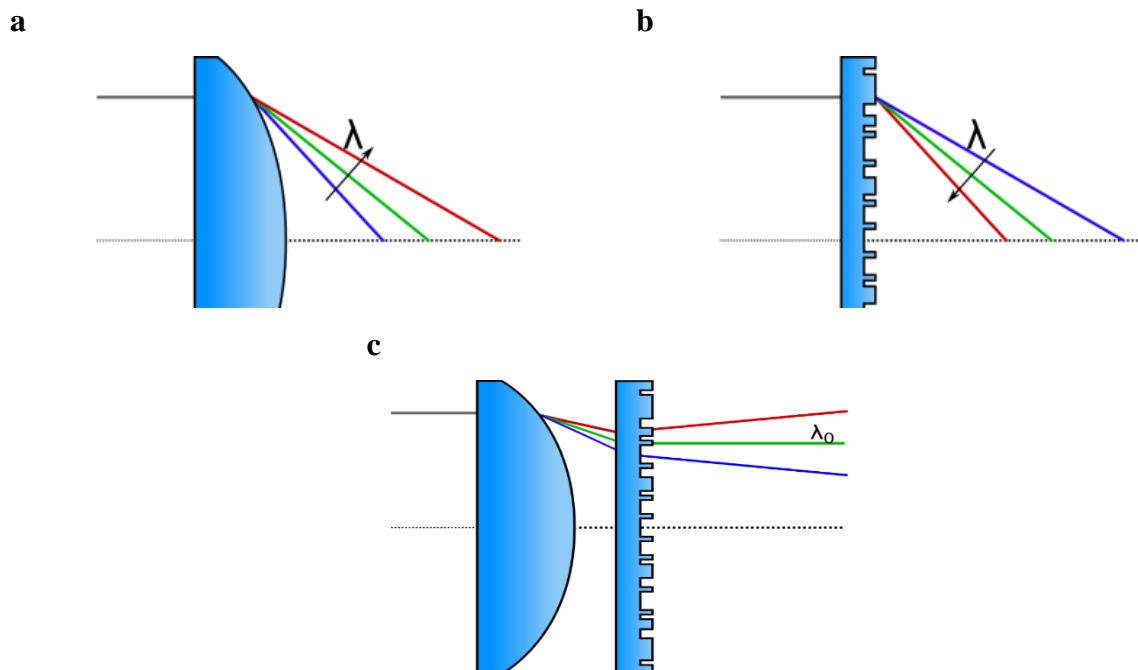


Abbildung 1: Durch Diffraction und Refraction wird Licht in seine einzelnen Wellenlängen aufgeteilt.

Sogenannte Hybridelemente vereinen verschiedene optischen Elemente in einem Bauteil, bilden die Grundlage für komplexe optische Kunststoffbauteile und verbessern als optisches Gesamtsystem die Funktion einer optischen Komponente oder eines Sensors. Es ist daher wichtig, dass diese optischen Systeme unauffällig und stärker integriert werden, auf Grund ihrer steigenden Präsenz in den verschiedensten technischen Einsatzfeldern, wie z.B. Smartphone-Kameras, Inspektionssystemen, Sensoren und Beleuchtungssystemen. Hierzu kann die Kombination von Makro- und Mikrostrukturen, z.B. in Form gekrümmter Linsen mit diffraktiven Elementen wesentlich beitragen.

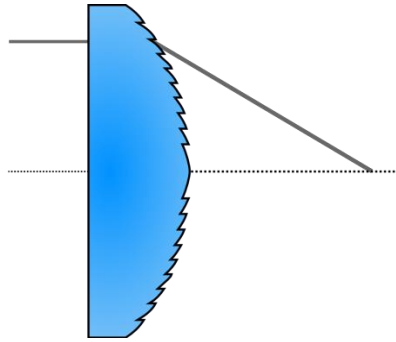


Abbildung 2: Hybridelemente vereinen die Funktionen mehrerer optischer Elemente in einem Bauteil.

Der Vorteil solcher Elemente und Bauteile liegt in der günstigeren Herstellung durch den kombinierten Herstellungsprozess und der daraus resultierenden Funktionsintegrität. Das Bauteil kombiniert die Funktion von zwei Bauteilen und verzichtet dabei auf zusätzliche Grenzflächen.

In Hinsicht auf KMUs sollte im Projekt REDOLIS3D eine geeignete **Prozesskette** erarbeitet werden, welche die Herstellung gekapselter, diffraktiver Elemente erlaubt. Folgende Schritte sollten Teil der Prozesskette sein:

- Herstellung von laserstrukturierbaren Masterstrukturen in Metall
- Laserdirektstrukturierung der Metallstrukturen mittels Spincoating und anschließendem Laserdirektschreibe-Prozess
- Galvanische Replikation der gekrümmten, strukturierten Oberfläche von der Masterstruktur in einem metallischen Nickelbauteil
- Nachbearbeitung des Nickelbauteils zu einem Nickel-Werkzeugeinsatz, welcher in ein Spritzgusswerkzeug integriert werden kann
- Replikation diffraktiver optischer Strukturen in Form eines thermoplastischen Kunststoffbauteils
- Fügen der Kunststoffbauteile zu gekapselten, diffraktiven Kunststoffoptiken am Beispiel eines Nullbrechkraftelements
- Aufbau eines Demonstrators zur Funktionsprüfung des Nullbrechkraftelements

3. Projektergebnisse

3.1. Recherche und Konzept für den Herstellungsprozess

Es wurden die Anforderungen und Randbedingungen für den Herstellungsprozess eines verkapselten diffraktiven optischen Elements (DOE) erarbeitet und in Form eines Pflichtenheftes festgehalten. Die Risiken im Herstellungsprozess wurden identifiziert und in Form einer Risikobetrachtung analysiert. Entsprechende Maßnahmen zur Reduktion der Risiken wurden festgehalten, um eine spätere Umsetzung zu garantieren. Es wurde auf Basis von Recherchen und Konzepttreffen eine zum Pflichtenheft passende Prozesskette festgelegt, welche die Herstellung mikrostrukturierter, gekapselter Kunststoffoptiken ermöglicht. Zusammen mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden die zu verwendeten Kunststoffmaterialien festgelegt. In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss sollte die Versuchsplanung für die folgenden APs definiert und industrierelevante Wünsche und Erfahrungen in die Arbeiten integriert werden. Dies wurde beim ersten Projekttreffen behandelt und umgesetzt. Das erste Projekttreffen fand entsprechend am 06. Februar 2019 statt.

Die konzipierte Prozesskette setzt sich aus den folgenden Punkten zusammen:

- Fertigen einer gekrümmten Linsen-Masterstruktur mit geringer Oberflächenrauheit in Messing mit einer Ultrapräzisions-Drehanlage
- Belackung der Masterstruktur mittels Spincoating und anschließende Strukturierung des Fotolacks mit Hilfe einer Laserdirektschreibe-Anlage
- Galvanische Abformung der belackten und strukturierten Masterstrukturen zur Herstellung eines Nickel-Formeinsatzes
- Integration des Nickel-Formeinsatzes in ein Spritzgusswerkzeug zur Abmusterung mikrostrukturierter Kunststofflinsen
- Fügen der hergestellten Kunststoffbauteile in einer dafür konzipierten Vorrichtung

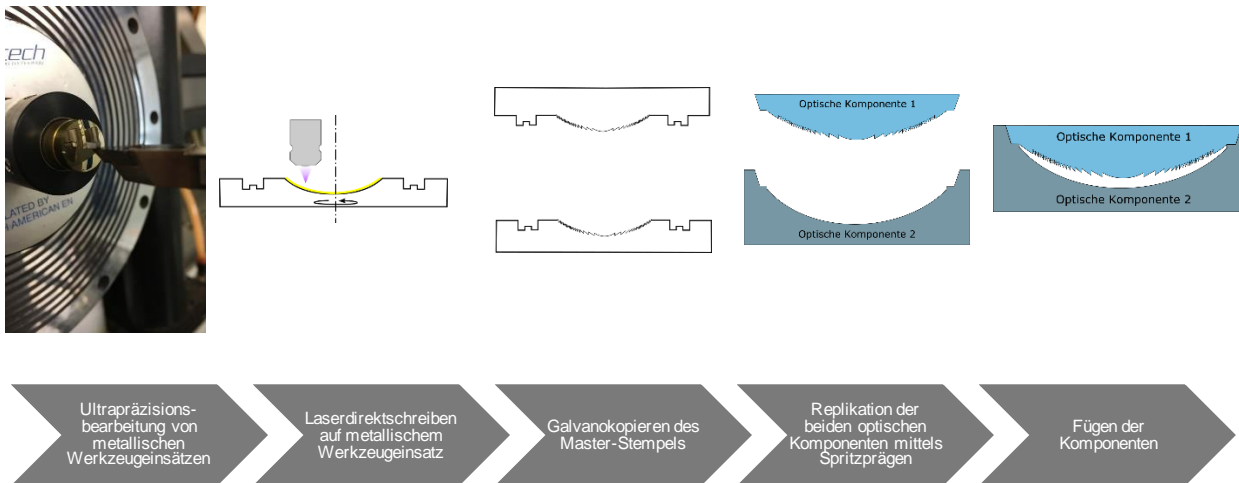


Abbildung 3: Die mit dem Projektbegleitenden Ausschuss erarbeitete Prozesskette zur Herstellung gekapselter diffraktiver optischer Elemente

Nach entsprechender Materialrecherche und in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde **Evonik Trogamid MyCX** als transparentes Kunststoffmaterial für den Spritzguss festgelegt. Das Material wurde als vorhabensbezogene Leistung der Wirtschaft (vAW) von der *Evonik GmbH* gestellt. Das Material wurde auf Grund seiner guten Fließeigenschaften und der hohen Chemikalienbeständigkeit gewählt. Der **Brechungsindex** liegt bei **1,516** und damit in einem ähnlichen Bereich wie vergleichbare optische Polymere.

Anstelle von Spritzguss wurde das **Spritzprägeverfahren** als Herstellungsverfahren gewählt. Der im Spritzgusswerkzeug aufgebrachte Spritzdruck in der Kavität verteilt sich von der Düse in Form eines Druckgefälles innerhalb des Bauteils. Das bedeutet wiederum, dass am Fließweganfang der Kavität ein höherer Druck als am Fließwegende herrscht. Dies führt zu Spannungen, welche durch das Erstarren des Kunststoffs eingefroren werden und die optische Leistung negativ beeinflussen. Beim Spritzprägeverfahren hingegen wird die Kavität eines Spritzgusswerkzeugs mit Kunststoffschmelze gefüllt und anschließend durch Zusammenfahren der beiden Werkzeughälften (optional auch mit einem zusätzlichen Stempel) ein isobarer Druck auf die Kunststoffmasse ausgeübt. In der Kavität füllt sich so ein nahezu spannungsfreies Bauteil, was für die optische Funktion wichtig ist, da Spannungen im Bauteil unerwünschte Doppelbrechung erzeugen würden.

3.2. Optikdesign

Für das Design der gekapselten diffraktiven Elemente wurden verschiedene Varianten mit gekrümmter Grundform untersucht. Das Grunddesign sieht vor, dass deren Außenflächen planparallel sind und die Linsenform eingekapselt im Inneren eingebettet liegt. Basierend auf den Ergebnissen der Materialrecherche wurde die Eignung verschiedener Materialien (PMMA, COC, Trogamid, PC) mit unterschiedlicher Dispersion für das Optikdesign untersucht. Als Fertigungsmaterial für die Auslegung des Designs und für das spätere Spritzprägen wurde final das Material **Trogamid myCX** gewählt. Für den Demonstratoraufbau waren ursprünglich zwei Linsensysteme geplant. Es handelte sich dabei einerseits um ein Nullbrechkräftelelement (kurz NBE) für ein Chromatisch-Konfokal-Mikroskop und andererseits um ein Weitwinkelobjektiv (WVO) beispielsweise zur Videoüberwachung von Räumen. Für beide Anwendungen wurde ein Optikdesign fertiggestellt. Die Systeme weisen auf kleinstem Raum eine starke Reduzierung feldabhängiger Aberrationen sowie das gewünschte chromatische Verhalten (Korrektur oder Aufspaltung) auf.

Nullbrechkräftelelement:

Die mechanischen und fertigungstechnischen Anforderungen des NBE wurden wie folgt definiert:

- Mechanische Kompatibilität: Mikrobanksystem
- Durchmesser: maximal 25mm
- Maximale Oberflächenneigung der zu strukturierenden Fläche: 15°
- Maximale Liniendichte: 250 Linienpaare pro mm
- Material: TROGAMID (final)
- Außenflächen: plan
- Variation der Linsendicke möglichst gering
- Material gleich
- Aperturen außen
- Asphärische Oberfläche möglich auf nicht strukturierter Fläche

Die optischen Anforderungen des NBE wurden wie folgt definiert:

- Design-Wellenlänge: 840 nm
- Wellenlängenbereich: 810-870 nm
- Aufspaltung so groß wie möglich
- Beugungsbegrenzt
- Minimierung des Wellenfrontfehlers auf unter 0,1 Lambda

Das Design wurde in ZEMAX durchgeführt. Für die Hauptwellenlänge $\lambda = 840 \text{ nm}$ konnte eine chromatische Aufspaltung bei einer Brennweite von $f = 9 \text{ mm}$ von $104 \mu\text{m}$ im Wellenlängenbereich 810 nm - 870 nm erreicht werden. Der Wellenfrontfehler beträgt dabei $0,022\lambda$ mit einem RMS Spot-Radius von $0,496 \mu\text{m}$.

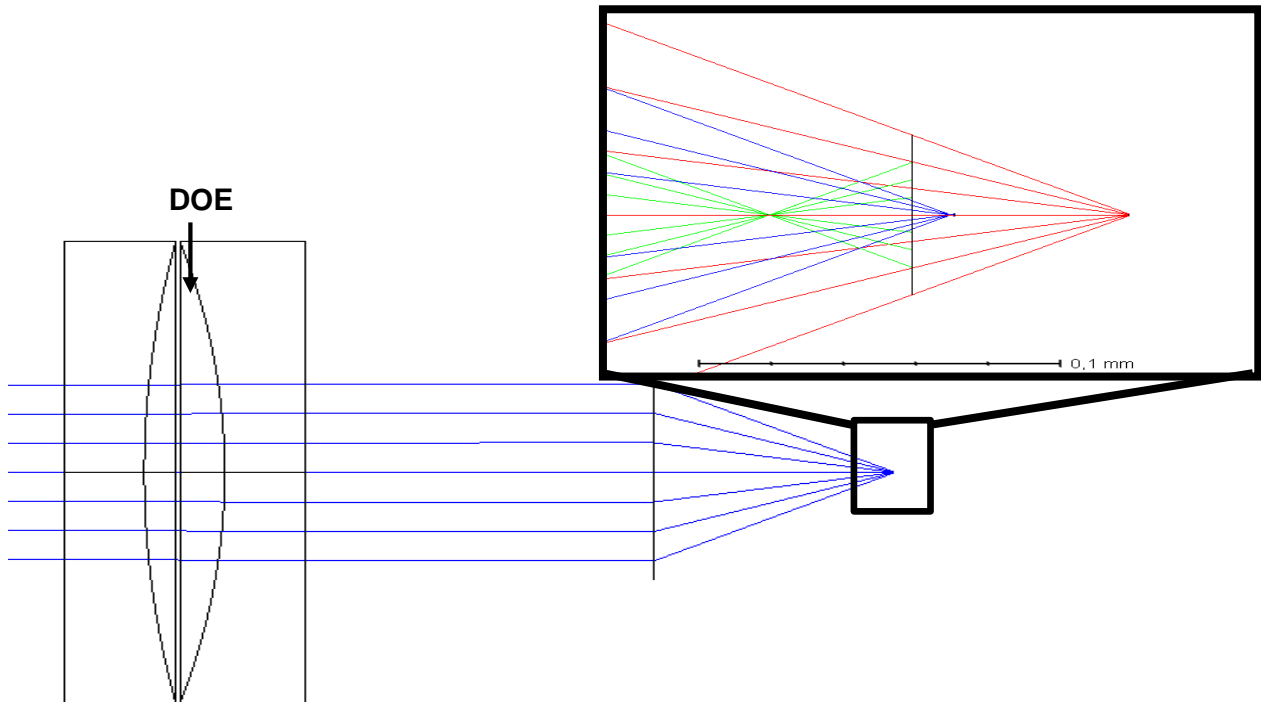


Abbildung 4: ZEMAX-Modell zur Design-Studie des NBE.

Die Toleranzen des NBE wurden über eine Monte-Carlo Simulation ermittelt. Das Design hat sich gegenüber der zu erwartenden Fertigungs- und Lagetoleranzen als sehr robust erwiesen, was sich in einer nur geringfügigen Vergrößerung des RMS Spotradius bei den variierten Systemen zeigt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Tabelle 1: Variationsbereiche für die Toleranzrechnung und Ergebnis der Toleranzrechnung (unten)

Toleranz	Werte Bereich [mm]	Anteil Systeme	RMS Spot-Radius [mm]
Verkipfung Element1	-0,250 bis 0,250	98	0,00039302
Dezentrierung DOE	-0,250 bis 0,250	90	0,00038825
Dicke Element1	-0,100 bis 0,100	80	0,00038525
Dicke Spalt	-0,100 bis 0,100	50	0,00037876
Dicke DOE	-0,100 bis 0,100	20	0,00037264
Radius	-0,200 bis 0,200	10	0,00036938
Radius DOE	-0,200 bis 0,200	2	0,00036309

Weitwinkelobjektiv:

Die optischen Anforderungen für das WWO wurden wie folgt definiert:

- Wellenlängenbereich: sichtbarer Spektralbereich
- Bildwinkel: mindestens 90°
- Verzeichnung korrigiert, chromatisch korrigiert
- Kamerageometrie: C-Mount
- Minimierung Wellenfrontfehler auf unter 0,1 Lambda
- Anwendung: Überwachungskamera

Die Designstudie des WWO wurde ebenfalls in ZEMAX durchgeführt. Es wurde eine minimale Verzeichnung mit nahezu vollständig korrigierter chromatischer Aufspaltung erreicht.

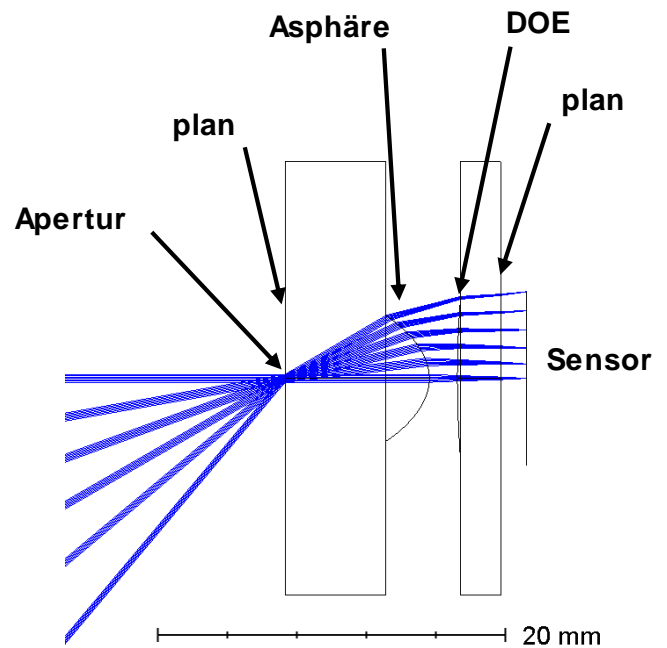


Abbildung 5: ZEMAX-Modell zur Designstudie des WWO

Die Änderung der Spotradien für die Verwendung mit und ohne diffraktives optisches Element ist in Abbildung 6 für verschiedene Objektwinkel dargestellt.

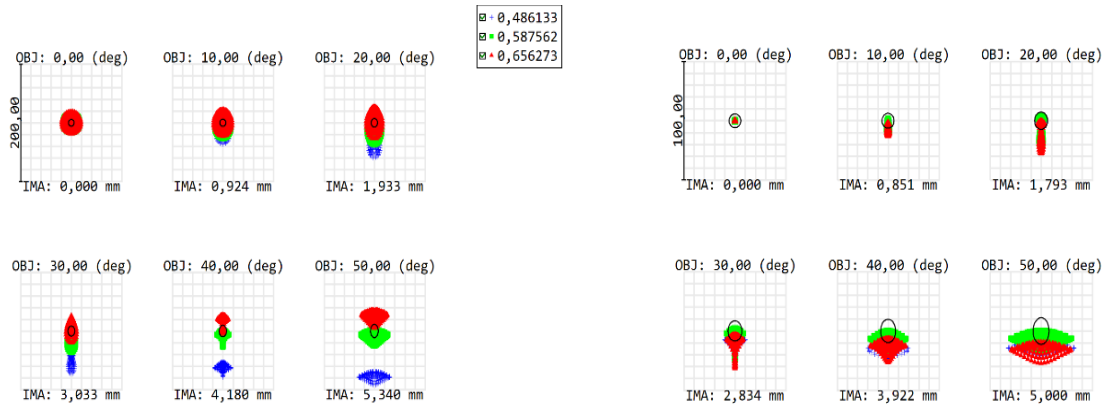


Abbildung 6: RMS-Spotradien im ZEMAX-Modell des WWO unter verschiedenen Objektwinkeln. Links: Verzeichnung und chromatische Aufspaltung ohne DOE. Rechts: Verzeichnung und chromatische Aufspaltung mit DOE.

3.3. Füllsimulation des Bauteils

Die Auslegung des Versuchswerkzeugs erfolgte anhand einer Spritzguss- und Füllsimulation. Um später im Projekt eine erfolgreiche Abmusterung zu ermöglichen, wurde das komplexe Temperierungskonzept im Spritzprägewerkzeug sowie die Nutzung einer Heißkanaldüse zusätzlich in Betracht gezogen. Anhand der in Abbildung 7a) dargestellten Bauteilgeometrie wurde die Füllsimulation in *Sigmasoft Virtual Molding* durchgeführt. Für die Simulation wurden folgende Prozessparameter angenommen:

- Material: Evonik TROGAMID myCX
- Einspritztemperatur: 300 °C
- Temperierung: Wasser- 80 °C
- Vorheizen: 1 h
- Werkzeugöffnung: 45 s

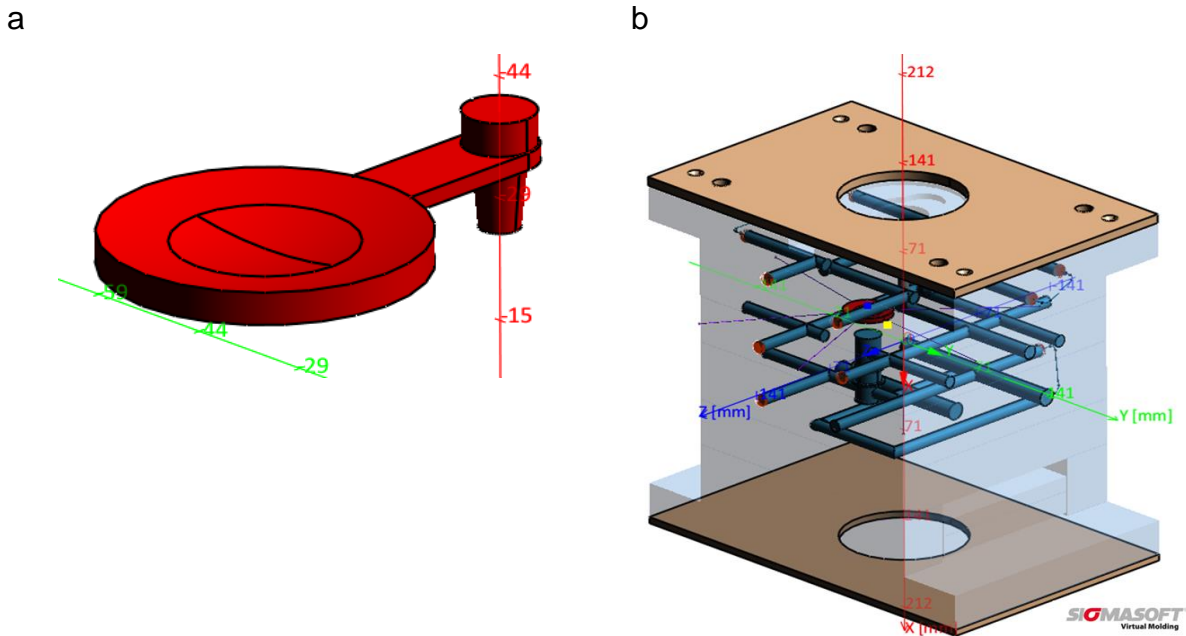


Abbildung 7: Die verwendete CAD-Geometrie führte zu einem entsprechend komplexen Kühlkonzept im Spritzgusswerkzeug. Das 3D-Modell der Kühlung ist in der rechten Bildhälfte zu sehen.

Anhand der Füllstudie konnte erarbeitet werden, dass das Bauteil im Spritzprägeprozess vollständig gefüllt wird und ein entsprechendes Kühlkonzept für das Werkzeug benötigt wird. Die Auslegung des Bauteilangusses wurde dabei ebenfalls betrachtet. Dieser soll nach Bauteilfertigung entfernt werden und wurde daher mit einer Kerbe versehen, um das Entfernen nach Erstarren der Schmelze zu vereinfachen. Innerhalb der Simulation wurde untersucht, ob die Scherung im Angussbereich dazu führt, dass die Schmelze an der Stelle überhitzt. Dies konnte nicht bestätigt werden, wie die gleichmäßige Füllung in Abbildung 8 zeigt.

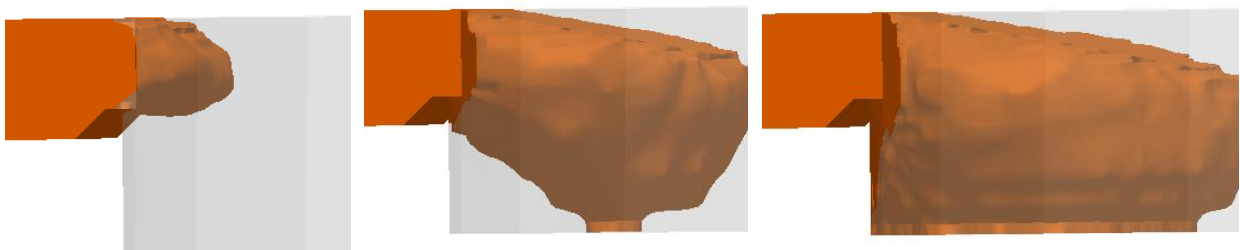


Abbildung 8: Die Ergebnisse der Füllsimulation zeigen, dass trotz Kerbe kein Freistrahleffekt im Bauteil stattfindet und keine Luft unter dem Anguss eingeschlossen wird.

Zusätzlich gab die Simulation Aufschluss über den bauteilinternen Verzug. Wie in Abbildung 9 dargestellt ist, verursachen Verzug und Schwindung einen Dickenunterschied von ca. 30 µm am Bauteilrand, welcher in der Bauteil- und Werkzeugauslegung beachtet werden muss. Zudem wird aus der Abbildung ersichtlich, dass der Verzug auf der Bauteil-Unterseite stärker als an der Oberseite erscheint. Die Verzugserscheinung hatte jedoch keinen Einfluss auf die

Materialauswahl im Projekt, da die mechanischen und vor allem optischen Eigenschaften des Trogamid myCX den Ausschlag für die Materialwahl gaben.

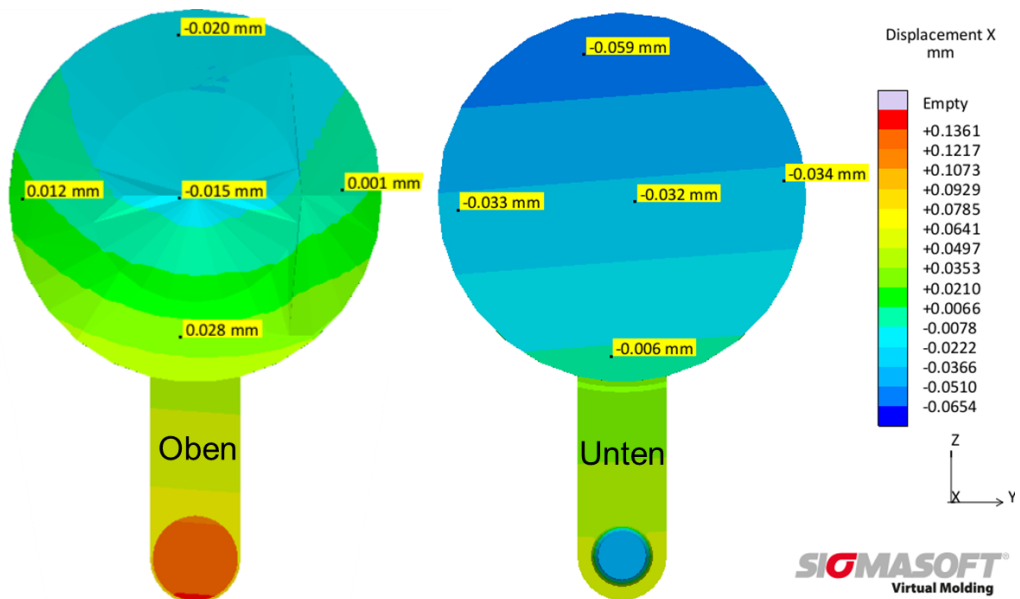


Abbildung 9: Die Simulationsergebnisse deuten auf einen Dickenunterschied von 30 μm nach dem Abkühlen des Bauteils hin.

3.4. Bauteilkonzept und Spritzprägewerkzeug

Das Projektziel beinhaltet die Herstellung eines gekapselten diffraktiven optischen Elements, welches im ersten Schritt als Nullbrechkraftelement ausgelegt werden sollte.

Das Design besteht aus zwei zueinander ausgerichteten Kunststofflinsen, wovon eine mit diffraktiven Mikrostrukturen an der Oberfläche versehen ist. Die Ausrichtung der Strukturen erfolgt im Projektverlauf über eine Zentrierfunktion, welche innerhalb der Bauteile vorgesehen wird. Über einen gegenläufigen, definierten Radius in dem jeweiligen Bauteil können die beiden Bauteile aufeinandergelegt und im Anschluss durch äußeren Druck gefügt werden. Hierzu wird ein definierter Klebspalt von 100 μm vorgesehen. In diesen wird während des Fügeprozesses Klebstoff appliziert, um die ausgerichteten Linsen stoffschlüssig zu fügen. Das 3D-Modell der Linsen ist in Abbildung 10 a) zu sehen. Darin wird ersichtlich, wie die definierten Radien nach dem Fügen ineinandergreifen und zur mechanischen Ausrichtung der Linsen zueinander führen, sobald ein externer Druck appliziert wird.

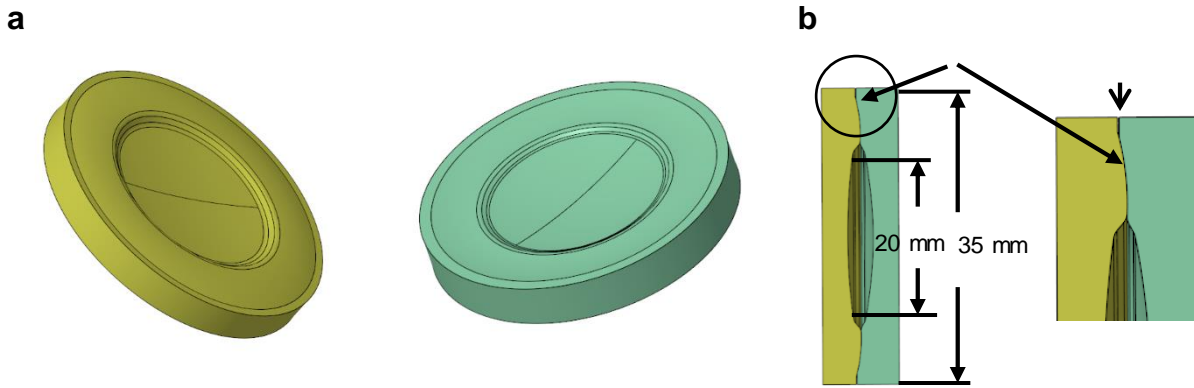


Abbildung 10: a: CAD-Modell der herzustellenden Linsen b: nach dem Fügen ist ein Klebespalt vorgesehen, welcher das stoffschlüssige Verbinden der Linsen ermöglichen soll.

Im Anschluss kann über den in Abbildung 10 b dargestellten Klebespalt ein niedrigviskoser Klebstoff appliziert werden, welcher den Spalt füllt und sich auf Grund der wirkenden Kapillarkräfte im Klebespalt gleichmäßig verteilt.

Für die Herstellung der optischen Bauteile wurde ein Spritzprägewerkzeug zum Hauptachsenprägen entworfen und aufgebaut. Der Werkzeugentwurf in Abbildung 11 zeigt u.a. die externen Hydraulikzylinder, die für das Zusammenfahren der beiden Werkzeughälften genutzt werden.

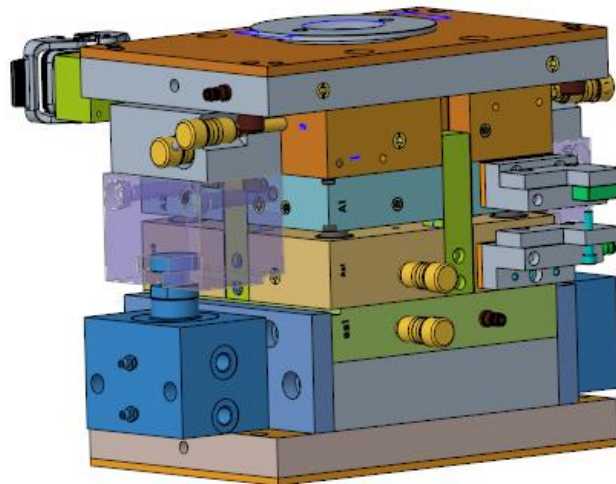
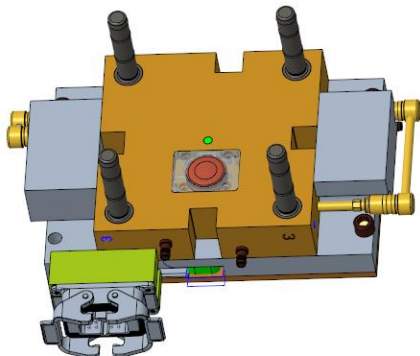


Abbildung 11: CAD-Modell des Spritzprägewerkzeugs mit den entsprechenden Anschlüssen.

Abbildung 12 a zeigt die düsenseitige Werkzeughälfte und den darin fixierten Werkzeugeinsatz, welcher einen Teil der Linsenkavität bildet. Als Düse wurde eine Heißkanaldüse genutzt. Diese hat den Vorteil, dass die Schmelze auf der entsprechenden Temperatur gehalten werden kann. Die hohen Zykluszeiten beim Spritzprägen und das große Bauteilvolumen der Linsen setzen dies voraus. Weiterhin kann der Effekt genutzt werden, um einen möglichst hohen Gegendruck im Spritzaggregat zu halten, welcher ebenfalls wichtig für die Zustellkraft ist. Die bewegliche Düsenseite läuft auf vier Führungszylindern mit der unbeweglichen Auswerferseite zusammen.

In dieser ist der ebenfalls bewegliche Werkzeugstempel eingefasst. Dieser bildet die andere Hälfte der Bauteilkavität und formt die Rückseite der Linsen ab.

a



b

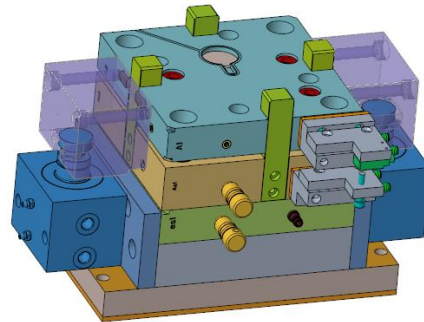


Abbildung 12: a: Düsenseitige Werkzeughälfte mit Linsenwerkzeugeinsatz aus Nickel (rot) b: unbewegliche Auswerferseite mit Zentrierschienen (grün).

Um eine möglichst transparente und plane Oberfläche der späteren Kunststofflinsen zu garantieren, muss der Stempel die Planarität ebenfalls erfüllen. Dazu wurde dieser nach der Fertigung mit einer Beschichtung aus phosphorisiertem Nickel (NiP) elektrochemisch beschichtet (Schichtdicke 500 µm), um diese im Anschluss mittels Flycutting einzuebnen und zu glätten. Dazu wurden 200 µm der NiP-Schicht durch einen Flycutter auf einem Kugler Micromaster 5X Fräszentrum von der Oberfläche abgenommen. Die so entstandene Hochglanzoberfläche weist eine Rauheit von $R_a < 10$ nm auf und kann daher als optische Fläche in dem Spritzprägewerkzeug genutzt werden. Der Vergleich der Oberflächen vor und nach der Bearbeitung und Beschichtung mit phosphorisiertem Nickel ist in Abbildung 13 zu sehen.

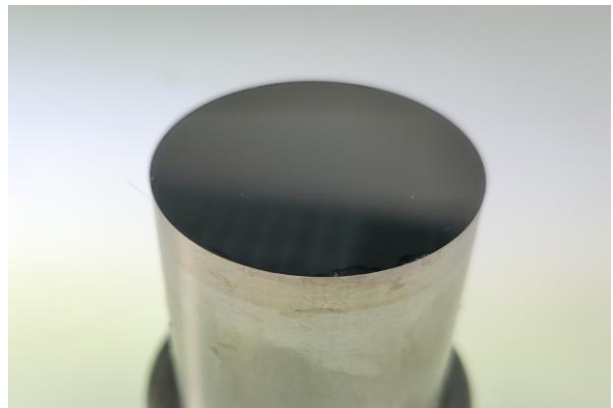


Abbildung 13: Der Werkzeugstempel vor und nach der Beschichtung mit Nickelphosphor und anschließender Bearbeitung mittels Flycutting.

Die Gegenseite dazu wird durch den galvanisch abgeformten Nickelstempel, welcher die eigentliche Linsenform, den Radius, sowie die darauf abgeformten Mikrostrukturen abgebildet. Der Nickelstempel soll mittels galvanischer Abformung hergestellt und anschließend mittels Erodieren nachbearbeitet und in Form gebracht werden. Um eine genaue Einpassung in das

Spritzprägewerkzeug zu garantieren, soll der Stempel in eine Einsatzplatte eingebaut und fixiert werden. Hierzu wird ein Konus im 60°-Winkel in die Einsatzplatte wie auch in den Nickeleinsatz gefräst. Mit einer Unterlagscheibe in entsprechender Höhe kann der Einsatz entsprechend kippicher und zentriert, wie in Abbildung 14 dargestellt, in die Platte eingepasst werden.

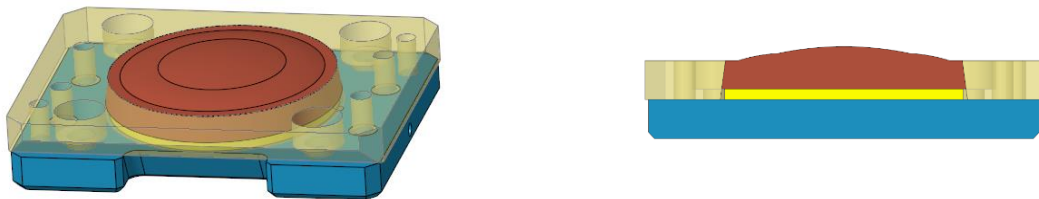


Abbildung 14: Das abgeformte und nachgearbeitete Nickelbauteil (rot) wird in einer Werkzeugplatte (transparent gelb) durch einen Konus zentriert. Mittels einer genau abgestimmten Unterlagsscheibe (gelb) wird der Einsatz auf die Höhe der Platte abgestimmt.

Eine weitere Platte stützt den Einsatz bodenseitig, wodurch der Aufbau mit vier Schrauben in der Werkzeugplatte fixiert und zentriert werden kann. Das Werkzeug wurde im Laufe des Projekts von Hahn-Schickard gefertigt und gebaut. Die zwei Werkzeughälften sind in Abbildung 15 dargestellt. Durch verschiedene Arten von Führungs- und Passungselementen ist ein möglichst präzises Zusammenfahren der Werkzeughälften zueinander möglich.

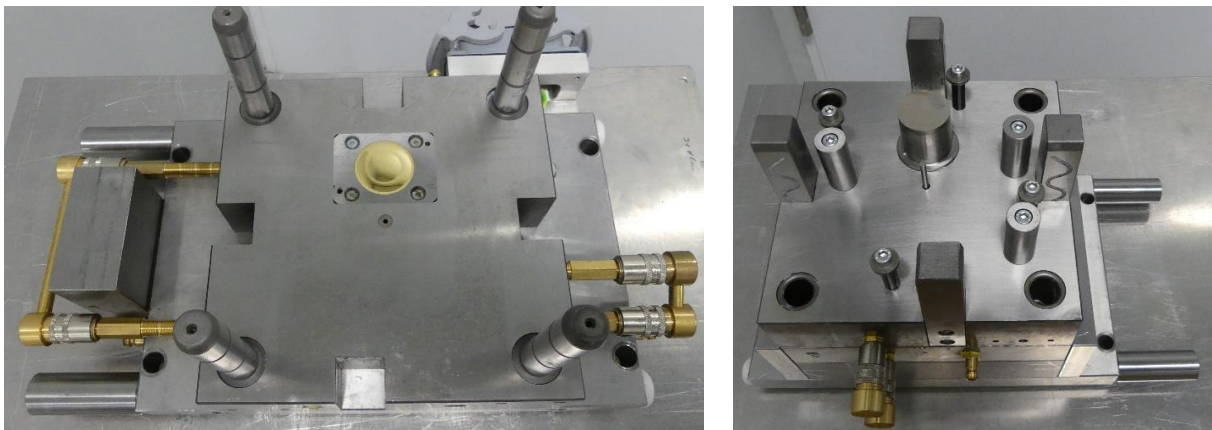


Abbildung 15: Die beiden Werkzeughälften werden zusammengefahren und über die vorhandenen Zentrierstücke ausgerichtet. Um die Größe des beweglichen Stempels zu verdeutlichen wurde eine Werkzeugplatte im rechten Bild entfernt.

Das Werkzeug wurde vollständig von Hahn-Schickard gefertigt und für die Abmusterung der Bauteile am Ende des Projekts eingesetzt. Durch die individuellen Werkzeugeinsätze können jederzeit Einsätze erneut hergestellt und im Werkzeug getauscht werden, im Falle von Abnutzungserscheinungen oder späteren Änderungen an den optischen Prototypen.

3.5. Herstellung gekrümmter Linsenmasterstrukturen

Die Linsenmasterstrukturen aus Messing wurden zunächst auf einer Benzinger CNC-Drehmaschine vorgefertigt und final mit einer Precitech Freeform 700A Ultrapräzisionsdrehmaschine nachbearbeitet. Durch diesen Prozess muss nur die Oberfläche der Linsen mit der Ultrapräzisionsanlage bearbeitet werden, um Kosten und Zeit einzusparen. Zusätzlich konnten so erste günstige Masterstrukturen zum Erarbeiten des Belackungs- und Galvanikprozesses gefertigt werden.



Abbildung 16: Gedrehter Linsenrohling ohne optische Oberfläche für die Durchführung von Vorversuchen zum Belacken und Strukturieren.

Ziel der Arbeiten war es, die spätere Linsenformkrümmung in den Messinggrundkörper einzuarbeiten, um diese im nächsten Schritt zu belacken und im Anschluss zu strukturieren. Für die Strukturierung der Messingsubstrate wurde eine Oberflächenrauheit $Ra < 20$ nm gefordert, um eine anschließende einheitliche Belackung zu ermöglichen und eine möglichst streuungsarme Oberfläche für den nachfolgenden Laserstrukturierungsprozess zu garantieren. Im weiteren Projektverlauf wurden die Messinggrundkörper auf einer Precitech A700 Ultrapräzisionsdrehmaschine (UPM) nachbearbeitet. Dazu wurden die Bauteile auf der Spindel mittels Vakuumsaugung zentriert und mit einem Diamantdrehmeisel der Firma Diatec um $20 \mu\text{m}$ abgetragen. Der Meiselradius betrug $0,505\text{mm}$. Durch die hohe Präzision der Anlage kann eine sehr homogene Oberflächentopografie geschaffen werden. In Abbildung 17 ist der Rohling sowohl aufgespannt auf dem Drehteller der UPM-Anlage, sowie nach der Bearbeitung zu sehen.



Abbildung 17: Der Messingrohling wird mittels Vakuuman-saugung gelagert, während mit einem Diamantdrehmeisel die Oberfläche bearbeitet wird.

Nach Bearbeitung weist die Oberfläche einen R_a von < 20 nm auf und ist somit für die Belackung und anschließende Lasterstrukturierung vorbereitet.

3.6. Prozessentwicklung zur Herstellung von lithografisch strukturierten 3D-Werkzeugeinsätzen

Die Reduktion der Toleranzen im Herstellungsprozess ist ein zentraler Aspekt von REDOLIS3D. Sämtliche Prozessschritte für die Strukturierung wurden in einem Reinraum der Klasse 100 durchgeführt und durch geeignete Messverfahren beurteilt (siehe Kapitel 3.11).

Eine der technologischen Herausforderungen des Projekts war, die diffraktiven Strukturen anstatt auf einem separaten Zwischensubstrat direkt auf einem metallischen Werkzeugstempel lithografisch herzustellen. Erste Strukturierungsversuche wurden mit planen polierten Messingsubstraten durchgeführt. Die Oberfläche des Messingsubstrates war mit starken Inhomogenitäten wie Poren, bzw. Löchern versehen. Diese Unregelmäßigkeiten verursachten Abbrüche des Autofokus-Systems (Abbildung 18) der Belichtungsmaschine und führten zu stark verrauschten Strukturen (Abbildung 19).

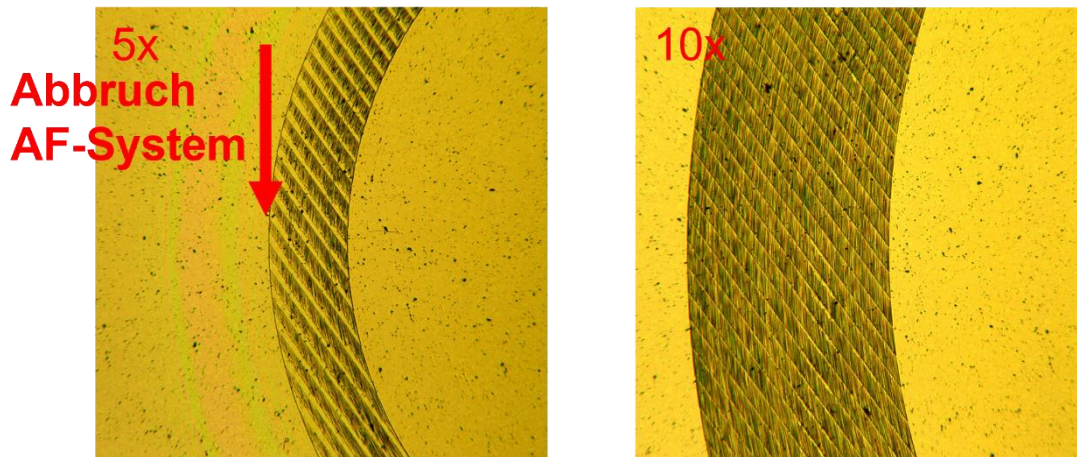


Abbildung 18: Mikroskopbild des ersten Strukturierungsergebnisses der polierten planen Messingwerkzeugeinsätze. Links: Lineargitterstruktur mit 5-facher Vergrößerung. Rechts: Lineargitterstruktur mit 10-facher Vergrößerung.

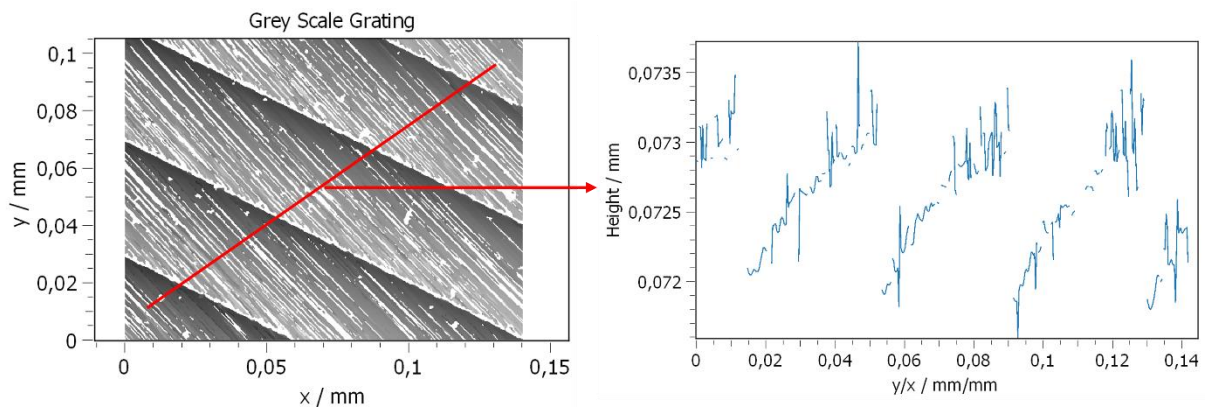


Abbildung 19: Links: Oberflächenmessung der Lineargitterstruktur. Rechts: Querschnitt der Oberflächenmessung.

Die polierten Messingsubstrate waren aufgrund dessen nicht für die lithografische Strukturierung geeignet. Deshalb wurden anschließend plane UPM-gedrehte Messingsubstrate für den Prozess der Mikrostrukturierung angefertigt. Die Poren und Löcher auf der Oberfläche konnten deutlich reduziert werden. Durch Verwendung der UPM gedrehten Substrate konnten Abbrüche des Autofokus-Systems vermieden werden. Die hohe Reflektivität der Messingoberfläche führt zu Störinterferenzen während des Belichtungsprozesses, siehe Abbildung 20. Die Höhe der durch die Rückreflexe entstandenen Stufen h beträgt etwa 115-130 nm.

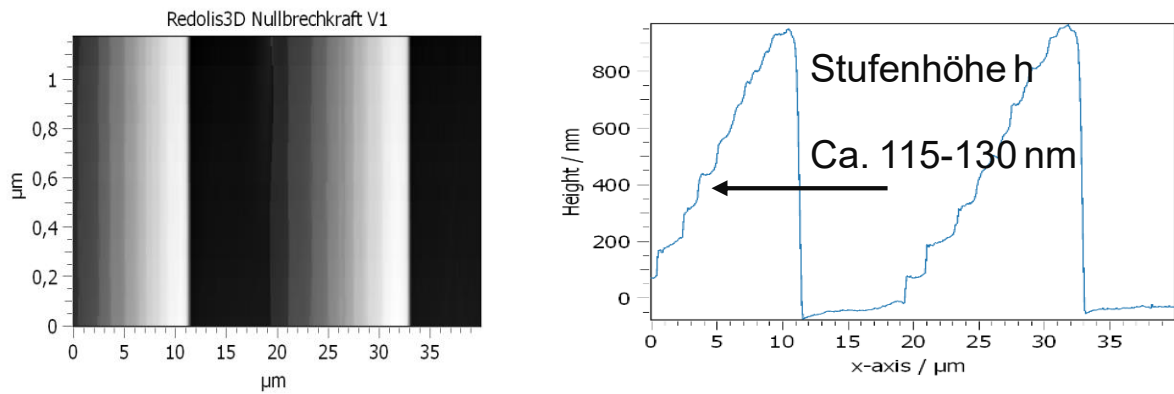


Abbildung 20: Links: Oberflächenmessung der UPM gedrehten planen Substrate. Rechts: Querschnitt der Oberflächenmessung.

Deshalb wurde vor dem Aufschleudern der Fotolackschicht eine Antireflexschicht (BARC) auf die Substratoberfläche aufgebracht. Die Dicke der BARC-Schicht wurde auf die Belichtungswellenlänge 405 nm angepasst und konnte homogen mit 200 nm über die gesamte Substratoberfläche aufgeschleudert werden. Dadurch konnte die Stufenerscheinung nahezu vollständig unterdrückt werden (siehe Abbildung 21).

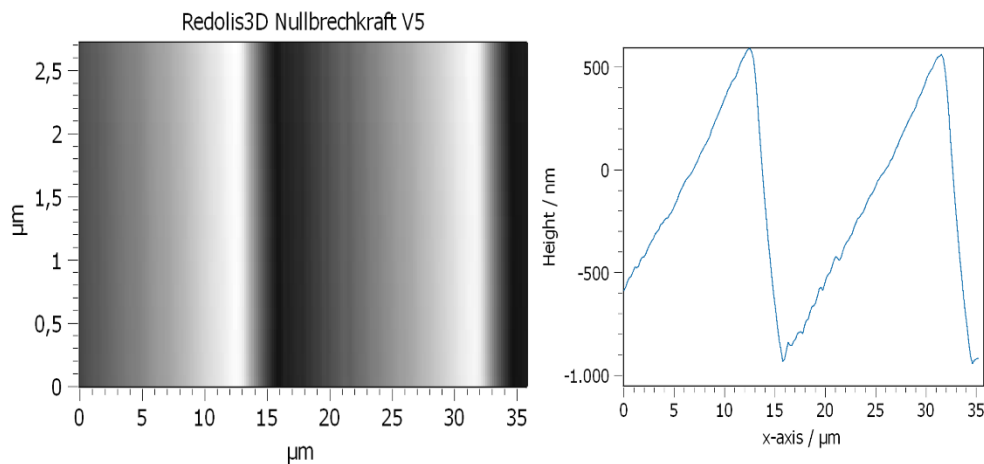


Abbildung 21: Links: Oberflächenmessung der strukturierten UPM gedrehten planen Substrate. Rechts: Querschnitt der Oberflächenmessung.

Die lösemittelresistente BARC-Schicht lässt sich von der Messingoberfläche nicht mehr entfernen, ohne die Oberfläche des Substrates zu beschädigen. Die Verwendung von Removern greift die Oberfläche an, was zu einer erhöhten Rauheit führt. Auch Piranha-Säure kann wegen Inkompatibilität zum Oberflächenmaterial nicht verwendet werden.

Im nächsten Schritt der Prozessentwicklung wurden die Prozessschritte für gekrümmte Substrate optimiert. Hilfreich hierbei waren Diskussionen mit dem Prozesschemikalienhersteller Microchemicals. Im Ergebnis der Prozessentwicklung konnte die Funktionsfläche des NBE über den gesamten Bereich homogen mit der Antireflexschicht belackt werden.

Für den Belackungsprozess am Spincoater wurden folgende optimierte Prozessparameter ermittelt:

- Lack: Barli 2(1:5), verdünnt mit Lösemittel EBR Solvent im Mischverhältnis 30/70
- Schleuderzeit: 30 s
- Umdrehungsbeschleunigung: $800/s^2$
- Umdrehungsgeschwindigkeit: 1000 U/s
- Deckel geschlossen
- Softbake: 3 min bei $200\text{ }^\circ\text{C}$

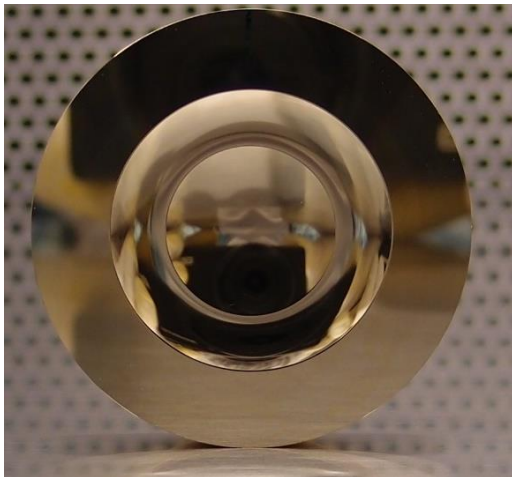


Abbildung 22: Links: gekrümmter UPM gedrehter Masterrohling ohne Lackschicht. Rechts: Masterrohling mit aufgeschleuderter Antireflexbeschichtung und Photoresist.

An der Randkante der konkaven Oberflächenform bildete sich jedoch ein Lackwall aus (siehe Abbildung 22), der zwar minimiert aber nicht vollständig eliminiert werden kann. Das Aufschieuern der Fotolackschicht wurde für eine Dicke von $2,3\text{ }\mu\text{m}$ optimiert. Auch hier kann der Lackwall am Rand der Funktionsfläche nicht vollständig vermieden werden. Bei fehlerhaftem Aufschieuern der Lackschicht konnte diese nachträglich durch das Belichten von 180 s an der Vorbelichtungsmaschine und durch anschließendes nasschemisches Entwickeln mit 351-Developer (Verhältnis: 1:5 H_2O) entfernt werden.

Optimierte Parameter zum Aufschieuern der Photolackschicht:

- Lack: S1818
- Schleuderzeit: 30 s
- Umdrehungsbeschleunigung: $800/s^2$
- Umdrehungsgeschwindigkeit: 1500 U/s
- Deckel geschlossen
- Ofen: 45 min bei $90\text{ }^\circ\text{C}$

3.7. Strukturierung des Resistmasters auf Werkzeugstempeln

Für die Fertigung des NBE wurden die rotationssymmetrischen diffraktiven Blazegitter-Strukturen auf dem Resistmaster strukturiert. Die Solltiefe der Struktur wurde mit $1,63\ \mu\text{m}$ für die Designwellenlänge $840\ \text{nm}$ ausgelegt.

Die Zentrierung des Substrates auf der Drehscheibe der Belichtungsmaschine erfolgte per Hand anhand der Drehspuren auf der Substratoberfläche, die das Zentrum deutlich auf dem Kamerabild der Belichtungsmaschine erkennen lassen (Abbildung 23). Die Zentriergenauigkeit der diffraktiven Strukturen zur rotationssymmetrischen Geometrie des Metallkörpers betrug etwa $1\ \mu\text{m}$.

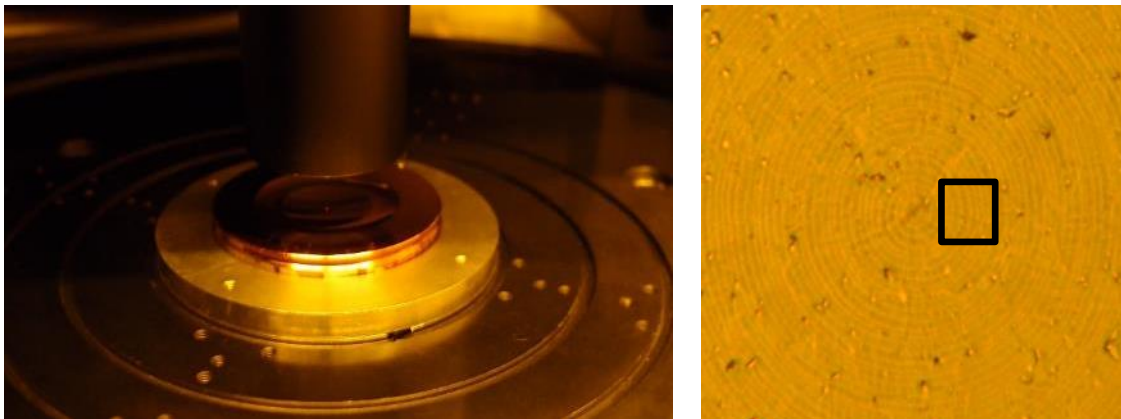


Abbildung 23 Links: Einzentriertes Mastersubstrat mit Fassungsring zur Vakuumanströmung. Rechts: Kamerabild des Oberflächenzentrums, welches dazu genutzt wurde, um das Substrat präzise zu positionieren.

Der Datensatz für die Modulation wurde unter Berücksichtigung des Krümmungsradius des Werkzeugeinsatzes generiert. Durch Belichtungsreihen wurde die optimale Belichtungs-dosis für die Soll-Tiefe der diffraktiven Struktur quantitativ ermittelt. Die Belichtungs-wellenlänge des Schreiblasers beträgt 405 nm.

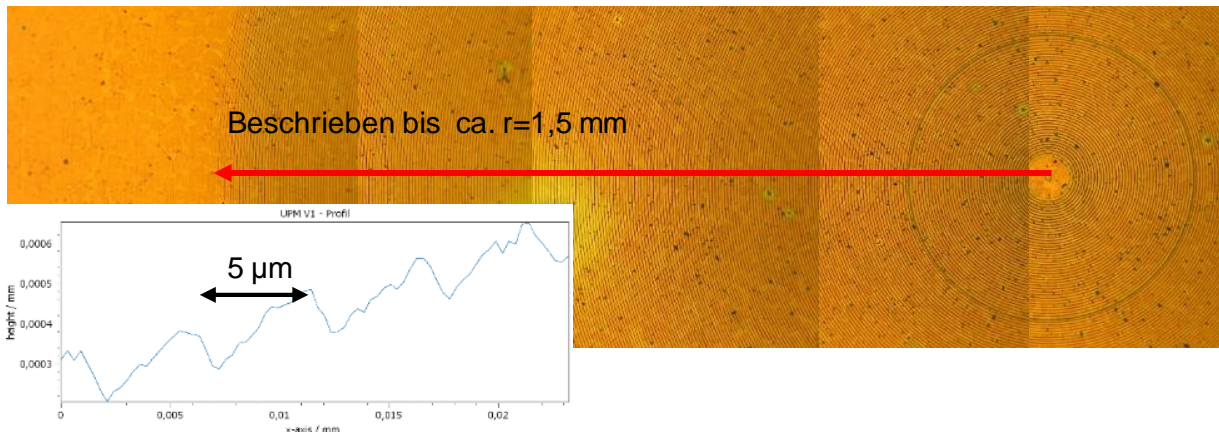


Abbildung 24: Mikroskopbilder einer strukturierten gekrümmten Messingoberfläche. Nach $r=1,5\text{mm}$ ist das Autofokussystem ausgefallen.

Unter Vorgabe der Höhenkoordinate in Abhängigkeit der Radialkoordinate wird das Objektiv des Schreiblasers entlang der Substratoberfläche kontinuierlich in die Fokusposition gefahren. Kleine Abweichungen aus der Fokuslage werden durch das Autofokussystem korrigiert. Dieses System detektiert ein von der Oberfläche reflektiertes Lasersignal und ändert in Abhängigkeit von der gemessenen Intensität die Höhenposition des Objektivs mit Hilfe eines Piezoelements. Hierbei stellt die Krümmung der Oberfläche eine Herausforderung dar. Durch die unterschiedlichen Oberflächengradienten wird das Lasersignal in Abhängigkeit von der Radialkoordinate unter verschiedenen Winkeln auf den Detektor gelenkt, weshalb unterschiedliche Leistungen detektiert werden. Bei zu großen Abweichungen des Lasersignals erreicht das Piezoelement sein Limit und kann nicht mehr nachgeregelt werden. Bei ersten Belichtungstests führte das ab einer zu großen Oberflächenkrümmung zu regelmäßigen Ausfällen des Autofokussystems, weshalb nur ein Teilbereich der Funktionsfläche strukturiert werden konnte (siehe Abbildung 24). Auch die Zentrierung des Substrates war hier entscheidend für die Funktionsfähigkeit des Autofokussystems, da bei ungenauer Positionierung die vorgegebene Höhenkoordinate nicht mehr mit der tatsächlichen Position übereinstimmt und das Piezoelement sein Limit erreicht.

Durch eine Optimierung der Detektorposition und präziser Zentrierung des Substrats konnte ein stabiler Autofokusbetrieb erreicht werden. Der Ausfall des Autofokussystems an der Randkante der Funktionsfläche kann aufgrund des Lackwalls nicht vermieden werden, wodurch die Breite des Lackwalls eine prinzipielle Limitierung darstellt. Für die Funktion des NBE hat dies jedoch aufgrund des kleineren optisch genutzten Bereichs keine negativen Auswirkungen. Die Belichtungszeit der Funktionsfläche betrug etwa 2,5 Stunden.

Die anschließende Entwicklungszeit beträgt 90 Sekunden in einem Bad mit dem Entwickler 351 (Verhältnis 1:5 H₂O) von Microresist.

Die strukturierte Oberfläche ist in Abbildung 25 dargestellt. Im Zentrum des Substrates (**b**) ist ein kleiner Dip mit einer Breite von etwa 80 μm zu erkennen. Um das Zentrum sind gleichmäßig verteilte geblazete Strukturen mit immer kleiner werdender Periode in konzentrischer Anordnung deutlich erkennbar. Die Strukturtiefe wurde mit dem Schichtdickenmessgerät (siehe Kapitel 3.11) auf etwa 1,8 μm bestimmt und ist damit etwas tiefer als die Soll-Tiefe von 1,63 μm . Etwa 2,5 mm abseits des Zentrums (**d**) ist die Strukturierung weiterhin gut zu erkennen. Am Randbereich bei etwa 9,8 mm (**c**) ist durch die oben genannte Lackwallproblematik die Strukturierung fehlgeschlagen. Für den nächsten Prozessschritt wurde der strukturierte Masterrohling an HSG zur Galvanoabformung übergeben.

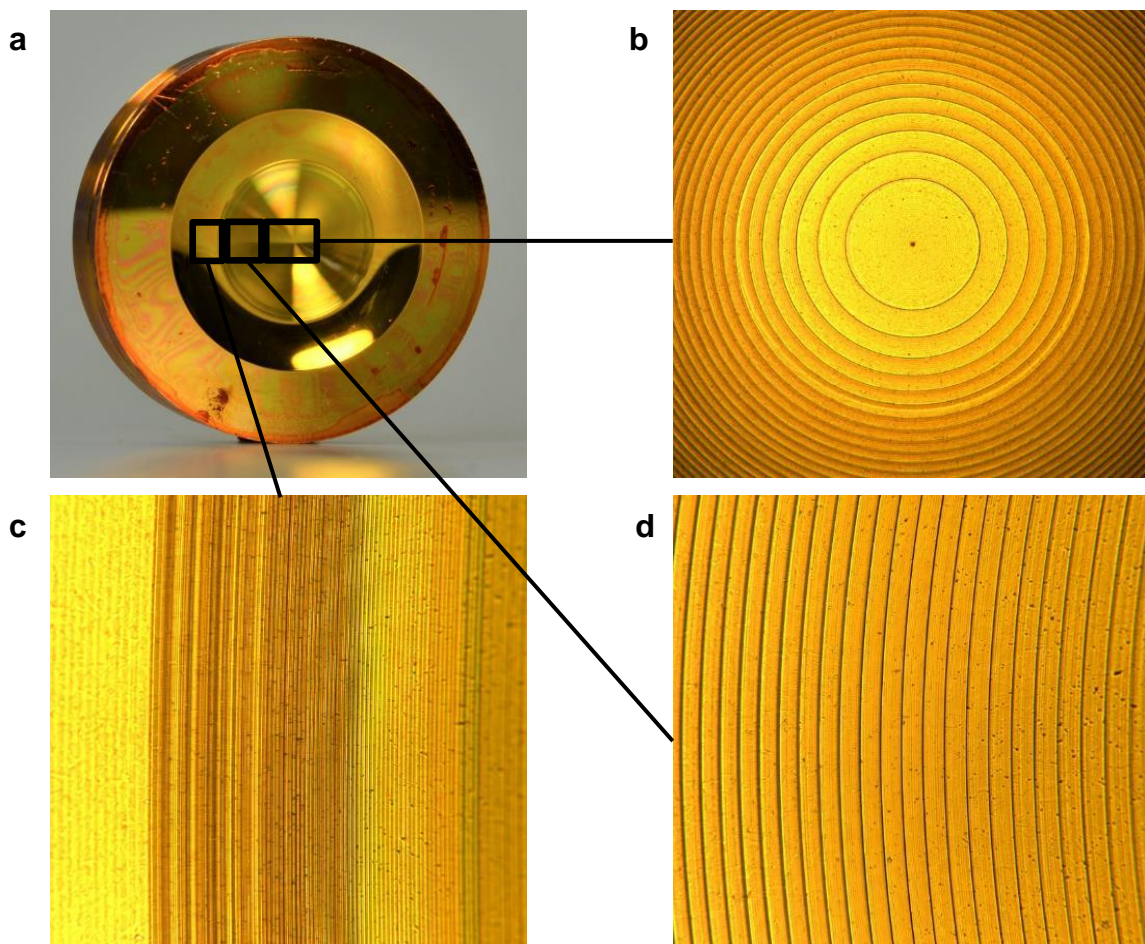


Abbildung 25: a: Strukturiertes Masterrohr. b: Mikroskopische Aufnahme des Zentrums. c: Strukturierungsfehler am Lackwall. d: Strukturierung bei $r=2,5\text{mm}$.

3.8. Prozessentwicklung zur galvanischen Abformung gekrümmter mikrostrukturierter Oberflächen

Um einen mikrostrukturierten, gekrümmten Werkzeugeinsatz mit integrierter Zentriereinheit herzustellen, sollte innerhalb des Projekts eine Prozesskette erarbeitet werden, die es erlaubt von belackten, laserstrukturierten Grundkörpern, galvanische Nickelkörper abzuformen. Die galvanische Abformung beschreibt das Aufwachsen einer Schicht aus Nickelatomen auf einem mikrostrukturierten Grundkörper, sowie deren anschließende Entformung und Reinigung.

Hierzu wird ein elektrisch leitfähiges Bauteil in ein Nickel-Elektrolytbad gehängt. Dieses setzt sich aus Wasser, Nickelsulfamat, Nickelchlorid als Leitsalz sowie Borsäure als Pufferlösung zusammen. Zusätzlich werden vereinzelt Benetzungsmittel zugeführt. In dem Bad wird ebenfalls ein Anodenkorb mit Nickelpellets befestigt. Über einen Gleichrichter werden Bauteil (Kathode) und Anodenkorb (Anode) elektrisch kontaktiert. Durch die anliegende Spannung werden positiv geladene Nickelionen zur negativ geladenen Kathode bewegt und lagern sich an deren Oberfläche ab. Gleichzeitig werden Nickelionen im Elektrolytbad aus der Anode gelöst, wodurch sich ein konstantes Ionengleichgewicht im Bad einstellt. Das Schichtwachstum ist entsprechend langsam, aber hochpräzise, so dass auch kleinste Mikro- und Nanostrukturen abgeformt werden können. Man spricht allgemein von einer elektrochemischen Metallabscheidung.

Die Erarbeitung der Prozesskette wurde in mehrere Schritte unterteilt:

- Galvanische Nickelabformung einfacher Testkörper
- Galvanische Abformung gekrümmter Probekörper
- Galvanische Nickelabformung gekrümmter und strukturierter Masterstrukturen

Die Bauteile sollten in Nickel abgeformt werden. Für die Versuche wurde der Nickelsulfamat-Elektrolyt *MacDermid Enthone Lectro-Nic HAR-1000* verwendet. 100 L der Lösung enthalten in diesem 185 g/L Nickelsulfamat. Die resultierenden Schichten weisen eine hohe Härte auf, was für den späteren Einsatz im Spritzgusswerkzeug gefordert wurde. Die galvanische Abformung von Nickelstrukturen setzt sich aus mehreren Schritten zusammen, welche in Abbildung 26 dargestellt sind.

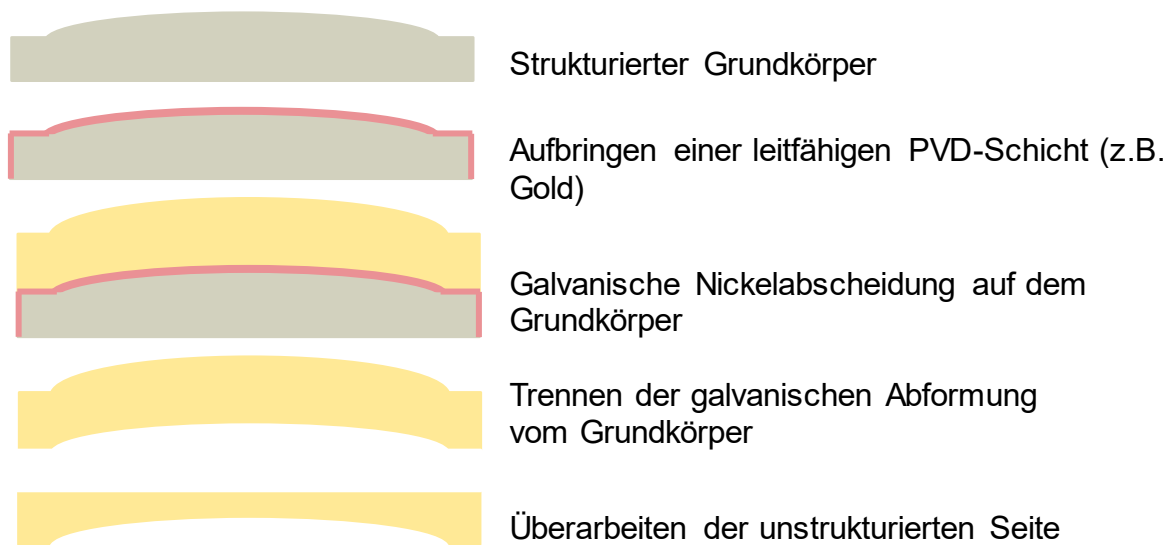


Abbildung 26: Die Prozesskette zur galvanischen Abformung von Nickelstrukturen.

Für die Vorversuche wurden in einem ersten Schritt Plattensubstrate aus Messing mit Nickel beschichtet. Diese wurden über einen metallenen Steg verbunden und gemeinsam im Galvanikbad elektrisch kontaktiert. Die ersten Versuche zeigten bereits, dass Nickel auf der Probe abgelagert wird, jedoch kam es zu starken Überwachsungen in den Ecken- und Randbereichen, wie Abbildung 27 zeigt. Weiterhin kam es zu starken Fremdabscheidungen auf den leitenden, kontaktierten metallischen Flächen, wie z.B. der Halterung der Substrate.

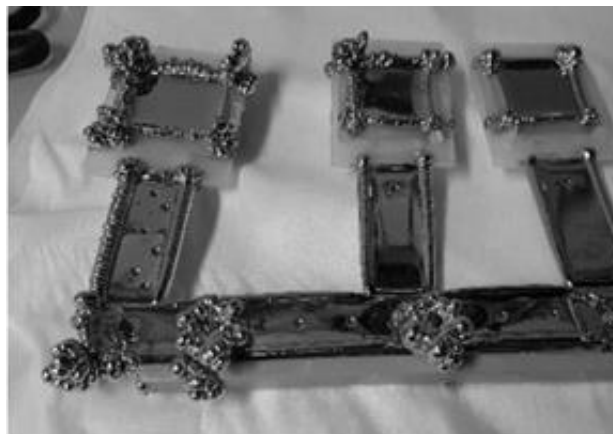


Abbildung 27: Die ersten Versuche mit dem Nickelbad führten noch zu starken Fremdmetallisierungen und Überwachsungen an den Rändern der Strukturen.

Im Folgenden wurden daher Versuchsreihen durchgeführt, um die späteren Substrate zum einen elektrisch zu kontaktieren, gleichzeitig aber Fremdmetallisierungen zu vermeiden. Die in Abbildung 28 gezeigte Durchführung zeigt, dass das Substrat in einen Zylinder versenkt wird und im Anschluss auf der Substratrückseite mit einem Lehrenband kontaktiert wird. Nach zwei Tagen ist eine ca. 2 mm dicke Nickelschicht auf dem Substrat aufgewachsen. Schwierigkeiten gab es

bei der Trennung („Entformung“) des ursprünglichen Substrats und der aufgewachsenen Nickelschicht, sowie den Überwachungen am Rand der Struktur. Aufgrund verstärkter Adhäsion im Randbereich brach die Struktur beim Entformen.



Abbildung 28: Die Abformung des einfachen Bauteils war nur schwer zu realisieren, da Überwachungen an den Rändern zu Schwierigkeiten bei der Entformung führten.

Die Struktur wurde daher in der Form versenkt, um ein Überwachsen an den Rändern zu verhindern. Wie in Abbildung 29 gezeigt, ist dies gelungen. Die Nickelschicht weist die zuvor aufgetretenen Randeffekte nicht mehr auf, jedoch wurden mehr Lunker an der Oberfläche der Nickelstruktur beobachtet. Dies ist auf die schlechtere Anströmung innerhalb der Form zurückzuführen, wodurch weniger Luft- und Gasblasen abgetragen werden.



Abbildung 29: Nach dem Versenken der Struktur in dem Zylinder konnten die Überwachungen stark reduziert werden. Jedoch waren mehr Lunker an der Oberfläche zu beobachten.

Die zuvor erarbeiteten Kenntnisse wurden genutzt, um eine konkave Struktur, welche der finalen Linsenstruktur nachempfunden wurde, galvanisch abzuformen. Dazu wurde die Messingstruktur mit einer CNC-Maschine drehend bearbeitet und im Anschluss nach Reinigung galvanisch abgeformt. Da später ein dickeres Schichtwachstum vorgesehen ist, wurde die Struktur für vier Tage in dem Bad gelassen. Nach 24 Stunden wurde jeweils der pH-Wert des Bades kontrolliert, sowie verdunstetes Wasser nachgefüllt. Auf Basis der Fläche wurde der benötigte Strom berechnet. Aus dem Durchmesser des Bauteils (0,5 dm) ergibt sich die zu beschichtende Fläche von 0,785 dm². Aus dem Datenblatt des Elektrolyten wird der optimale Strom pro Fläche entnommen. In diesem Fall beträgt dieser 5 A/dm² folglich wurden in dem Versuch ca. 4 A eingestellt. Um eine spannungsarme Startschicht zu erzeugen, wurde erst nach 24 h die vollständige Stromstärke eingestellt und zuvor mit der Hälfte (2 A) begonnen. Wie in Abbildung

30 ersichtlich wird, konnte erfolgreich eine Nickelschicht auf dem Messingbauteil abgeschieden werden. An den Rändern der Struktur kam es zu starken Überwachsungen, was dazu führte, dass die beiden Strukturen nur unter Zuhilfenahme mechanischer Zerspanung getrennt werden konnten.



Abbildung 30: Die verschiedenen Stadien der Abformung.

Auf Grund der ersten erfolgreichen Abformungen, wurde im nächsten Schritt ein Grundsubstrat mit dem Fotolack mittels Spincoating beschichtet. Im Anschluss wurden diffraktive Strukturen mittels Laserdirektschreiben in den Lack geschrieben. Aufgrund der Rauheit des Messingeneinsatz konnten jedoch nur Strukturen in einem Radius von 1,5 mm von der Bauteilmitte ausgehend geschrieben werden. Im Anschluss an die Strukturierung wurde die Probe mit einer 20 nm dicken Goldschicht beschichtet, um eine elektrisch leitfähige Oberfläche zu schaffen. Die Goldschicht wurde mittels Bedampfung in einer *Q150R ES PVD*-Anlage der Marke *Quorum Technologies* aufgetragen. Die Probe wurde daraufhin mit folgenden Parametern mit Nickel beschichtet. Die Probe wurde fünf Tage in dem Nickelbad gelassen.



Abbildung 31: Nach Auftrag und Strukturierung des Fotolacks konnte eine Nickelschicht auf dem Bauteil abgeschieden werden. Diese wurde im nächsten Schritt mechanisch entfernt. Die Struktur konnte erfolgreich auf das Nickelbauteil übertragen werden.

.

Nach der mechanischen Trennung des Nickelbauteils von der Masterstruktur ist eine Goldfärbung der Oberfläche sichtbar. Dies deutet darauf hin, dass die Sputterschicht beim Entformen mit abgehoben wurde. Die diffraktiven Strukturen konnten in die Nickeloberfläche übertragen werden und sind in der Bauteilmitte deutlich sichtbar. Ebenfalls sichtbar ist eine starke



Abbildung 32: Die Bauteilhalterung ermöglicht die elektrische Ankontaktierung.

Lunkerbildung an der dem Elektrolyt zugewandten Seite des Nickelbauteils. Dies kann zum einen durch die erhöhte Schichtdicke (hier: ca. 4,5 mm) und die daraus resultierenden Spannungen, aber auch mit einer schlechteren Anströmung der Bauteiloberfläche und somit verringertem Abtrag von Gasen an der Oberfläche zusammenhängen. Dies resultiert aus der geänderten Lagerung des Bauteils in dem Bad. In Abbildung 32 ist die Bauteil-Halterung zu sehen. Das Bauteil wird in der zylindrischen, aus Polyoxymethylen (POM) gefertigten Halterung versenkt und rückseitig elektrisch kontaktiert. Das Versenken in dem Zylinder hat den Vorteil, dass ein gerichtetes Schichtwachstum möglich ist, jedoch die Anströmung in dem Bad nicht mehr vollständig ausreicht, um Gasblasen abzutransportieren. Ebenfalls sichtbar in dem Bild sind abgedeckte Schrauben und Metallteile, die Teil der Halterung sind. Diese müssen abgedeckt, bzw. elektrisch isoliert werden um jegliche Fremdmetallisierung zu verhindern. Wird dies nicht getan, kommt es zu starken Fremdmetallisierungen, welche das Aufwachsen auf der eigentlichen Probe unterbinden und somit die Geschwindigkeit des Aufwachsens stark verringern. Durch diese „Störfaktoren“ kann kein reproduzierbarer Prozess etabliert werden.

Zusätzlich verringert sich die Konzentration von Nickelionen an der Bauteiloberfläche und kann zum sogenannten Verarmen des Elektrolyten an der Bauteiloberfläche führen.

Im nachfolgenden Versuch wurde nach ähnlichem Aufbau ein ultrapräzisionsgefertigter Messingmaster beschichtet, laserstrukturiert und im Anschluss galvanisch abgeformt. Durch die geringe Oberflächenrauheit ($R_a < 20 \text{ nm}$) des Masters war eine Strukturierung des Fotolacks auf dem Grundkörper über die komplette Funktionsfläche möglich. Der strukturierte Resistmaster war bereits in Abbildung 18 zu sehen. Die nachfolgende galvanische Abformung der Masterstruktur wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Stromstärke: 0,5 A (nach 24 h: 1 A)
- Spannung: 1,78 V (nach 24 h: 3,59 V)
- pH-Wert: 3,2
- Laufzeit: 20 Tage

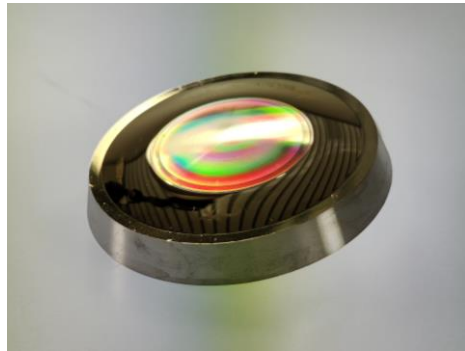


Abbildung 33: Links: Die Nickelschicht auf dem Messingmaster ist ca. 9 mm aufgewachsen. Rechts: Nach dem Entformen und dem Drahterodieren ist der Einsatz vorbereitet zum Einbau in das Spritzprägewerkzeug

Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, ist eine dicke Nickelschicht auf dem Bauteil aufgewachsen. Diese weist eine Höhe von ca. 9 mm an der dünnsten Stelle auf. Für die anschließende Nachbearbeitung war eine entsprechende Dicke gefordert, um ein sauberes Abtrennen der Überwachsenen Seite zu ermöglichen. Die Nachbearbeitung erfolgte durch die *Günther Krohmer GmbH* mittels Drahterodieren. Dazu wurde das Nickelbauteil mit dem noch anhängenden Messing-Grundkörper eingespannt und parallel zur Auflagefläche nachgearbeitet. Zusätzlich wurde ein Konus von 60° in die Seitenwand des Bauteils gefräst. Innerhalb dieses Prozesses wurde der Messinggrundkörper von dem Nickelbauteil getrennt. Im nächsten Schritt konnte der hergestellte Werkzeugeinsatz in die dafür vorgesehene Einsatzplatte eingefügt und in das Spritzprägewerkzeug überführt werden.

3.9. Herstellung der optischen Komponenten für die gekapselten DOEs

Das endgültige Bauteil besteht aus zwei zueinander ausgerichteten Linsen, welche beide im gleichen Spritzprägewerkzeug mit unterschiedlichen Werkzeugeinsätzen hergestellt werden konnten. Durch die vorgesehene Einsatzplatte konnte der unstrukturierte Einsatz nach erfolgreicher Abmusterung gegen den zweiten mikrostrukturierten Einsatz getauscht werden. Die Abmusterung wurde auf einer *Arburg Allrounder 370A* Spritzgussmaschine durchgeführt. Als Material wurde Evonik **Trogamid myCX** verwendet.

Für die Abmusterung wurden folgende Parameter an der Maschine eingestellt:

- Trocknung: 10 h, 90 °C
- Werkzeugzuhaltekraft: 20 kN
- Zykluszeit: 84,5 s
- Temperierungsart: Wasser

- Werkzeugtemperatur: 280 °C
- Einspritzstrom: 10 cm³/s
- Spritzdruck: 1600 bar

Diese wurden unter anderem in Absprache mit der *Arburg GmbH + Co KG* als vorhabensbezogene Leistung der Wirtschaft erarbeitet. Das Spritzprägewerkzeug ist in Abbildung 34 im eingebauten Zustand zu sehen.

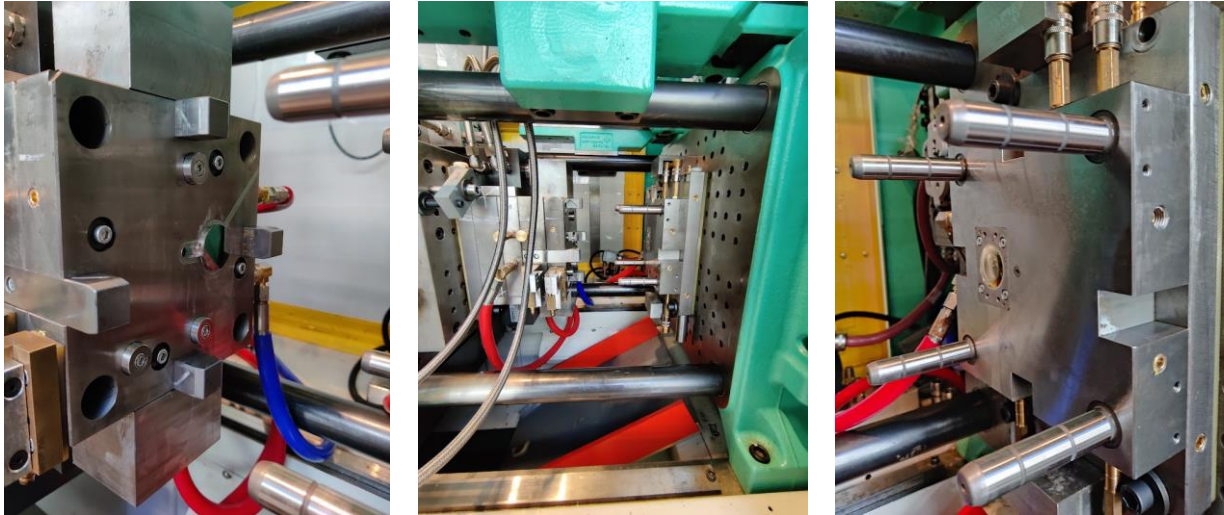


Abbildung 34: Links: Auswerferseite des Spritzgusswerkzeugs, Mitte: Das Spritzgusswerkzeug eingebaut in der Anlage, Rechts: Die Einsatzseite des Werkzeugs

Die Kunststoffschmelze wird über die sogenannte Schnecke nach dem Zusammenfahren der Werkzeughälften eingespritzt und im Anschluss durch den beweglichen Stempel in der Kavität weiter verdichtet. Dort erstarrt der Kunststoff und wird durch die mittels Druckluft gesteuerten Auswerferstifte nach dem Auffahren der Werkzeughälften aus dem Werkzeug gestoßen. Insgesamt wurden 250 strukturierte Linsen und 100 unstrukturierte Linsen abgemustert. Eine der mikrostrukturierten Linsen ist in Abbildung 35 dargestellt. Im richtigen Winkel beleuchtet, wird die spektrale Aufspaltung des Lichts an der Funktionsfläche durch einen „Regenebogen-Effekt“ ersichtlich. Dies deutet auf eine erfolgreiche Übertragung der Mikrostrukturen in die Kunststoffoberfläche hin.



Abbildung 35: Die mittels Spritzprägen hergestellte Kunststofflinse.

3.10. Fügen der optischen Komponenten

Um das Nullbrechkräftelement herzustellen, wurde als letzter Schritt das Fügen der zwei hergestellten Linsen durchgeführt. Dazu wurde von Hahn-Schickard eine Vorrichtung konstruiert und aufgebaut. Die Apparatur ist in Abbildung 36 dargestellt. Auf zwei Achsen lagern zwei gefederte Stahlplatten. Diese können mittels eines Schraubstocks, in den die Platten eingefasst sind, zueinander verfahren werden. Auf beiden Platten lagern zwei zylindrische Platten aus Polytetrafluorethylen (PTFE- „Teflon“), welche zur Lagerung der Linsen genutzt werden. PTFE wurde auf Grund seiner inerten Eigenschaften als Kontaktmaterial zu den Linsenoberflächen gewählt, damit deren optische Oberflächen nicht beim Fügen beschädigt werden. Zusätzlich wurden auf der unteren Platte zwei Messuhren installiert. Diese dienen zum Prüfen zur Parallelität der Platten zueinander.

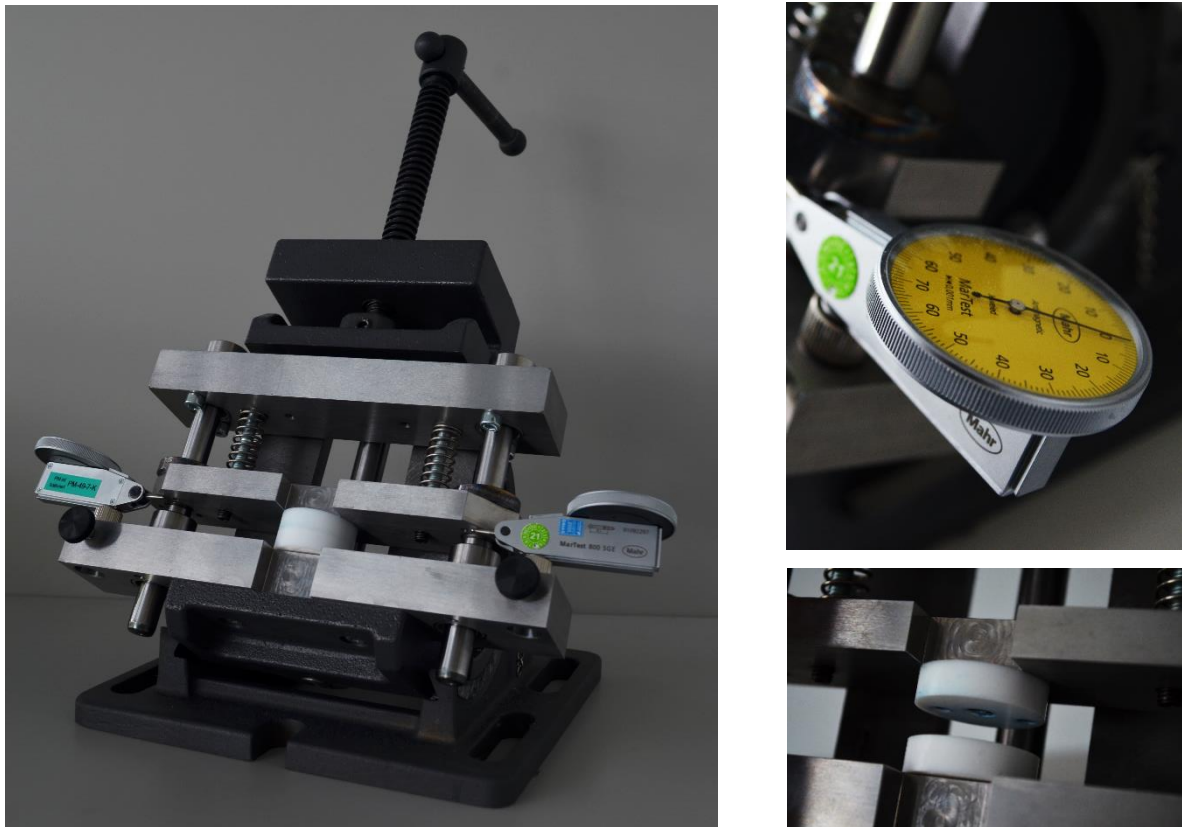


Abbildung 36: Die Vorrichtung zum Ausrichten und Fügen der Linsen.

Zum Ausrichten und Fügen der optischen Komponenten werden die zwei gegensätzlichen Kunststoffbauteile zwischen den Teflon-Platten eingefasst. Zeigen beide Messuhren die gleichen Werte an, kann sofort Klebstoff auf den dafür vorgesehenen Klebespalt appliziert werden. Als Klebstoff wurde *Loctite 406* auf Grund seiner niedrigen Viskosität und geringen Aushärtezeit gewählt. Durch die niedrige Viskosität wird der Klebstoff nach Applikation in den Klebespalt gezogen und mittels Kapillarwirkung dort verteilt. Die Klebstoffmengen wurden händisch appliziert, da die Entwicklung eines Applikationsprozesses im ersten Schritt nicht vorgesehen war. Eine Bedingung im Projekt war, dass sich nach der Applikation kein Klebstoff auf den Mikrostrukturen oder den Linsen ablagert. Durch den einwirkenden Druck bei der Klebstoffapplikation bilden die aufeinandertreffenden Zentrierstrukturen eine Barriere für den Klebstoff. Um die korrekte Funktion nachzuweisen wurde der Klebstoff mit handelsüblicher Tusche versetzt, um die Klebstoffverteilung besser nachvollziehen zu können. Das Ergebnis ist in Abbildung 37 zu sehen. Es wird ersichtlich, dass kein Klebstoff auf die Mikrostrukturen oder die Linsen gelangt.



Abbildung 37: Mit Hilfe von eingefärbtem Klebstoff konnte nachgewiesen werden, dass kein Klebstoff auf die Funktionsflächen dringt.

3.11. Prozessmonitoring

Das Prozessmonitoring umfasst verschiedene messtechnische Verfahren, die genutzt werden, um den gesamten Fertigungsprozess bewerten zu können. Die Quantifizierung der einzelnen Prozessschritte ermöglicht die Optimierung der Prozessparameter und bietet empirische Daten zu den Toleranzen der einzelnen Fertigungsverfahren. Das Prozessmonitoring für den Strukturierungsprozess erfolgte überwiegend im Reinraum, um Verunreinigungen der Oberfläche zu vermeiden.

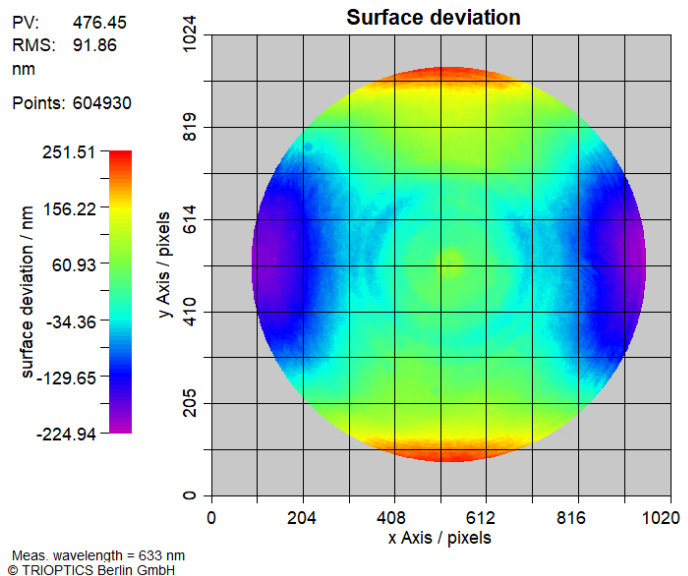
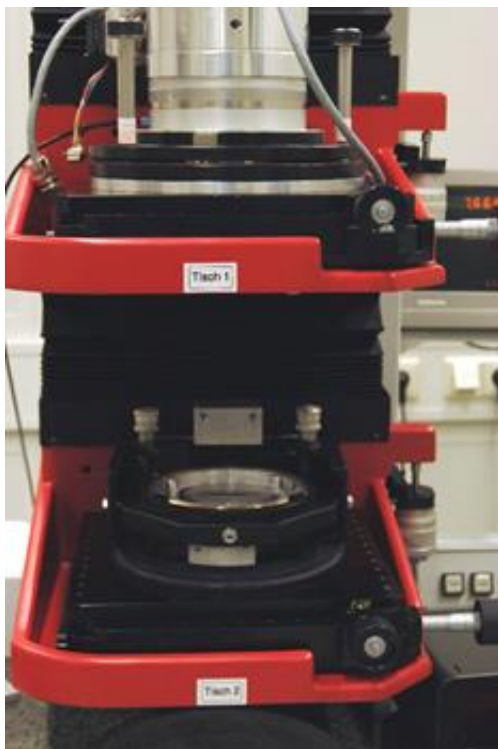


Abbildung 38: Links: Foto des Aspheric Lens Interferometers ALI200. Rechts: Oberflächenmessung der Funktionsfläche des unstrukturierten Masterrohlings.

Vor der Strukturierung der Masterrohlinge beginnt das Monitoring mit der Vermessung der Oberfläche und mit der Bestimmung des Krümmungsradius. Unter Verwendung des „Aspheric Lens Interferometers ALI200“ (kurz ALI) wird die Abweichung der Funktionsfläche von ihrer idealen sphärischen Form bestimmt. Der Radius wird durch die Positionsdifferenz zwischen der Nulltest- und der Catseyeposition der Oberfläche auf wenige Mikrometer genau ermittelt. Die genaue Bestimmung des Krümmungsradius ist essenziell für den späteren Lithografieprozess.

Nach dem nächsten Prozessschritt, dem Aufschleudern der Antireflexschicht (BARLI), wird die Homogenität der Lackschicht zunächst durch das Mikroskopbild am Ergoplan (Abbildung 39, links) beurteilt und anschließend wird mit dem eingebauten Schichtdickenmessgerät die Schichtdicke quantifiziert. Hierzu wurde das Schichtdickenmessgerät auf gekrümmte Oberflächen erweitert und eine Messautomatisierung implementiert. Der Messbereich beim Objektiv mit 20x-Vergrößerung beträgt $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$. Die Oberfläche wird mit 1 mm Schrittweite abgerastert (siehe Abbildung 39, rechts).

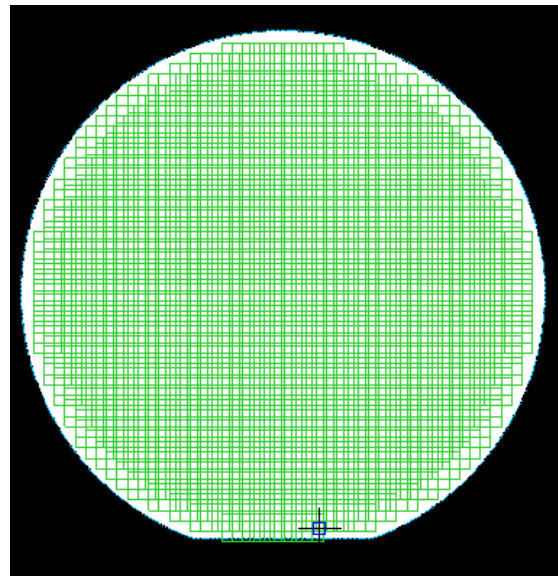
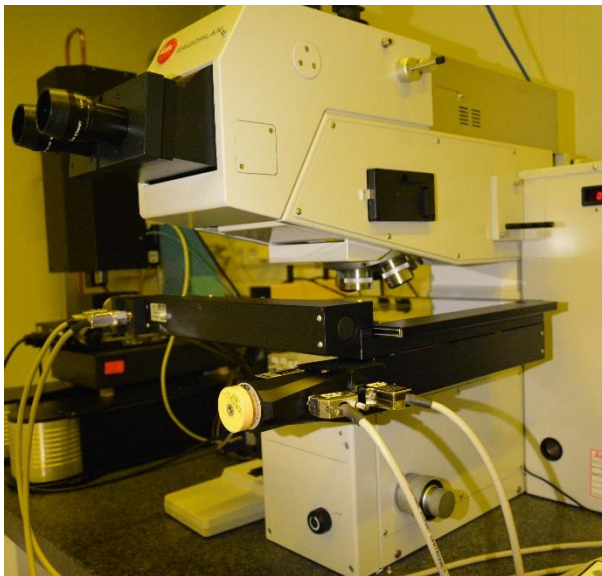


Abbildung 39: Links: Foto des Inspektionsmikroskops vom Typ Ergoplan mit integriertem Schichtdickenmessgerät. Rechts: Rasteranordnung der Messautomatisierung zur flächenhaften Bestimmung der Schichtdicke.

In Abbildung 40 links kann im Zentrum des Masterrohlings eine homogene BARLI-Schicht mit etwa 200 nm Dicke gemessen werden. An der Randkante kann die genaue Schichtdicke durch die Unstetigkeit der Oberfläche nicht bestimmt werden. Die Justagefläche ist für die Strukturierung nicht relevant, weshalb Inhomogenitäten in diesem Bereich toleriert werden können.

Die Dicke der Fotolackschicht wird ebenfalls mit dem Schichtdickenmessgerät quantifiziert (siehe Abbildung 40, rechts). Die Soll-Dicke konnte mit 2,1 μm fast vollständig über die gesamte Oberfläche gemessen werden. Im unteren Bereich sind vermutlich aufgrund einer kleinen Verkippung der Substratoberfläche Messfehler entstanden, was zu einer fehlerhaften Bestimmung der Schichtdicke führte.

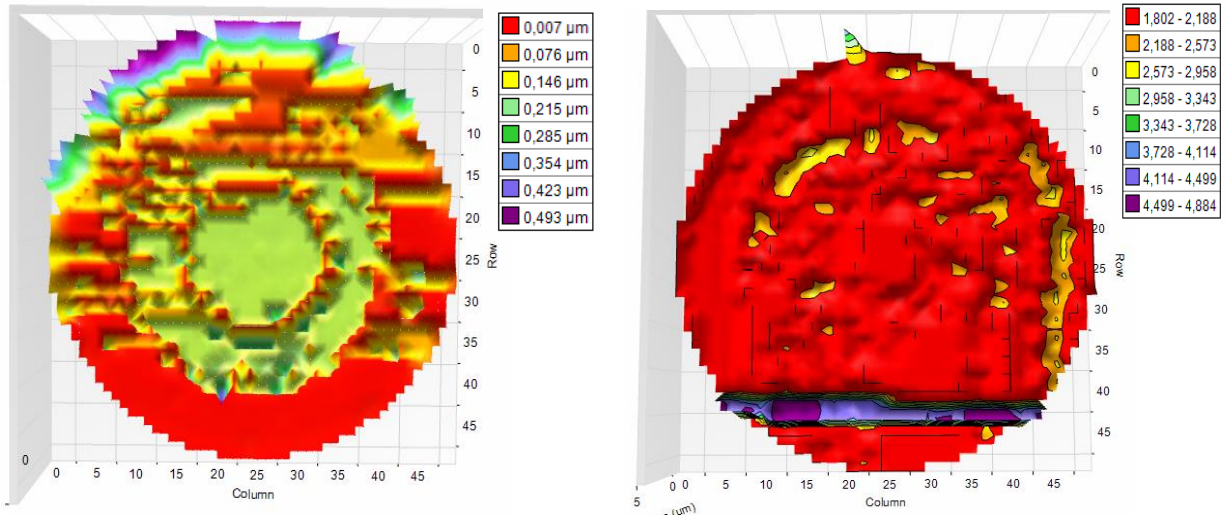


Abbildung 40: Links: Ergebnis der automatisierten Schichtdickenmessung mit BARC-Schicht. Rechts: Ergebnis der Schichtdickenmessung nach dem Aufschleudern der Photolackschicht.

Die lithografisch hergestellte Struktur konnte aufgrund des gekrümmten Masterrohlings nicht mit dem im Reinraum befindlichen Atom-Kraft-Mikroskop (kurz AFM) vermessen werden, da der Arbeitsabstand zwischen Tastkopf und Oberfläche sehr gering ist und es durch die Krümmung zur Kollision führen würde. Für Strukturbereiche mit großer Periode kann die Strukturtiefe unter Verwendung des Schichtdickenmessgerätes abgeschätzt werden. Hochfrequente Bereiche konnten aufgrund des großen Messbereiches von 16 μm^2 nicht gemessen werden.

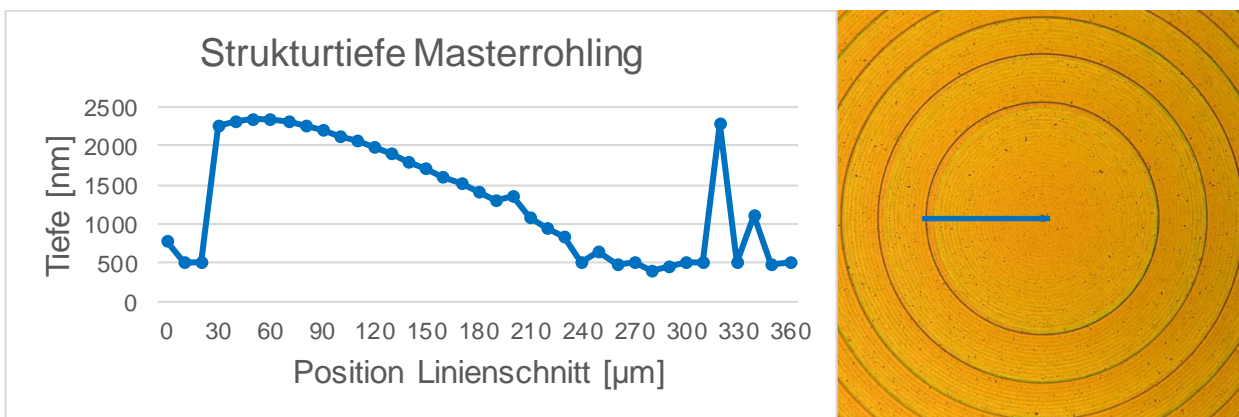


Abbildung 41: Links: Querschnittsmessung von der Schichtdicke des strukturierten Masterrohlings. Rechts: Mikroskopbild vom Zentrum des strukturierten Masterrohlings.

Die Oberflächenform des strukturierten Masterrohlings wurde außerhalb des Reinraums mit dem ALI vermessen. Die Messung erfolgt in Reflektion, damit sind die Phasensprünge der diffraktiven Strukturen nicht 2π wie hinterher in Transmission, sondern etwa 8π . Hierdurch ist die Phasenmessung gestört, was sich in ungültigen Bereichen äußert, siehe Abbildung 42. Nichtsdestotrotz erkennt man, dass die Strukturierung nicht perfekt ist, sondern einen etwa dreizähligen Höhenverlauf hat. Da sich die Störung in Transmission wesentlich schwächer auswirken wird, wurde der Master dennoch weiter prozessiert.

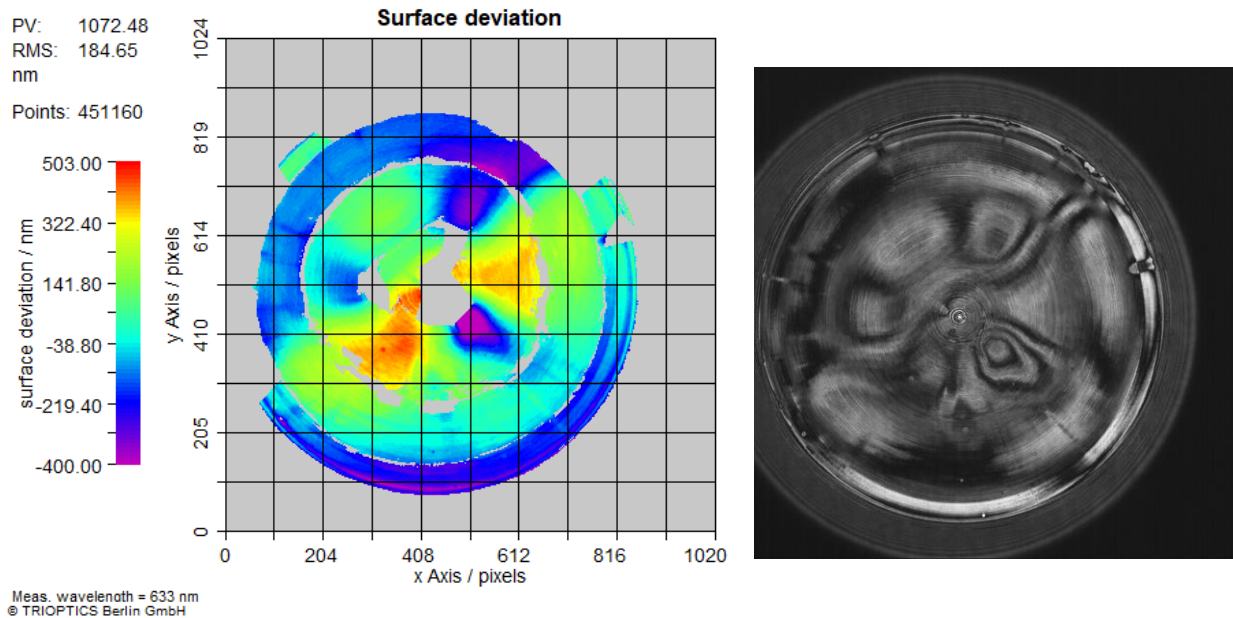


Abbildung 42: Oberflächenmessung des strukturierten Masterrohlings. Links: Abweichung der Oberfläche von der idealen sphärischen Form. Rechts: Interferogramm der links dargestellten Oberflächenabweichung.

Anschließend wurde das Bauteil zur Galvanoabformung und zur Herstellung des Nickelwerkzeugeinsatzes an HSG übergeben. Aufgrund der Art und Weise dieser Prozessschritte war kein Prozessmonitoring möglich.

Die Oberfläche des fertigen Nickelwerkzeugeinsatzes wurde wieder am ALI vermessen. Wie bereits oben erwähnt, wurde die Messung von stark ausgeprägten Störinterferenzen durch die diffraktiven Strukturen dominiert, weshalb eine topografische Darstellung der Oberfläche schwierig war. Man erkennt dennoch, dass der dreizählige Höhenverlauf in das Werkzeug mit abgeformt wurde (Abbildung 43)

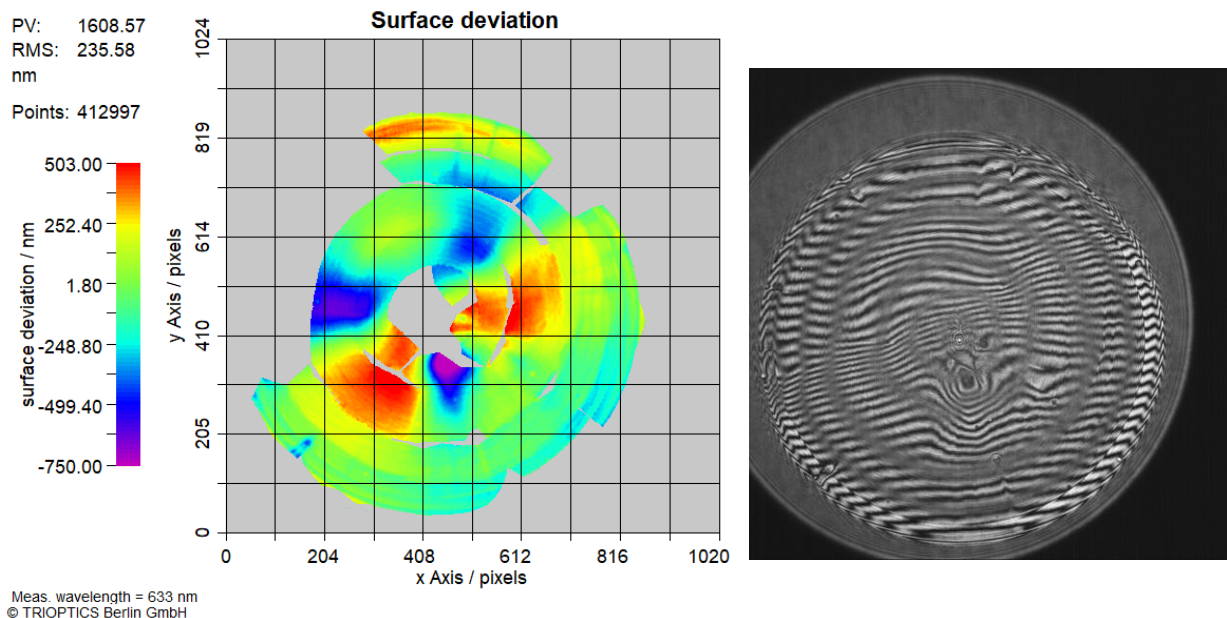
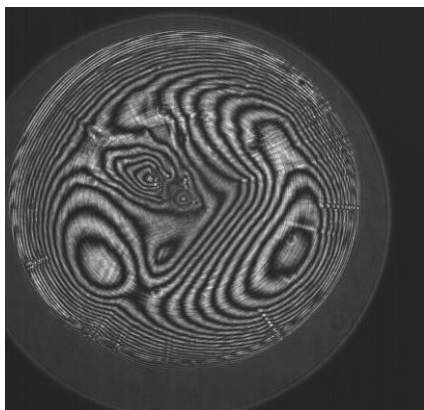


Abbildung 43: Oberflächenmessung des Nickelwerkzeugeinsatzes. Links: Abweichung der Oberfläche von der idealen sphärischen Form. Rechts: Interferogramm der links dargestellten Oberflächenabweichung.

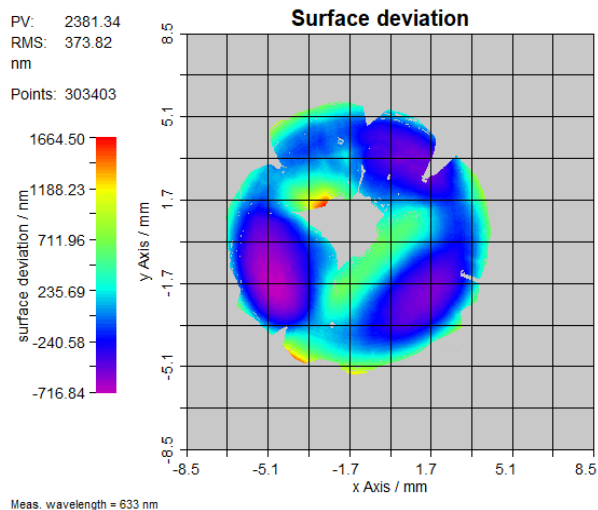
Anschließend wurde der Nickelwerkzeugeinsatz in die Spritzprägemaschine eingesetzt und erste strukturierte Linsen mittels Spritzprägeverfahren hergestellt. Die Oberfläche dieser Linsen wurde wieder am ALI vermessen. Um Störinterferenzen durch Rückreflexe an der planen Rückseite der Linsen zu vermeiden, wurde ein Schwarzlack an der Rückseite aufgetragen. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 43 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist wieder der charakteristische dreizählige Höhenverlauf. Alle gemessenen Linsen weisen die gleiche Oberflächenform auf.

Die Tiefe und Form der diffraktiven Strukturen können durch das begrenzte laterale Auflösungsvermögen des ALI nicht bestimmt werden. Deshalb wurde die Linse zusätzlich unter Verwendung der Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM200 (Abbildung 45) mit einem Weißlichtinterferometer (kurz WLI) vermessen.

a

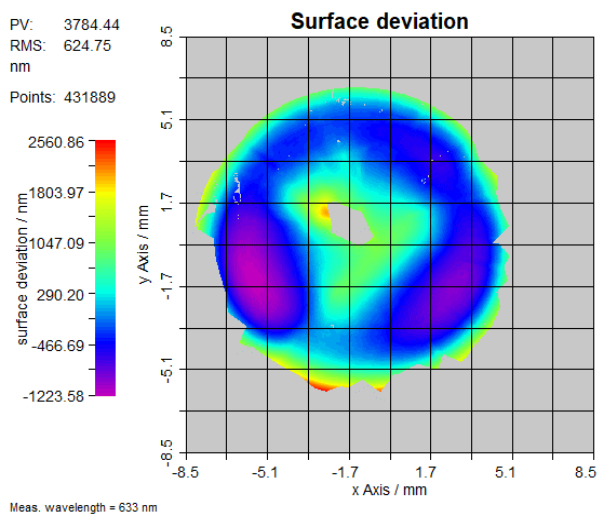


b



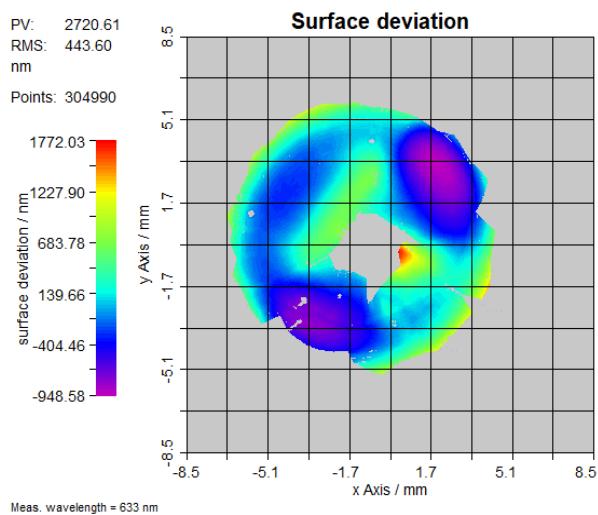
© TRIOPTICS Berlin GmbH

c



© TRIOPTICS Berlin GmbH

d



© TRIOPTICS Berlin GmbH

Abbildung 44: a: Interferogramm der in b dargestellten Oberflächeabweichung. b, c, d: Obeflächenabweichungen von drei strukturierten spritzgeprägten Linsen von der idealen sphärischen Form.

Die geblazeden Strukturen konnten deutlich aufgelöst werden und besitzen im Zentrum, abzüglich Verkippung, Defokus und Offset der Topografie eine Tiefe von etwa $1,5 \mu\text{m}$. Die Tiefe der diffraktiven Strukturen nimmt nach außen hin ab. Die Flankensteilheit ist linear ausgeprägt, wobei an den Sprüngen Abrundungen entstanden sind. Um die diffraktive Struktur der Linse besser beurteilen zu können, wurde ein Stück der Linse unter dem Atom-Kraft-Mikroskop vermessen. Die Vermessung einer kompletten Linse war aufgrund der Oberflächengeometrie nicht möglich. In Abbildung 46 ist zu sehen, dass die Abformung beim Spritzprägen bei der Blazegitter-Struktur zu einer starken Verrundung geführt hat.

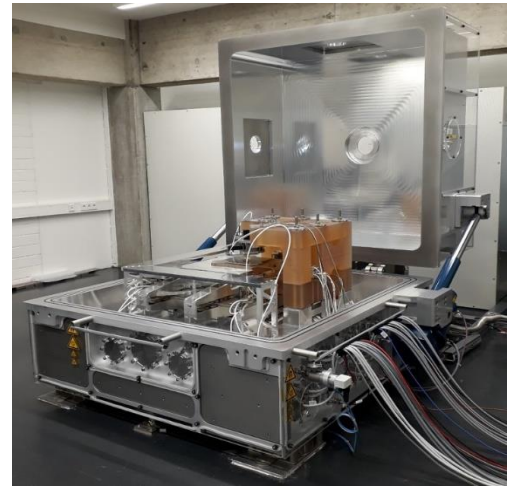


Abbildung 45: Foto der NPM200 mit geöffneter Kammer.

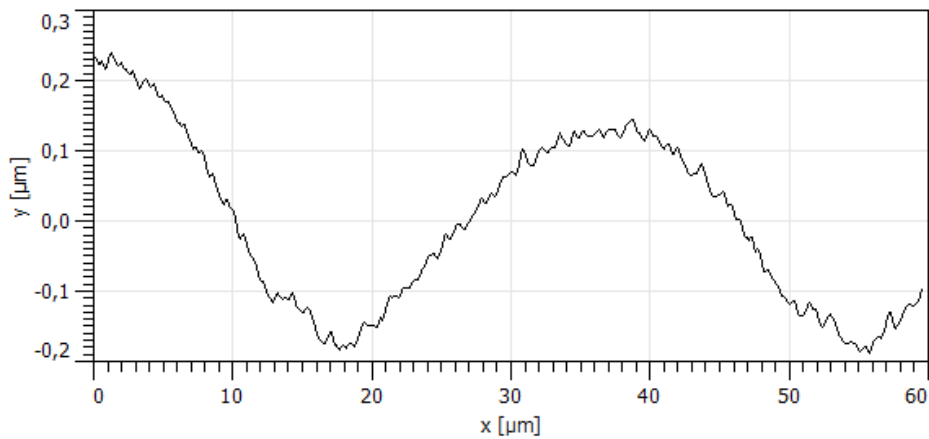


Abbildung 46: AFM-Messung der diffraktiven Struktur einer spritzgeprägten Linse.

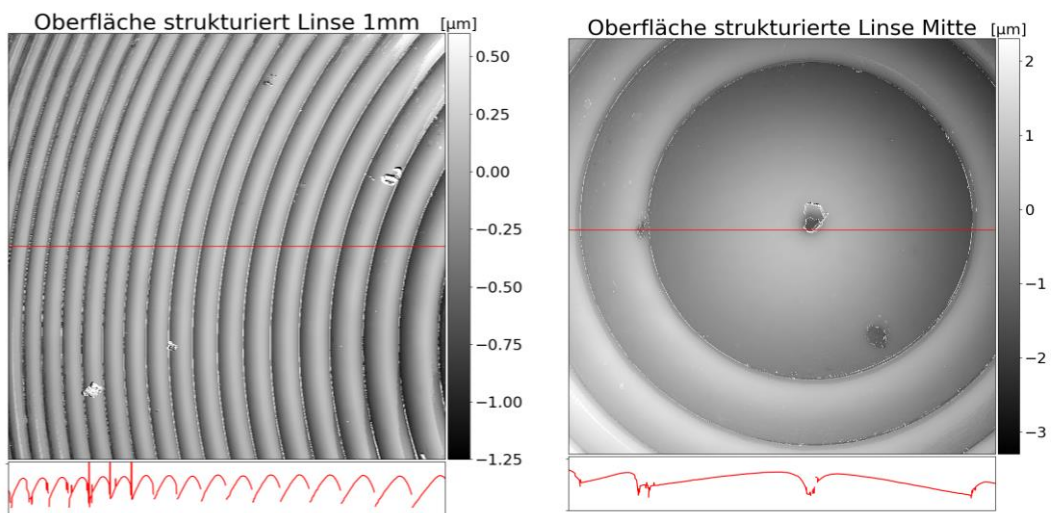


Abbildung 47: Vermessung der diffraktiven Struktur einer spritzgeprägten Linse. Links: Strukturierte Oberfläche im Abstand von 1 mm zum Zentrum. Rechts: Zentrum der strukturierten Oberfläche.

3.12. Aufbau der Demonstratoren und Messungen:

Das Nullbrechkräftelement wurde für die Verwendung eines chromatisch konfokalen Messaufbaus konzeptioniert. Der Demonstrationsaufbau dient zur Charakterisierung der chromatischen Aufspaltung des NBE entlang der optischen Achse. Die fasergekoppelte Lichtquelle deckt den Wellenlängenbereich 810 nm- 870 nm ab. Der Lichtstrahl wird aus der single-mode Glasfaser ausgekoppelt und durch einen Achromat (AC, $f = 200$ mm) kollimiert, passiert das NBE und wird schließlich durch ein Objektiv (Obj, $f = 24$ mm) auf einen planen Spiegel fokussiert, sodass der Laserstrahl in sich zurückreflektiert und über einen Y-Koppler in ein Spektrometer eingekoppelt wird. Zur Bestimmung der chromatischen Eigenschaften wird der Spiegel entlang der optischen Achse Z verfahren. Durch diesen konfokalen Ansatz werden nur die in der jeweiligen Position fokussierten Anteile des Laserspektrums zurückgekoppelt und am Spektrometer detektiert.

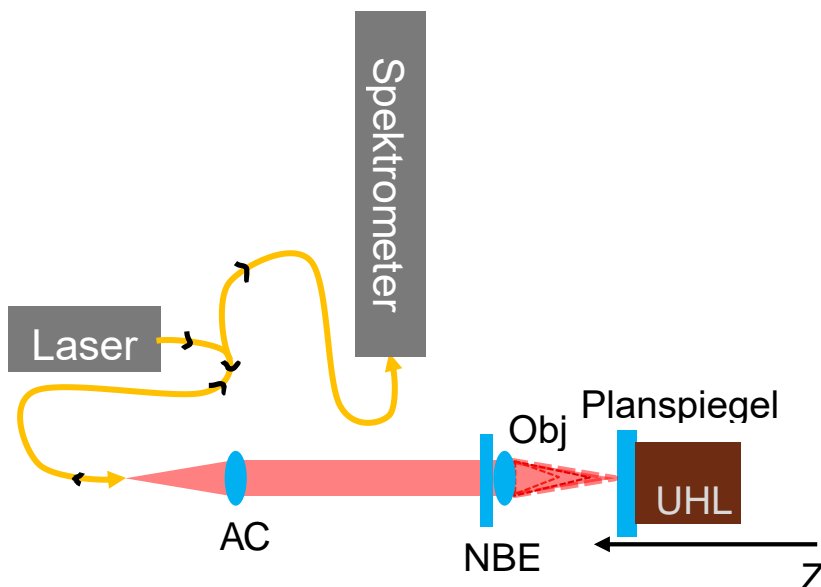


Abbildung 48: Aufbau des Demonstrators zur quantitativen Bestimmung der chromatischen Aufspaltung des NBE.

Die Messergebnisse der chromatischen Längsaberrationen sind in Abbildung 49 abgebildet. Der detektierte Wellenlängenbereich des Spektrometers ist über die optische Achse aufgetragen. Vermessen wurde ein geklebtes NBE und ein NBE ohne geklebte Flächen. In den Diagrammen in Abbildung 49 ist die detektierte Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Position des Spiegels aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass sich das detektierte Intensitätsmaximum mit Änderung der Spiegelposition linear zu höheren Wellenlängen verschiebt

und somit die gewünschte chromatische Längsaberration aufzeigt. Die Signale des geklebten Elements (rechts) sind breiter und hierdurch auch schwächer. Zudem ist die Nulllage verschoben. Diese Abweichung ist vermutlich auf eine nicht optimale Verklebung der beiden Linsenteile zurückzuführen, weshalb die Linsen zueinander nicht optimal zentriert wurden.

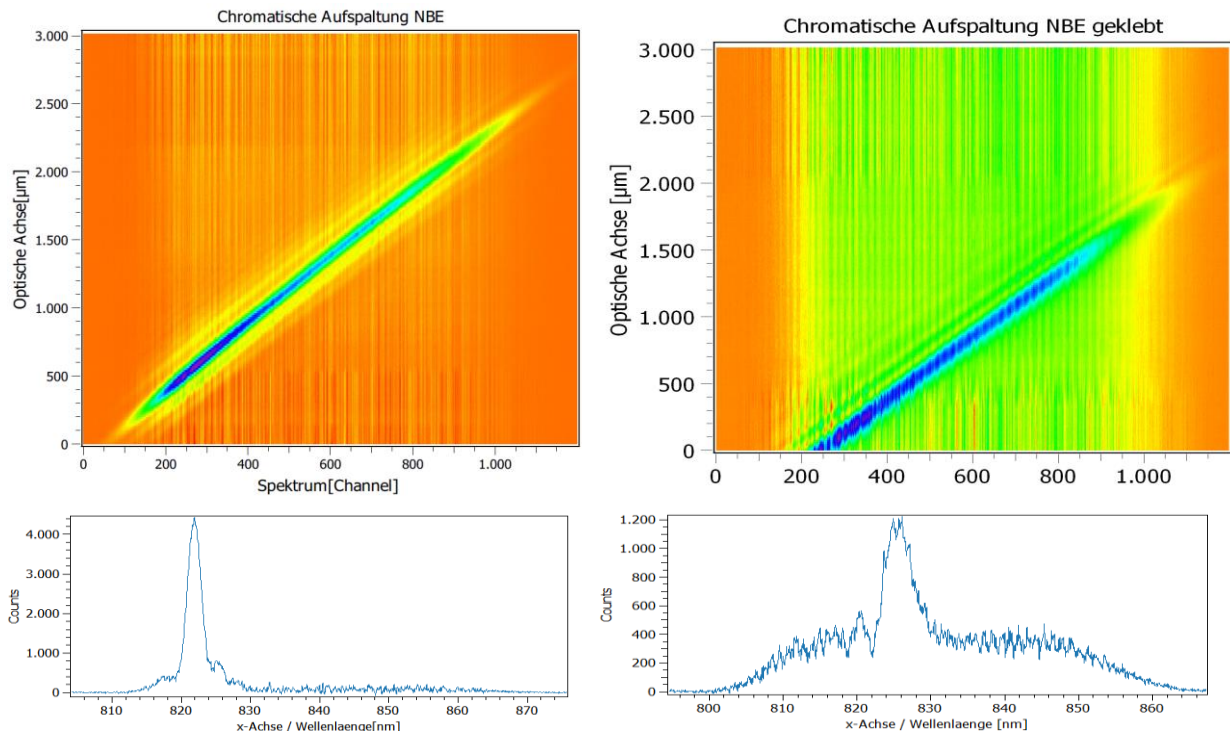


Abbildung 49: Chromatische Längsaberrationen der NBE. Links: NBE ohne verklebte Bauteile. Rechts: NBE mit geklebten Bauteilen.

3.13. Beschleunigte Umwelttests und Zuverlässigkeitsanalyse

Aufgrund deutlicher Verzögerungen im Projektverlauf, durch den Ausfall der für das Projekt entscheidenden Ultrapräzisionsdrehanlage, sowie der zeitlichen Komplikationen in der Bearbeitung, ausgelöst durch die Pandemiesituation, konnten die beschleunigten Umwelttests und Zuverlässigkeitstests nicht innerhalb der Projektlaufzeit durchgeführt werden.

4. Zusammenfassung der eingesetzten Mittel

Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1 (federführend)

Hahn-Schickard Stuttgart

Allmandring 9B

70569 Stuttgart

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr. André Zimmermann

Projektleiter: Marcel Röder, Stefan Wagner

Forschungsstelle 2

Institut für Technische Optik an der Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

70569 Stuttgart

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr. Alois Herkommer

Projektleiter: Martina Dombrowski, Kevin Treptow

Personaleinsatz

Forschungsstelle 1:

Wissenschaftlich-technisches Personal: **29,5 MM**

Technisches Fachpersonal: **10 MM**

Forschungsstelle 2:

Wissenschaftlich-technisches Personal: **34 MM**

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Forschungsziele notwendig und angemessen.

5. Ergebnistransfer

5.1. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Aus Sicht von HS-S und ITO wurden wichtige Erkenntnisse im Optikdesign, der Herstellung und der Kapselung diffraktiver optischer Elemente (DOE) gewonnen.

Durch das Projekt wurde Know-how zur Herstellung galvanischer Nickel-Werkzeugeinsätze generiert. Dazu wurde der Prozess bei Hahn-Schickard eingeführt und etabliert und steht für zukünftige Projekte zur Verfügung. Die Kombination dieses Verfahrens mit dem Spritzprägeprozess eröffnet KMUs und Industriepartnern die Möglichkeit, vergleichsweise komplexe mikrostrukturierte Bauteile herzustellen, auch wenn die Technologie zur Herstellung des Prototypens nicht vorhanden ist. Dadurch wird KMUs die Möglichkeit gegeben, das Produktportfolio nachhaltig zu erweitern und in zukunftssträchtigen Themen frühzeitig Fuß zu fassen. Hierzu konnten erste Materialien und Forschungsbereiche vorgegeben werden, aber auch schon praktische Beispiele gezeigt und ausgewertet werden. Neben der optischen Technologie lässt sich das Themenfeld auch auf weitere Zukunftsthemen wie Mikrofluidik, gezielte Oberflächenfunktionalisierung und Sensorik anwenden. Die erforschten Prozesse können auch in kleinem Maßstab gut in bestehende Entwicklungsprozesse von KMUs eingegliedert werden.

Neben dem technischen Mehrwert der Integration von Mikrostrukturen auf makroskopischen Bauteilen, besteht zudem ein wirtschaftlicher Vorteil darin. Für einzelne, lithographisch gefertigte konventionelle gekrümmte DOEs schlagen Kosten von bis zu 10.000 € zu Buche. In Thermoplast-Spritzprägeverfahren hergestellte DOEs weisen zwar hohe Initialkosten auf, können aber in wesentlich größeren Mengen günstig hergestellt werden. Die Initialkosten des Werkzeugbaus umfassen hierbei auch die Füllsimulation und die Herstellung eines galvanokopierten Nickeleinsatzes und dessen Integration in das Spritzgusswerkzeug. Überschlagen wurden die Werkzeugkosten mit 70.000 €. Bei einem Stückpreis von 10.000 € skaliert der Preis einzelner DOEs nur sehr schlecht. Die Herstellung von 100 oder 1000 DOEs im Spritzguss, macht jedoch kaum einen Preisunterschied aus. Die Aufstellung zeigt, dass bereits ab einer Menge von 10 DOEs die Herstellung mittels neuer Prozesskette günstiger wird. Die Strukturierung gekrümmter Masterstrukturen konnte in diesem Projekt auch um die Kapselung dieser Strukturen und somit um deren Schutz erweitert werden. Dies hat zur Folge, dass die geschaffenen Strukturen wesentlich besser integriert werden und in technischen Anwendungen untergebracht werden können.

Neben den Ergebnissen der gesamten Prozesskette konnte auch für die einzelnen Prozessschritte interessante Ergebnisse erzielt werden. Dazu gehören die Herstellung von gekrümmten, laserstrukturierten Messingstrukturen als Ersatz für strukturierte Glaslinsen. Mit der Kombination der UPM-Technik und des Laserdirektstrukturierens wurden ein vielversprechendes und hochpräzises Verfahren zur Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen erarbeitet. Zudem wurde gezeigt, dass mittels PVD-Prozess und anschließender galvanischer Nickelabformung die Strukturen in ein Spritzgusswerkzeug übertragen werden können. Dabei wurde auch das Handling der Strukturen erarbeitet, jedoch muss der Prozess für industrielle optische Anwendungen gegebenenfalls in einen Reinraumprozess übertragen werden. Alternativ können in zukünftigen Projekten Transport- und Kapselungsmöglichkeiten für den laufenden Prozess erarbeitet werden. Für das Handling der Bauteile nach der Prozesskette wurde eine Kapselungs- und Zentrierlösung erarbeitet, welche die Bauteile schützen und weitere Funktionen integrieren kann (z.B. durch eine weitere Linse). Dies bedeutet allerdings auch, dass Reinigungsprozesse nur vor dem Kapseln stattfinden können und Verschmutzungen, die mit verkapselt werden, auch nicht mehr bereinigt werden können. Werden diese kritischen Parameter im Herstellungsprozess mit einbezogen bietet die Prozesskette eine sinnvolle und auf Dauer kostengünstigere Möglichkeit zur Herstellung gekapselter mikrostrukturierter DOEs und ähnlicher Anwendungen und kann damit die Performance von KMUs in diesem Bereich nachhaltig steigern.

Die enge Kooperation mit dem Projektbegleitenden Ausschuss und den beiden Forschungsstellen HS-S und ITO hat zum einen regen Austausch über das Thema vorangetrieben und zum anderen aber auch direkt die relevanten Forschungserkenntnisse an die Industriepartner weitergegeben.

6. Veröffentlichung der Projektergebnisse

Bisher wurden die Projektergebnisse auf Grund von Verzögerungen im Projekt selbst, sowie Verschiebungen verschiedener Konferenzen, wie z.B. der Polymerreplication on Nanoscale noch nicht veröffentlicht. Nichtsdestotrotz sind Veröffentlichungen geplant.

Dazu gehört die Einreichung auf folgenden Konferenzen:

- EUSPEN- 22nd International Conference & Exhibition (30.05.-03.06.22), Geneva, Switzerland
- Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik, 7.6.-11.6.22, Pforzheim.

6.1. Weitere Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die im Fördervorhaben erzielten Ergebnisse wurden und werden durch die folgenden Maßnahmen in die Wirtschaft transferiert:

- Wissensaustausch über interessierte Industrievertreter im projektbegleitenden Ausschuss
- Bericht zum Fortgang des Projekts und dessen Ergebnisse auf der jährlichen Mitgliederversammlung von HS-S
- Veröffentlichung der Projektergebnisse im HS-S und ITO-Jahresbericht
- Teilnahme an Fachmessen und Konferenzen
- Als Grundlage für weitere industrienaher Projekte ausgehend von diesem Projekt
- Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre in den Fächern Mikrosystemtechnik und Technische Optik an der Universität Stuttgart
- Veröffentlichung der Ergebnisse auf den Internetseiten von HS-S und ITO, sowie in gängigen Fachzeitschriften, z.B. Applied optics, Micro and Nano Engineering (MNE)

6.2. Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Die Realisierbarkeit des Transferkonzepts kann als sehr positiv bewertet werden. Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses waren mit den Arbeiten und Ergebnissen zufrieden und ein Großteil der PA-Mitglieder würden gerne in einem Folgeprojekt die Arbeiten fortführen. Gerade in Bezug auf Ausrichtung, Kapselung und Langzeitbeständigkeit wurde der Wunsch nach tiefergehenden Untersuchungen geäußert. Ein Folgeprojekt ist hierbei als sinnvoll zu betrachten und wird von HS-S und ITO in naher Zukunft angedacht. Die Präsentation der Projektergebnisse bei Industrie und Forschungspartnern führte dazu, dass weitere Projekte in den Themenfeldern akquiriert und durchgeführt wurden.

7. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20182 N der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. (HS) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dem projektbegleitenden Ausschuss sei für die Unterstützung, die Charakterisierung der Demonstratoren und die Hinweise aus den zahlreichen Diskussionen gedankt. Namentlich sind dies:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| - Evonik GmbH | Herr Strohm und Herr Zelder |
| - Leuze electronic GmbH | Herr Dr. Kharrazian |
| - Arburg GmbH + Co. KG | Herr Müller |
| - Temicon GmbH | Herr Dr. Wiebach und Herr Dr. Stöver |
| - Mahr GmbH | Herr Dr. Beutler |
| - Twip Optical Systems | Herr Dr. Fleischle |
| - UPT Optik Wodak | Herr Götzinger |
| - Polyoptics GmbH | Herr Vogelsang |
| - Schölly Fiberoptics GmbH | Herr Dr. Bourbon |
| - TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH | Herr Dr. Schaal |
| - Rodenstock GmbH | Herr Dr. Trumm |
| - KDG Opticomp GmbH | Herr Alexander Wörle |
| - ZKW Group | Herr Gürtl |