

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Informationen	2
2	Ausgangssituation	3
3	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	3
3.1	Überblick Prozesskette.....	3
3.2	Galvanische Nickel-Phosphor-Beschichtung.....	3
3.2.1	Optimierung des Prozessbeckens der Galvanikanlage.....	3
3.2.2	Integration einer Dreheinheit.....	3
3.2.3	Anwendung für die Beschichtung von Formeinsätzen	3
3.3	Replikation durch Spritzprägen	3
3.3.1	Prozessbeschreibung.....	3
3.3.2	Stammwerkzeug	3
3.4	Replikation durch Mehrschichtspritzgießen.....	3
3.4.1	Prozessbeschreibung.....	3
3.4.2	Versuchswerkzeug.....	3
3.4.3	Prozessuntersuchungen	3
3.5	Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze.....	3
3.6	Messdatenrückführung.....	3
3.7	Aufbau Produktdemonstratoren	3
3.7.1	PKW-Abblendlicht	3
3.7.2	Trucklight.....	3
3.7.3	Wallwasher.....	3
4	Verwertungsplan	3
4.1	Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen.....	3
4.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	3
4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	3
5	Fortschritt bei anderen Stellen, Relevanz des Themas	3
6	Veröffentlichung der Ergebnisse	3

1 Allgemeine Informationen

Ziel des Projekts war die Etablierung einer durchgehenden Prozesskette zur kosteneffizienten Herstellung hochpräziser innovativer Freiformflächenoptiken aus Kunststoff für den Massenmarkt. Damit soll das volle Potenzial von LEDs als Kaltlichtstrahler der Zukunft ausgeschöpft werden. Nur durch die ganzheitliche Betrachtung der gesamten Prozesskette lassen sich die damit verbundenen komplexen technischen Fragestellungen lösen, so dass eine breite Nutzung innovativer Freiformflächenoptiken in Anwendungsbereichen wie der Architektur und dem Automobil möglich ist.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Bestandteile der Prozesskette zur Herstellung von Kunststoffoptiken wie Optik-Design, Formenbau, Replikation und Messtechnik untersucht. Schwerpunkte lagen dabei insbesondere auf der Weiterentwicklung der Optik-Design-Möglichkeiten für Freiformflächen sowie der Replikation hochpräziser Freiformflächenoptiken. Zu diesem Zweck wurde ein komplexes Spritzprägewerkzeug aufgebaut und Algorithmen zur Genauigkeitssteigerung der replizierten Kunststoffoptiken durch iterative Schwindungskompensation entwickelt. Die erzielten Projektergebnisse werden durch die im Rahmen des Projekts aufgebauten Produktdemonstratoren veranschaulicht.

Das Projekt hatte eine offizielle Laufzeit von April 2008 bis März 2011.

2 Ausgangssituation

Der Bedarf an Kunststoffoptiken wächst seit einigen Jahren stetig. Dies hängt insbesondere mit dem zunehmenden Einsatz von LEDs für Beleuchtungsanwendungen zusammen. Kunststoffoptiken mit einfachen Geometrien und ohne hohe Anforderungen an die Formhaltigkeit konnten in der Vergangenheit oftmals durch die Verwendung von polierten Werkzeugformeinsätzen aus Stahl und die Replikation durch einen konventionellen Spritzgießprozess hergestellt werden. Innovative Anforderungen machen jedoch in zunehmendem Maße den Einsatz hochpräziser Kunststoffoptiken mit komplexen Freiformgeometrien erforderlich. Ansätze zur Fertigung der benötigten Formeinsätze durch Diamantzerspanung sowie die Replikation von Kunststoffoptiken existieren zwar grundsätzlich, sind aber vielfach noch nicht in ausreichendem Maße in die gesamte Prozesskette eingebunden. Daher konnte bislang oftmals nicht das gesamte Potenzial bei der Anwendung von Sonderspritzgießverfahren ausgenutzt werden. Eine Kompensation der beim Spritzgießprozess prinzipbedingt unvermeidbaren Schwindung durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze war bislang in der Regel nicht zielführend möglich, da keine Möglichkeiten zur präzisen Ausrichtung und zum Vergleich von Soll- und Ist-Daten der Geometrien existierten.

Neben der Optimierung einzelner Teilkomponenten der Prozesskette galt es somit im Rahmen des Projekts insbesondere Optimierungspotenzial bei den Schnittstellen der Teilprozesse zu erschließen. Dadurch sollte beispielsweise die Möglichkeit einer optimierten Integration des Nickel-Phosphor-Beschichtungsprozesses in den Fertigungsprozess für die Formeinsätze geschaffen werden und eine Messdatenrückführung für eine iterative Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze realisiert werden.

3 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

3.1 Überblick Prozesskette

Zu Beginn des Projekts »InnoLight« wurden von den Projektpartnern drei Produktdemonstratoren definiert, die während der Projektlaufzeit als Beispielanwendungen für die betrachteten Kunststoffoptiken dienen sollten. Dabei handelt es sich um optische Systeme für ein PKW-Abblendlicht, für die Beleuchtung einer LKW-Ladezone (»Trucklight«) sowie für die homogene Ausleuchtung einer Wand (»Wallwasher«). Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen wurden unter anderem durch die Notwendigkeit für die Produktdemonstratoren getrieben bzw. für die Produktdemonstratoren angewendet.

Am Anfang der Prozesskette zur Replikation von Kunststoffoptiken steht das Optik-Design (s. Abbildung 1). In der Optik-Design-Phase wird basierend auf den Anforderungen für die jeweilige Anwendung ein optisches System ausgelegt. Im Rahmen des Projekts InnoLight wurden die optischen Komponenten für die zu Projektbeginn definierten Produktdemonstratoren durch den Projektpartner TOS ausgelegt (s. Abschlussbericht des Lehrstuhls TOS der RWTH Aachen). Dabei wurden in enger Abstimmung mit dem Fraunhofer IPT Iterationsschleifen durchlaufen um sicherzustellen, dass das entwickelte Optik-Design auch fertigungstechnisch umsetzbar ist.

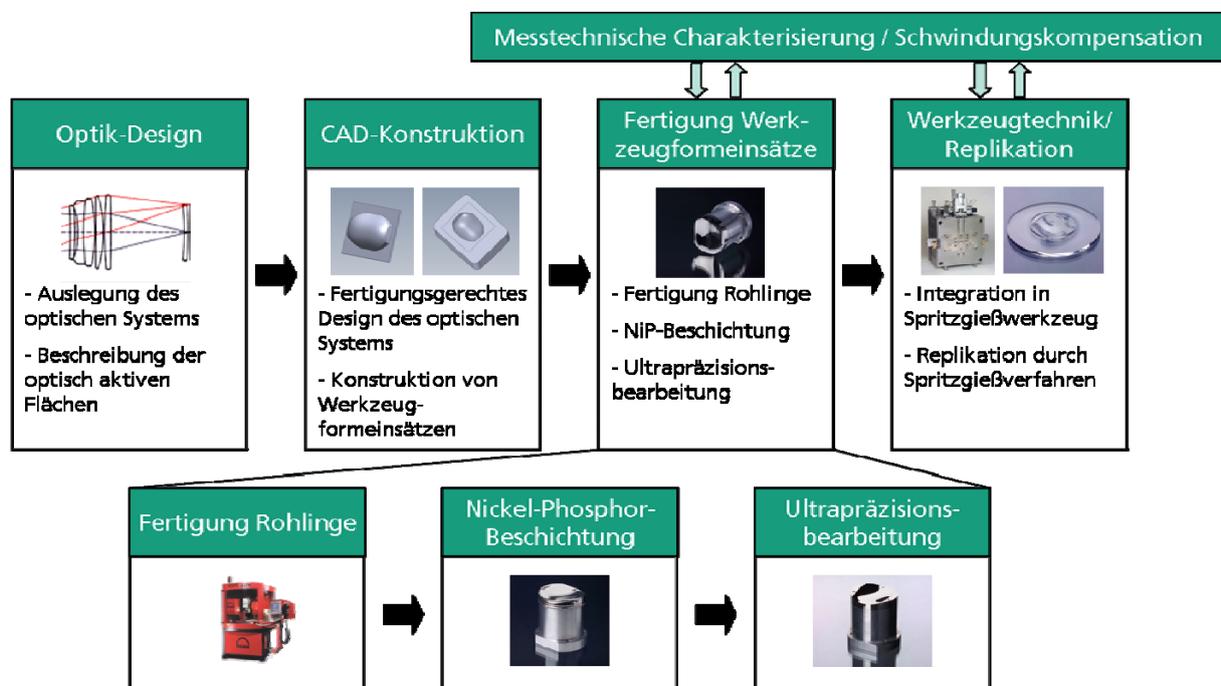


Abbildung 1: Prozesskette zur Replikation von Kunststoffoptiken

Das Resultat des Optik-Designprozesses des TOS ist eine Beschreibung der optisch aktiven Flächen einer Kunststoffoptik. Diese Flächenbeschreibung wurde im Projekt »InnoLight« in ein 3D-CAD-Volumenmodell überführt, das für die weitere Verarbeitung im Fertigungsprozess der Formeinsätze für den Spritzgießprozess geeignet ist. Von besonderer Bedeutung bei diesem Prozessschritt ist neben der Integration geeigneter Justageelemente auch die Berücksichtigung prozessspezifischer Randbedingungen für die Gestaltung des Bauteils. So ist für den Spritzgießprozess beispielsweise die Berücksichtigung von Entformungsschrägen an dem Bauteil notwendig. Durch eine Simulation der optischen Funktion des Bauteils am TOS im Anschluss an die fertigungsgerechte Optimierung der Bauteilgeometrie kann sichergestellt werden, dass durch die Modifikation der Geometrie der Kunststoffoptik keine unzulässige Beeinträchtigung der Funktion stattfindet.

Basierend auf dem CAD-Modell für das gewünschte Formteil erfolgt die Ableitung der Werkzeugformeinsätze, die zur Replikation des Formteils mit dem Kunststoffspritzgießprozess eingesetzt werden. Die Fertigung der entsprechenden Formeinsätze erfolgt anschließend in mehreren Schritten. Zunächst werden Formeinsatzrohlinge gefertigt und auf einer Präzisionsfräsmaschine vorbearbeitet. Anschließend erfolgt eine Beschichtung der Formeinsätze mit einer diamantzerspanbaren Nickel-Phosphor-Schicht, bevor die Endbearbeitung auf Ultrapräzisionsmaschinen erfolgt. Im Projekt »InnoLight« war die Optimierung der galvanischen Nickel-Phosphor-Beschichtung für verschiedene Materialien und Geometrien ein wichtiges Arbeitspaket, das gemeinsam vom Fraunhofer IPT und dem Projektpartner Temicon bearbeitet wurde.

Die auf diese Weise hergestellten Formeinsätze werden anschließend für die Replikation der Kunststoffformteile in ein Stammwerkzeug eingebaut. Dabei sind die Werkzeuge je nach Aufbau für verschiedene Prozesse einsetzbar. Im einfachsten Fall ist mit den Werkzeugen die Replikation von Kunststoffformteilen durch einen konventionellen Spritzgießprozess möglich. Im Rahmen des Projekts »InnoLight« wurde jedoch insbesondere auch Werkzeugtechnik untersucht und durch das Fraunhofer IPT Stammwerkzeuge aufgebaut, mit denen die Anwendung und Optimierung von Spritzgießsonderverfahren wie Spritzprägen oder Mehrschichtspritzgießen möglich ist.

Die verschiedenen Varianten des Spritzgießprozesses unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der jeweiligen Möglichkeiten zur Optimierung der Formhaltigkeit der Formteile. Während beim konventionellen Spritzgießprozess ein Schwindungsausgleich lediglich durch das Aufbringen von Nachdruck über den Anguss des Formteils möglich ist, bietet das Spritzprägeverfahren die Möglichkeit vollflächig bzw. gezielt auf bestimmten Teilflächen Druck aufzubringen, um Formteile mit bestmöglicher Formhaltigkeit herzustellen. Als Alternative bietet das Mehrschichtspritzgießverfahren die Möglichkeit, durch das Aufteilen des Spritzgießprozesses in mehrere Prozessschritte einen verbesserten Schwindungsausgleich zu erreichen. Das Fraunhofer IPT hat im Projekt »InnoLight« mit den verschiedenen Spritzgießverfahren und jeweils zielgerichtet aufgebauten Stammwerkzeugen die Möglichkeiten der jeweiligen Ver-

fahren anhand von Beispielformteilen bzw. den Kunststoffoptiken für die Produktdemonstratoren untersucht.

Unabhängig von der Wahl des Spritzgießverfahrens lässt sich die Schwindung beim Spritzgießen grundsätzlich nicht vollständig durch die Prozessführung ausgleichen. Aus diesem Grund ist je nach Anforderungen an die Formhaltigkeit der Kunststoffoptiken ein Schwindungsausgleich durch eine iterative Modifikation der Geometrie der Werkzeugformeinsätze erforderlich. Um eine solche gezielte Modifikation der Formeinsatzgeometrie erfolgreich durchführen zu können, ist neben einem stabilen Spritzgießprozess insbesondere auch eine zuverlässige und hochgenaue Möglichkeit zur messtechnischen Charakterisierung der Formteile sowie zur Rückführung und Verarbeitung der Ist-Daten in Bezug auf die Soll-Daten notwendig.

In den folgenden Abschnitten werden die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten zu den jeweiligen Aspekten und Arbeitspaketen im Projekt »InnoLight« erläutert.

3.2 Galvanische Nickel-Phosphor-Beschichtung

3.2.1 Optimierung des Prozessbeckens der Galvanikanlage

Das Fraunhofer IPT verfügt über eine Galvanikanlage für die Abscheidung diamantzerspanbarer Nickel-Phosphor-Schichten (s. Abbildung 2, links). Diese Anlage stellte die Basis für die Untersuchungen und Optimierungen im Rahmen des Projekts »InnoLight« dar, die in Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer IPT und Temicon durchgeführt wurden.

Mit der galvanischen Nickel-Phosphor-Beschichtung lassen sich grundsätzlich wesentlich dickere Schichten in einem stabilen Prozess abscheiden, als bei der chemischen Nickel-Phosphor-Beschichtung. Dies kann insbesondere bei Bauteilen mit stark ausgeprägten Freiformflächen und Bauteilen mit Mikrostrukturen von entscheidendem Vorteil sein. Ein prinzipieller Nachteil des galvanischen Beschichtungsprozesses ist jedoch, dass die abgeschiedene Schicht in der Regel keine gleichmäßige Dicke aufweist, sondern sich in exponierten Bereichen des Bauteils und an Kanten eine höhere Abscheiderate einstellt. Dies erhöht zum einen die Nacharbeit an den beschichteten Bauteilen und führt darüber hinaus dazu, dass die effektive Abscheiderate sinkt.

Eine Möglichkeit, die sogenannte Kantenüberhöhung in den Randbereichen des Bauteils auszugleichen, besteht darin, geeignete Blenden vorzusehen, die zu einer Ablenkung der elektromagnetischen Feldlinien führen. In Abbildung 2 (rechts) ist der Einsatz einer entsprechenden Lochblende für ein rundes Bauteil schematisch dargestellt. Es wurden diesbezüglich Untersuchungen durchgeführt, inwieweit sich durch den Einsatz von entsprechenden Lochblenden eine Optimierung der Schichtdickenverteilung erreichen lässt. Es hat sich dabei herausgestellt, dass sich durch den Einsatz einer geeigneten Blende das Verhältnis von der Schichtdicke am Rand zu der

minimalen Schichtdicke auf der zu beschichtenden Fläche des Probebauteils von 6,6 auf 3,1 verbessern lässt.

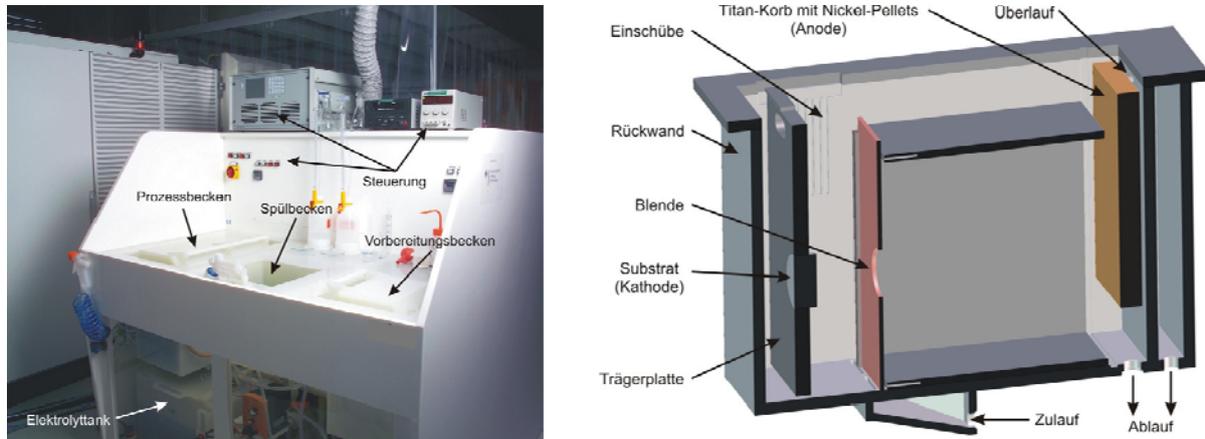


Abbildung 2: Anlage zur galvanischen Nickel-Phosphor-Beschichtung

3.2.2 Integration einer Dreheinheit

Im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen zur Beschichtung von Bauteilen aus verschiedenen Materialien und mit verschiedenen Geometrien hat sich herausgestellt, dass eine feste Aufspannung des zu beschichtenden Bauteils in der Galvanikanlage zu einer unterschiedlichen lokalen Schichtdicke in Abhängigkeit von der jeweiligen relativen Lage zum Zulauf des Prozessbeckens führt. Demzufolge wäre eine Homogenisierung der Anströmungsbedingungen des Bauteils wünschenswert. Neben den Einflüssen auf die Schichtdickenverteilung hat sich auch gezeigt, dass die jeweiligen Strömungsbedingungen einen Einfluss auf die Gefahr der Entstehung von Defekten in der Beschichtung haben. Dabei wurde festgestellt, dass sich eine stärkere Bewegung des Elektrolyts im Bereich des Substrats positiv auf die Qualität der Schicht auswirkt.

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Projekts eine Dreheinheit entwickelt, mit der das Substrat während des gesamten Beschichtungsprozesses in Rotation gehalten wird. Eine entscheidende Randbedingung für die Konstruktion der Dreheinheit war dabei die Beständigkeit des Systems gegenüber den Bestandteilen des säurehaltigen Elektrolyts.

Der Einsatz der Dreheinheit hat sich äußerst positiv auf den Beschichtungsprozess ausgewirkt. Zum einen konnte eine rotationssymmetrische Beschichtung erreicht werden und zum anderen ließ sich die Zuverlässigkeit des Beschichtungsprozesses signifikant verbessern.

3.2.3 Anwendung für die Beschichtung von Formeinsätzen

Die Prozesse für die galvanische Nickel-Phosphor-Beschichtung wurden im Rahmen des Projekts »InnoLight« anhand einer Vielzahl von Bauteilen untersucht und optimiert, die verschiedene Geometrien aufwiesen und aus unterschiedlichen Materialien gefertigt wurden.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Formeinsatz für das im Projekt aufgebaute Spritzprägestammwerkzeug nach der Nickel-Phosphor-Beschichtung beziehungsweise nach der Diamantdrehbearbeitung.



Abbildung 3: Galvanische Nickel-Phosphor-Beschichtung eines Formeinsatzes

3.3 Replikation durch Spritzprägen

3.3.1 Prozessbeschreibung

Ein wesentliches Arbeitspaket im Projekt »InnoLight« waren die Weiterentwicklungen hinsichtlich der Möglichkeiten zur hochpräzisen Replikation komplexer Kunststoffoptiken. Dies beinhaltet sowohl die notwendige Werkzeugtechnik als auch die eingesetzten Prozesse.

Bereits vor Projektbeginn war das Spritzprägeverfahren als vielversprechende Möglichkeit zur hochpräzisen Replikation von Kunststoffoptiken identifiziert worden. Um die Möglichkeiten dieses Verfahrens untersuchen und weiterentwickeln zu können, wurde im Projekt »InnoLight« ein Stammwerkzeug speziell für die Replikation von Kunststoffoptiken durch Spritzprägen entwickelt und aufgebaut.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Varianten des Spritzprägeprozesses bzw. unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung eines Spritzprägeprozesses. Abbildung 4 zeigt den Ablauf des Spritzprägeprozesses, der für das Spritzprägewerkzeug im Projekt »InnoLight« ausgewählt wurde. Das Werkzeugkonzept beinhaltet zwei Kavitäten mit jeweils einem entsprechendem Prägestempel. Vor Beginn des Einspritzprozesses wird durch das Zurückziehen der Prägestempel ein definierter Prägespalt eingestellt um den die Kavitäten bei geschlossenem Werkzeug gegenüber der Geometrie des finalen Formteils vergrößert sind. Der Prägevorgang soll wahlweise während oder nach dem Einspritzvorgang gestartet werden können, wobei durch den optionalen Einsatz von Schiebern ein Verschließen der Kavität ermöglicht und dadurch ein Zurückfließen der Schmelze verhindert werden können soll.

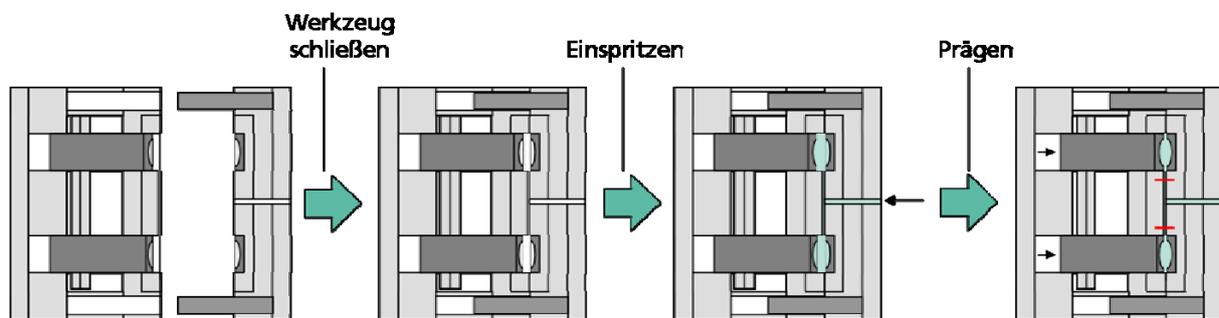


Abbildung 4: Prozessablauf beim Spritzprägen

3.3.2 Stammwerkzeug

Im Projekt »InnoLight« wurde ein 2-Kavitäten-Spritzprägestammwerkzeug für die hochpräzise Replikation von Kunststoffoptiken aufgebaut. Die wesentlichen Anforderungen an das Stammwerkzeug sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Anforderungen an Spritzprägestammwerkzeug

Grundaufbau	
Anzahl Kavitäten	2
Aufspannfläche	ca. 500 mm x 500 mm
Realisierung Prägefunktion	Einsatz von Prägestempeln
Formteilgeometrie	
Durchmesser	Wahlweise 40 mm oder 70 mm
Formteildicke	Variabel (Auslegung auf 3 mm)

Anguss	
Angussart	Kaltkanal
Anbindung	Wahlweise Film-, Stangen oder Tunnelanguss
Temperierung	
Temperiermedium	Wasser
Temperaturbereich	60 ... 140 °C
Temperierschema	Grundtemperierung der Formplatten und gezielte Temperierung der Kavitäten
	Temperierung der beiden Werkzeughälften über unterschiedliche Kreisläufe
Temperierung der Kavitäten	Möglichkeit zur Verwendung separater Temperierkreisläufe für die Kavitäten
	Möglichkeit zur direkten Integration der Temperierkanäle in die Werkzeugform-einsätze oder alternativ in separate Temperiereinsätze hinter den Form-einsätzen
Prägeprozess	
Prägespalt	Stufenlos zwischen 0 und 4 mm einstellbar
Beginn Prägeprozess	Variabel über Maschinensteuerung einstellbar
Regelung Prägeprozess	Druckgeregelt
Sonstiges	Möglichkeit zum Verschließen des Angusskanals durch Schieber
Sensorik	
Kavitäten	Jeweils 1 Druck-Temperatur-Sensor
Prägeprozess	Jeweils 1 Sensor zur Aufzeichnung der Bewegung der Prägestempel
Messsystem	Möglichkeit zur automatischen Aufzeichnung der Prozesse

Basierend auf der Anforderungsdefinition wurde ein Spritzprägewerkzeug konstruiert und aufgebaut, das sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der herstellbaren Formteile sowie der realisierbaren Prägeprozesse auszeichnet (s. Abbildung 5).

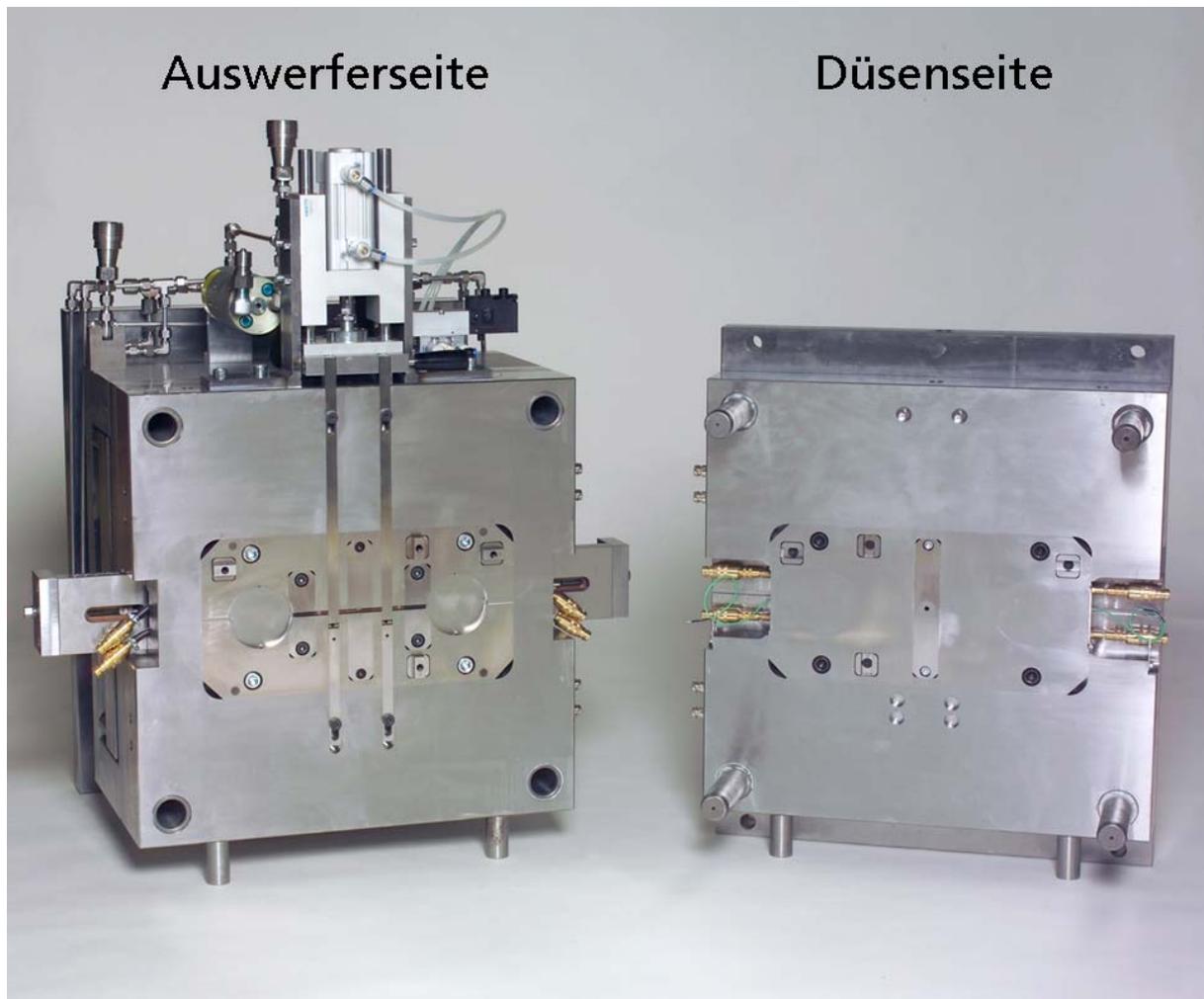


Abbildung 5: Spritzprägestammwerkzeug

Das Spritzprägewerkzeug verfügt über zwei Kavitäten, wobei die entsprechenden Formeinsätze in Formeinsatzhalteplatten integriert sind. Durch den Austausch der Formeinsatzhalteplatten ist es somit auch möglich, Formteile mit unterschiedlichen Außenabmessungen mit dem Werkzeug zu realisieren.

3.4 Replikation durch Mehrschichtspritzgießen

3.4.1 Prozessbeschreibung

Beim Mehrschichtspritzgießprozess wird das Formteil in zwei bzw. mehreren Spritzgießprozessen hergestellt. Das Verfahren ist grundsätzlich für viele Anwendungen als 2-Komponenten-Spritzgießverfahren bekannt und wird insbesondere für die Her-

stellung von Spritzgießteilen aus zwei Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt. Dabei werden die beiden Materialien simultan oder sequenziell in das Werkzeug eingespritzt. Im Falle der Herstellung optischer Komponenten kommt das Verfahren inzwischen auch zum Einsatz, wobei in diesem Fall in der Regel für die einzelnen Spritzgießprozesse das gleiche Material verwendet wird. Es steht bei dieser Anwendung also bislang nicht die Möglichkeit der Kombination von unterschiedlichen Materialien in einem Formteil im Vordergrund. Vielmehr bietet das Mehrschichtspritzgießen prinzipiell die Möglichkeit, durch das Überspritzen eines Vorspritzlings in einem zweiten Prozessschritt die Schwindung des Vorspritzlings auszugleichen und insgesamt ein Formteil mit einer besseren Formhaltigkeit herzustellen.

Das Prinzip der Herstellung eines optischen Kunststoffformteils durch einen Mehrschichtspritzgießprozess ist in Abbildung 6 dargestellt. In diesem Fall wird der Vorspritzling beidseitig mit einer zweiten Schicht überspritzt. Bei der Auslegung der Dicke der verschiedenen Schichten sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Durch das Überspritzen des Vorspritzlings mit einer relativ dünnen Schicht ist im zweiten Prozessschritt nur ein sehr geringes Schwindungspotenzial vorhanden. Darüber hinaus sind jedoch auch die für die einzelnen Prozessschritte notwendigen Zykluszeiten sowie das Fließverhalten des Kunststoffes insbesondere im zweiten Prozessschritt zu beachten.

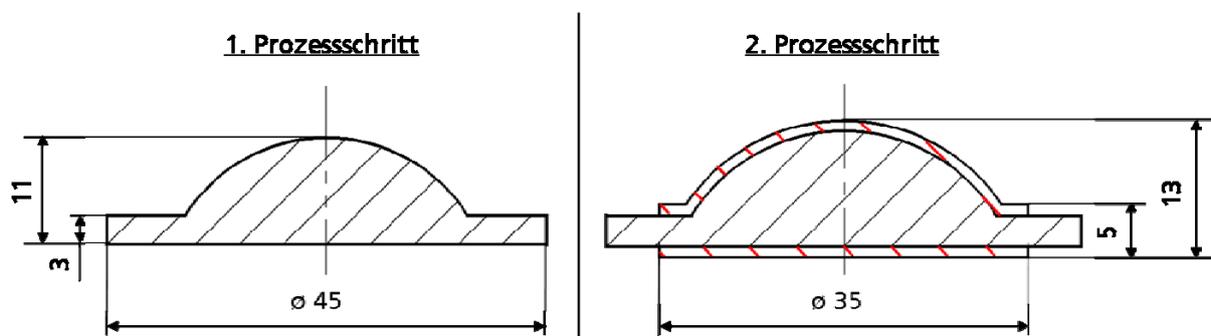


Abbildung 6: Prozessablauf beim Mehrschichtspritzgießen

3.4.2 Versuchswerkzeug

Im Projekt »InnoLight« wurden Versuche zur Herstellung von Kunststoffoptiken im Mehrschichtspritzgießverfahren durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein am Fraunhofer IPT vorhandenes Spritzgießstammwerkzeug für die Integration von Werkzeugformeinsätzen für das Mehrschichtspritzgießverfahren angepasst. Es wurden dazu zwei Kavitäten in das Spritzgießwerkzeug integriert (s. Abbildung 7). Dabei dient die erste Kavität zur Herstellung eines Vorspritzlings, der anschließend in der zweiten Kavität überspritzt werden kann. Durch einen mittig angeordneten Angussverteiler wird die Kunststoffschmelze entweder in Kavität 1 oder in Kavität 2 geleitet. Das Werkzeug wurde so aufgebaut, dass die Dicke der einzelnen Schichten inner-

halb bestimmter Grenzen allein durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze vorgegeben werden kann. Dabei ist es auch möglich, einen in Kavität 1 hergestellten Werkzeugformeinsatz in Kavität 2 nur einseitig zu überspritzen.

Der Vorspritzling wird in beiden Kavitäten durch Auswerferstifte mechanisch entformt. Das Umsetzen des Vorspritzlings von Kavität 1 in Kavität 2 sowie die Entnahme des Fertigteils aus Kavität 2 erfolgt bei dem Versuchswerkzeug manuell, ließe sich aber grundsätzlich mit einem geeigneten Handlingsystem für den Serienbetrieb automatisieren.

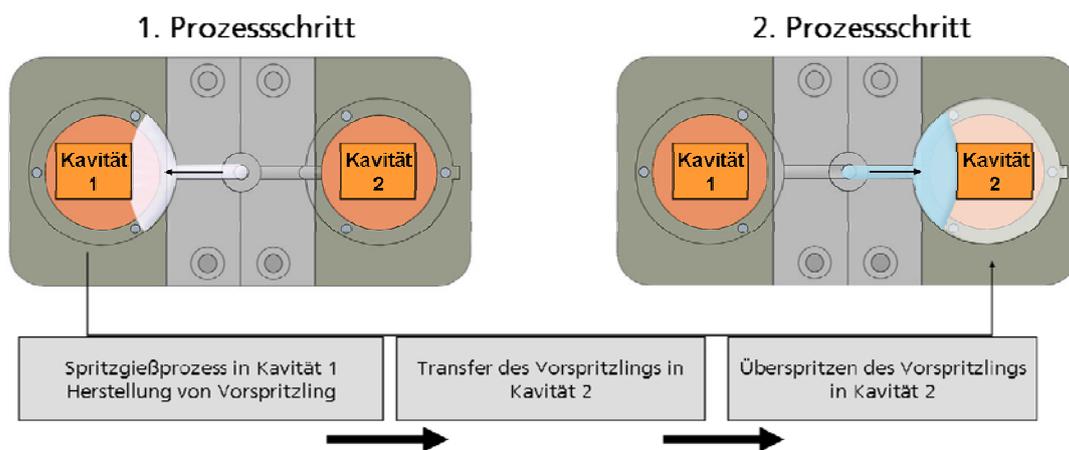


Abbildung 7: Aufbau des Versuchswerkzeugs für den Mehrschichtspritzgießprozess

3.4.3 Prozessuntersuchungen

Es wurden im Projekt »InnoLight« zunächst Versuche mit einfach zu charakterisierenden Versuchsgeometrien durchgeführt. Dabei wurde eine plan-konvexe Linsengeometrie ausgewählt, die anschließend beidseitig überspritzt wurde (s. Abbildung 8 oben). Die Versuche wurden mit einem PMMA der Sorte „Altuglas V920T“ durchgeführt, wobei die Kühlzeit bei den einzelnen Spritzgießprozessen 60 Sekunden betrug. Der Anguss wurde seitlich an das Formteil angebunden, um eine Markierung auf den optisch relevanten Bauteilflächen zu verhindern.

Die Versuche ergaben, dass mit dem verwendeten Spritzgießwerkzeug und der seitlichen Positionierung des Angusses im Bereich der konvexen Fläche mit dem konventionellen Spritzgießprozess ein Formfehler von 50 μm festzustellen ist. Die Planfläche zeigte im konventionellen Spritzgießprozess sogar eine Einfallstelle von 350 μm .

Durch die Anwendung des Mehrschichtspritzgießens ließ sich die Formabweichung an den Bauteilen signifikant reduzieren. So konnte auf der planen Seite ein Formfehler von nur noch 11 μm erreicht werden und die Einfallstelle auf der Planfläche ausgeglichen werden, so dass nur noch 18 μm Formfehler auftraten.

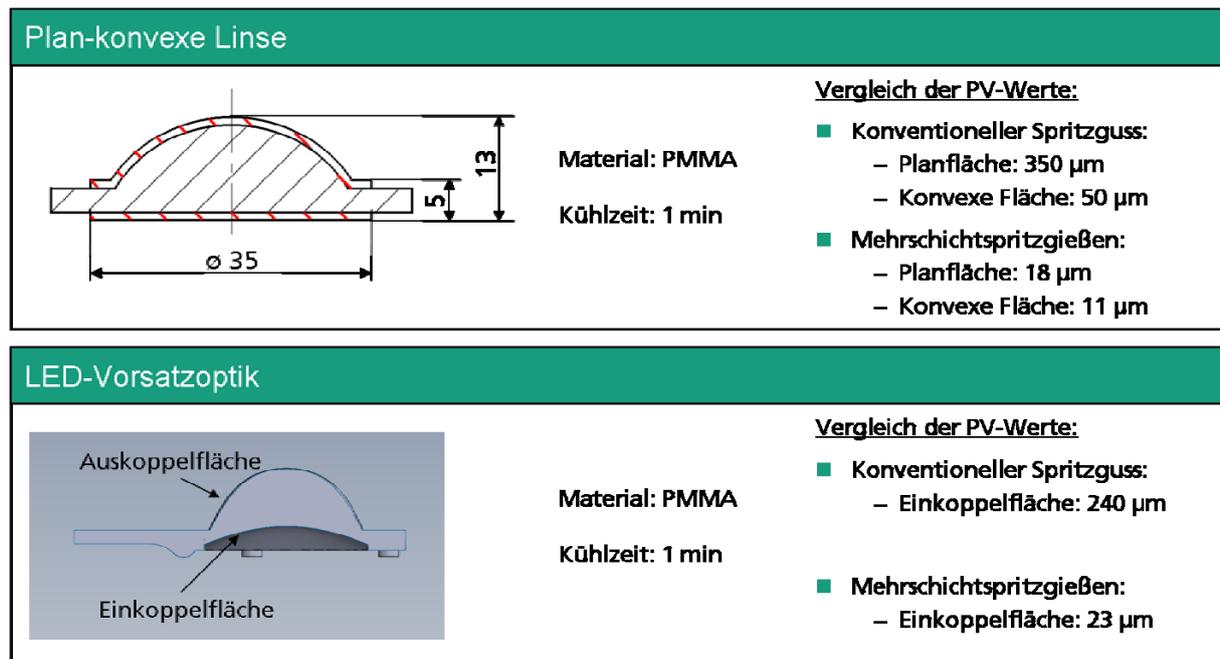


Abbildung 8: Ergebnisse des Mehrschichtspritzgießprozesses

Basierend auf den Erkenntnissen von der Replikation der plan-konvexen Linse wurde das Mehrschichtspritzgießverfahren in einem weiteren Schritt auf die Replikation einer LED-Vorsatzoptik angewendet. Da sich bei Vorversuchen gezeigt hatte, dass sich ein gleichmäßiges Überspritzen der Lichteintrittsfläche sowie der Lichtaustrittsfläche schwer realisieren lässt, wurde in diesem Fall lediglich die Lichteintrittsfläche überspritzt, bei der aufgrund der Geometrie des Formteils mit einem erhöhten Risiko der Entstehung von Einfallstellen zu rechnen ist.

Die Versuche haben gezeigt, dass sich der Formfehler im Bereich der Lichteintrittsfläche durch die Anwendung des Mehrschichtspritzgießverfahrens signifikant reduzieren lässt. Während beim konventionellen Spritzgießprozess ein Formfehler von 240 µm festzustellen war, konnte dieser durch die Anwendung des Mehrschichtspritzgießverfahrens auf 23 µm reduziert werden.

Die Untersuchungen im Rahmen des Projekts »InnoLight« haben gezeigt, dass die Anwendung des Mehrschichtspritzgießverfahrens bei dickwandigen Kunststoffoptiken eine deutliche Verbesserung der Formhaltigkeit ermöglicht. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass sich insbesondere bei komplexen Formteilgeometrien die Auslegung der Spritzgießprozesse schwierig gestalten kann und eventuell mehrere Iterationsschleifen notwendig sein können um die gewünschte Verbesserung der Formhaltigkeit zu erreichen.

3.5 Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze

Die Anwendung von Spritzgießsondervverfahren wie Spritzprägen oder Mehrschichtspritzgießen bietet die Möglichkeit zum Ausgleich der beim Spritzgießprozess zwangsläufig auftretenden Schwindung. Auch wenn sich dadurch die Formhaltigkeit der Spritzgussteile oftmals signifikant verbessern lässt, sind je nach Geometrie und Anwendungsfall relevante Formabweichungen nicht vermeidbar.

Die Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze stellt eine weitere Möglichkeit dar um die Formhaltigkeit der Spritzgießteile zu optimieren. Ausgangspunkt für diesen Ansatz ist ein stabiler Prozess zur Herstellung der Formteile bei bekannter, reproduzierbarer Formabweichung. Basierend auf einem Vergleich der Soll-Geometrie der Linsen mit der tatsächlich gemessenen Geometrie wird dann eine modifizierte Geometrie für die Werkzeugformeinsätze abgeleitet. Durch die Modifikation der Werkzeugformeinsätze soll die im Spritzgießprozess auftretende Schwindung ausgeglichen werden. Abbildung 9 verdeutlicht den Ansatz zur Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze.

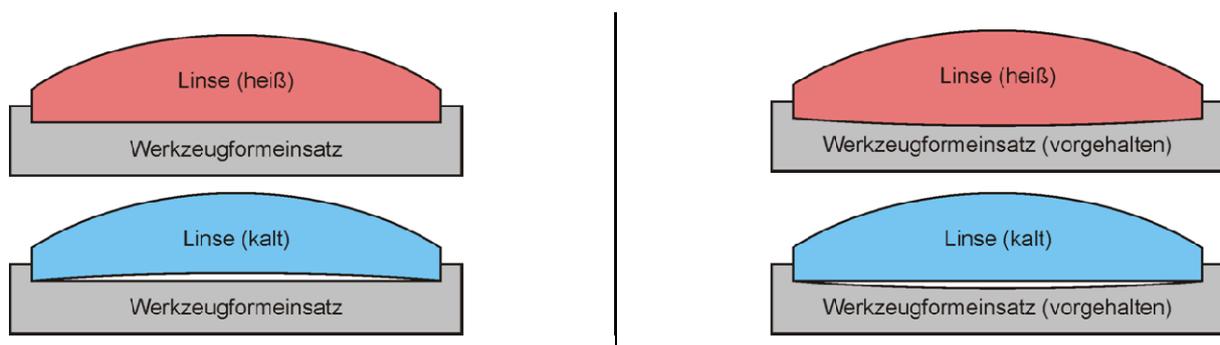


Abbildung 9: Replikation einer plan-konvexen Linse ohne (links) und mit (rechts) Modifikation des Werkzeugformeinsatzes auf der planen Seite

Die Möglichkeit zur Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze wurde im Projekt »InnoLight« anhand verschiedener Beispielgeometrien untersucht. In Abbildung 10 ist beispielsweise eine Linse zur Erzeugung einer »TopHat«-Intensitätsverteilung dargestellt.

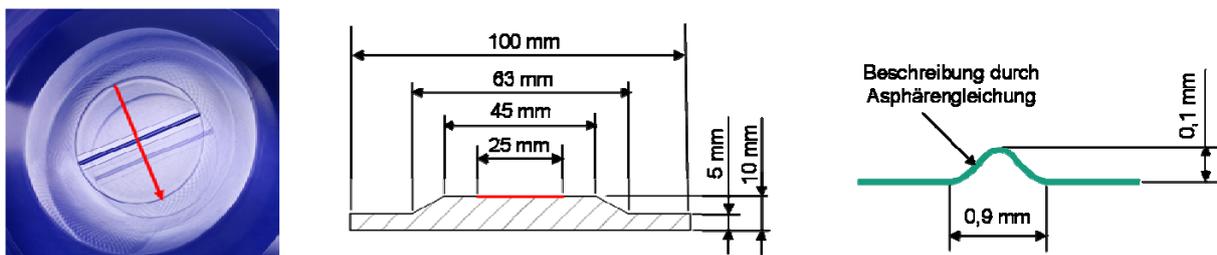


Abbildung 10: Linse zur Erzeugung einer »TopHat«-Intensitätsverteilung

Das Bauteil verfügt in der Mitte über eine Dicke von 10 mm. Der relativ einfach gestalteten Grundgeometrie ist im mittleren Bereich ein 0,1 mm hoher und 0,9 mm breiter Steg überlagert, der möglichst präzise abgebildet werden soll. Aufgrund der großen Dicke des Bauteils bildet sich im Spritzgieß- bzw. auch im Spritzprägeprozess in der Mitte des Formteils eine Einfallstelle aus. Dies führt zu einer Formabweichung über der Länge des Stegs von ca. 10 µm (s. Abbildung 11, links). Durch eine Rückführung der Messdaten von der Ist-Geometrie der replizierten Kunststoffoptiken und eine darauf basierend durchgeführte Modifikation der Geometrie der Werkzeugformeinsätze konnte eine signifikante Optimierung der Formhaltigkeit des Stegs erreicht werden. Die Kontur des Stegs weist nach der Modifikation der Formeinsätze bei Verwendung des identischen Spritzprägeprozesses eine Formabweichung von nur noch etwa 2 µm auf (s. Abbildung 11, rechts)

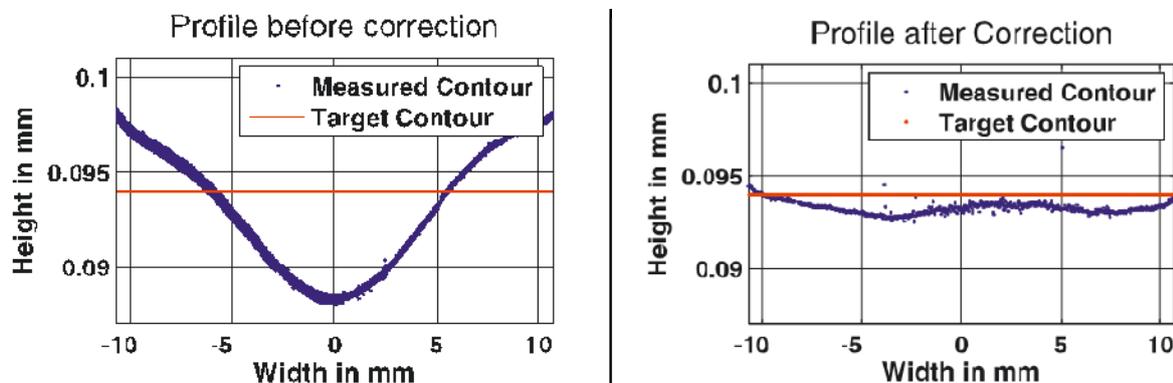


Abbildung 11: Ergebnisse bei der Replikation des Formteils vor (links) und nach (rechts) der Modifikation der Werkzeugformeinsätze

3.6 Messdatenrückführung

Um eine Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze für Kunststoffoptiken mit Freiformflächen durchführen zu können, ist eine zuverlässige messtechnische Charakterisierung der Kunststoffoptiken sowie eine geeignete Rückführung der Messdaten in den Fertigungsprozess für die Werkzeugformeinsätze notwendig.

Im Projekt »InnoLight« wurden Ansätze weiterentwickelt, um einen Soll-Ist-Vergleich für Freiformgeometrien durchführen und die entsprechenden Abweichungen in den Fertigungsprozess zurückführen zu können.

Eine erste entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Messdatenrückführung ist eine präzise Ausrichtung der Ist-Daten zu den Soll-Daten. Da es oftmals nicht notwendig ist, messbare externe Referenzmarken an den Formteilen vorzusehen, wurde in den Arbeiten des Projekts »InnoLight« die Möglichkeit zur Ausrichtung der Messdaten an den Soll-Daten anhand interner Merkmale der Fläche angestrebt. Normalerweise weist eine Freiformfläche ausreichend viele distinkte Merkmale auf,

um alle sechs Freiheitsgrade der Fläche festzulegen. Da Fehler der Fläche jedoch auch in die Ausrichtung einbezogen werden, ist eine prozessabhängige Gewichtung der Punkte notwendig. Es wurde daher ein Projektionsalgorithmus zur Minimierung des Abstandsquadrats in Normalenrichtung entwickelt, durch den nach manueller Vorausrichtung die weitere Ausrichtung automatisiert erfolgt.

Ein Beispiel für die Abweichungskarte eines Formeinsatzes, bei dem eine Ausrichtung der Messdaten zu den Soll-Daten erfolgreich durchgeführt wurde, zeigt Abbildung 12. In Kombination mit der Kenntnis über den Fertigungsprozess lassen sich die einzelnen Fehler den jeweiligen Ursachen zuordnen.

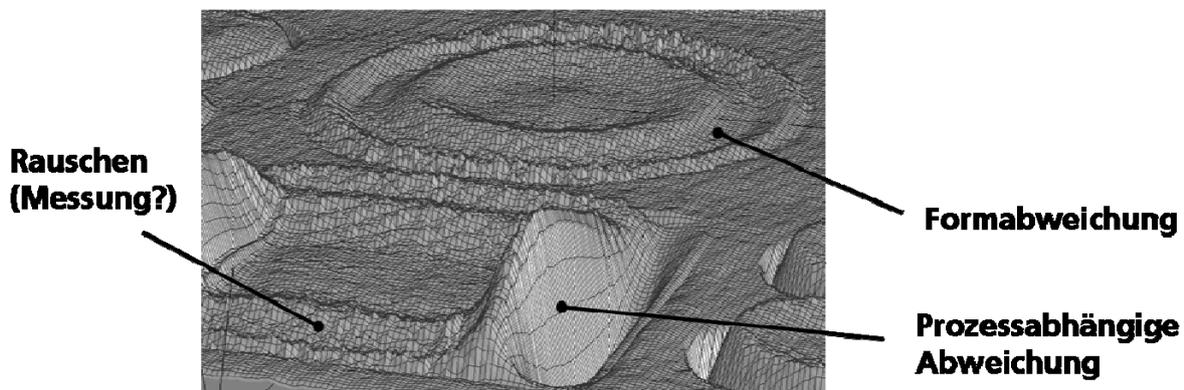


Abbildung 12: Abweichungskarte eines Formeinsatzes

Mit der Umsetzung der Messdatenrückführung konnte ein wichtiger Teil der »InnoLight«-Prozesskette geschlossen werden. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Modifikation der Werkzeugformeinsätze prinzipiell geeignet ist, um Formabweichungen durch Schwindung zu kompensieren. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass sich nicht jedes Formteil aus dem Bereich der Beleuchtungsoptik für diese Art der Schwindungskompensation eignet. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass oftmals keine messtechnischen Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um die komplexen Geometrien der Formteile in ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Eine Umsetzung der Schwindungskompensation durch Modifikation der Formeinsätze für hochkomplexe Geometrien stellt somit eine Herausforderung auch für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar.

3.7 Aufbau Produktdemonstratoren

3.7.1 PKW-Abblendlicht

Zu Beginn des Projekts »InnoLight« wurde das PKW-Abblendlicht als ein Produktdemonstrator festgelegt. Dabei wurde vereinbart, im Rahmen des Projekts verschiedene Möglichkeiten für das Optik-Design eines entsprechenden Demonstrators zu

untersuchen und gegebenenfalls Prototypen für einen entsprechenden Demonstrator aufzubauen.

Durch den Lehrstuhl TOS wurden verschiedene Ansätze für das Optik-Design verfolgt. Dabei wurden zunächst verschiedene Möglichkeiten untersucht, um das von einer bzw. mehreren LEDs abgestrahlte Licht in geeigneter Weise vorzukollimieren. Das Fraunhofer IPT hat zu diesem Zweck verschiedene Prototypen für die Vorkollimation gefertigt, durch die ein Abgleich der Simulationsergebnisse mit den tatsächlich erreichbaren Ergebnissen ermöglicht wurde.

Abbildung 13 zeigt einen aus drei parabolischen Flächen aufgebauten Reflektor für die Kollimation des Lichts von drei LEDs (links) sowie eine rotationssymmetrische, teilverspiegelte Kunststoffoptik zur Kollimation des Lichts einer LED (rechts). Beide Prototypen wurden im Rahmen des Projekts am Fraunhofer IPT aufgebaut.



Abbildung 13: Kollimatoren für PKW-Abblendlicht

Neben den Optiken für die Vorkollimation des von den LEDs abgestrahlten Lichts wurde vom TOS eine Kunststoffoptik ausgelegt, mit der die Erzeugung der Intensitätsverteilung für das PKW-Abblendlicht prinzipiell möglich ist. Voraussetzung ist dabei ein Abstand zwischen LED und Kunststoffoptik von 100 mm, wodurch sich insgesamt eine geringe Effizienz des Gesamtsystems ergibt.

Die entsprechende Kunststoffoptik wurde im Rahmen des Projekts »InnoLight« jedoch verwendet um die einzelnen Entwicklungen des Projekts an einem Demonstrator darzustellen. Es wurden dabei auf Basis der aus dem Optik-Design überführten CAD-Daten Werkzeugformeinsätze gefertigt (s. Abbildung 1), die in das im Projekt entwickelte und aufgebaute Spritzprägestammwerkzeug integriert wurden. Für die Fertigung der Werkzeugformeinsätze wurden Stahl-Rohlinge gefräst, die anschließend mit der im Projekt optimierten Galvanikanlage mit diamantzerspanbarem Nickel-Phosphor beschichtet wurden. Die gewünschte Geometrie mit optischer Oberflächengüte wurde abschließend durch einen Diamantdrehprozess mit einem Fast-Tool-Servo-System erzeugt.



Abbildung 14: Freiformlinse für PKW-Abblendlicht

3.7.2 Trucklight

Als weiterer Produktdemonstrator für die Prozesskette Kunststoffoptik wurde zu Beginn des Projekts ein Modul zur Ausleuchtung des Ladebereichs eines LKW definiert, das im Laufe des Projekts unter der Bezeichnung »Trucklight« entwickelt wurde. Die vom Projektpartner Philips definierten Anforderungen an die mit dem Modul zu erreichende Intensitätsverteilung sahen dabei eine homogene Ausleuchtung des inneren 6 m breiten und 4,25 m langen Bereichs sowie einen Abfall der Lichtintensität gemäß eines Gauß-Profiles zu den Seiten hin vor (s. Abbildung 15, links).

Im Laufe des Projekts wurden vom TOS verschiedene Optik-Designs entwickelt, die vom Fraunhofer IPT als Prototypen aufgebaut wurden. Abschließend wurde gemäß den Vorgaben des Projektpartners Philips ein Modul mit zehn LEDs und dementsprechende zehn Kunststoffoptiken aufgebaut. Eine Schnittdarstellung der finalen Version der Kunststoffoptik sowie ein Foto des Produktdemonstrators sind in Abbildung 15 (mitte und rechts) dargestellt. Für die Replikation der Kunststoffoptiken wurden am Fraunhofer IPT Werkzeugformeinsätze gefertigt und in ein Stammwerkzeug integriert.

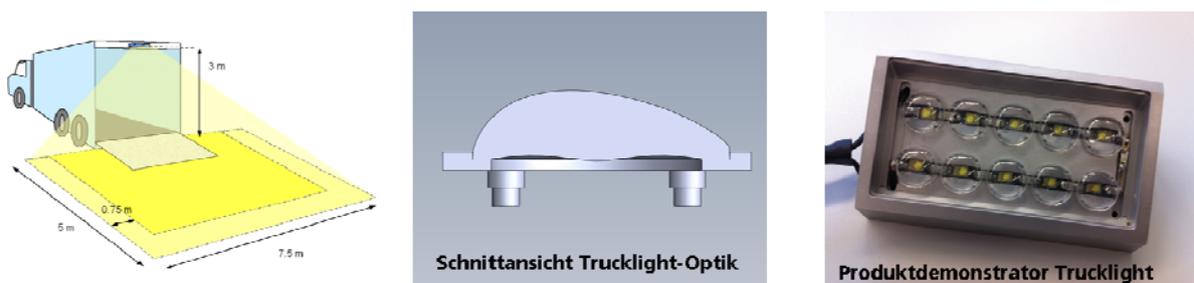


Abbildung 15: Produktdemonstrator Trucklight

3.7.3 Wallwasher

Als dritter Produktdemonstrator wurde von dem Projektpartner Zumtobel ein sogenannter »Wallwasher« definiert. Dabei handelt es sich um eine Leuchte, mit der eine Wand homogen ausgeleuchtet werden soll. Als Randbedingungen wurde festgelegt, dass mit dem Wallwasher die homogene Ausleuchtung einer 4 m breiten und 4 m hohen Fläche bei einer Positionierung der Leuchte in einer Höhe von 2,8 und bei einem Abstand von der Wand von 0,8 m ermöglicht werden soll.

Im Laufe des Projekts wurden vom TOS verschiedene Ansätze zur Entwicklung eines entsprechenden Optik-Designs untersucht. Abbildung 16 (mitte) zeigt eine Schnittansicht der finalen Version des Optik-Designs. Das Fraunhofer IPT hat basierend auf den Flächenbeschreibungen der Optik einen Produktdemonstrator konstruiert und aufgebaut (s. Abbildung 16, rechts). Für die Replikation der Optiken wurden wiederum Werkzeugformeinsätze gefertigt und in ein Stammwerkzeug integriert.

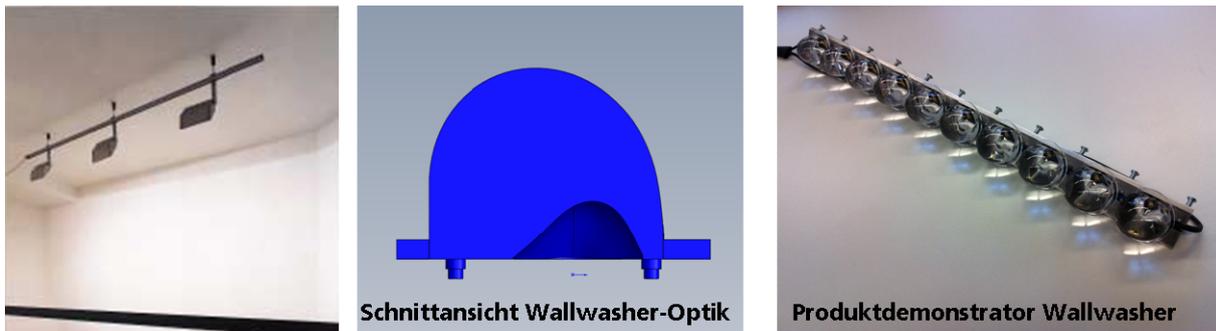


Abbildung 16: Produktdemonstrator Wallwasher

4 Verwertungsplan

4.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Während der Projektlaufzeit wurden keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen getätigt.

4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch den zunehmenden Einsatz von LEDs in Kombination mit Kunststoffoptiken sind die im Projekt »InnoLight« verfolgten Ansätze und Fragestellungen von nachhaltiger Relevanz. Für hochpräzise Anwendungen ist ein erfolgreicher Aufbau der Prozesskette zur Replikation einer Kunststoffoptik nur möglich, wenn die einzelnen Fertigungsschritte ganzheitlich betrachtet und Schnittstellenprobleme ausgeschlossen werden.

Die Projektergebnisse für Teilbereiche der Prozesskette und die Etablierung der Prozesskette insgesamt zeigt, dass die hochpräzise Replikation auch bei komplexen Formteilgeometrien möglich ist. Durch die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können kleinen und mittleren Unternehmen mehr Möglichkeiten zur Erweiterung der eingesetzten Prozesse aufgezeigt werden.

Die im Laufe des Projekts etablierte Anlagen- und Verfahrenstechnik zur Abscheidung galvanischer Nickel-Phosphor-Schichten bietet eine zuverlässige Möglichkeit zur Beschichtung von Stahl-Formeinsätzen mit einer diamantzerspanbaren Nickel-Phosphor-Schicht. Dabei lassen sich auch komplexe Geometrien qualitativ hochwertig beschichten und somit Formeinsätze für komplexe Kunststoffoptiken herstellen.

Mit den entwickelten Möglichkeiten zur Schwindungskompensation durch Modifikation der Werkzeugformeinsätze besteht darüber hinaus die Möglichkeit, auch für Anwendungen, bei denen durch den Einsatz von Spritzgießsonderverfahren wie Spritzprägen und Mehrschichtspritzgießen keine ausreichende Formteilqualität erreicht werden kann, eine Lösung zur hochpräzisen Herstellung der Kunststoffoptiken zu finden.

Die Konkurrenz insbesondere durch asiatische Wettbewerber ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen, so dass eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Produktion von Kunststoffoptiken mit geringen Qualitätsanforderungen am Standort Deutschland kaum noch möglich ist. Insofern bieten die im Projekt »InnoLight« gewonnenen Erkenntnisse und etablierten Fertigungsmöglichkeiten einen Wettbewerbsvorteil für kleine und mittelständische deutsche Unternehmen bei der Fertigung anspruchsvoller optischer Komponenten.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Durch die disziplinübergreifende Zusammenarbeit und den umfangreichen Erfahrungsaustausch im Rahmen der regelmäßigen Projekttreffen konnten alle Projekte ihren jeweiligen Kenntnisstand bezogen auf die Prozesskette zur Replikation von Kunststoffoptiken deutlich erweitern. Dadurch bieten sich individuell verbesserte Möglichkeiten zur Vermarktung eigener Produkte und Dienstleistungen in diesem Bereich. Des Weiteren steht mit dem im Projekt aufgebauten Spritzprägestammwerkzeug eine Plattform zur Verfügung, die den Aufbau von Prototypen für zukünftige Kunststoffoptiken ermöglicht. Insgesamt hat sich durch die Zusammenarbeit in dem Projekt ein Netzwerk etabliert, das den Projektpartnern die Möglichkeit bietet gezielt auf Expertise für die verschiedensten Aspekte der Prozesskette zurückzugreifen.

Aus wissenschaftlicher Sicht konnten durch das Projekt verschiedene Aspekte deutlich weiterentwickelt werden und Kenntnisse und Möglichkeiten gewonnen werden, die über den bislang vorhandenen Stand der Technik hinausgehen. Durch die bessere Verknüpfung der einzelnen Schritte der Prozesskette bietet sich nun die Möglichkeit, die Verfahren auf noch anspruchsvollere Bauteile anzuwenden.

5 Fortschritt bei anderen Stellen, Relevanz des Themas

Durch den zunehmenden Einsatz von LEDs in der Beleuchtungstechnik und die Möglichkeiten, die sich aus der Kombination von LEDs mit Kunststoffoptiken ergeben, ist die Prozesskette zur Herstellung von Kunststoffoptiken für eine stetig wachsende Zahl an Unternehmen von großem Interesse. Dabei sind für deutsche Unternehmen insbesondere die Möglichkeiten zur Herstellung hochpräziser Komponenten wichtig, um international konkurrenzfähig zu sein.

Dementsprechend beschäftigt sich eine zunehmende Anzahl von Unternehmen mit der Prozesskette zur Replikation von Kunststoffoptiken. Während das Spritzprägeverfahren inzwischen von einigen Unternehmen für die Replikation von Kunststoffoptiken eingesetzt wird, handelt es sich insbesondere bei der Herstellung von Kunststoffoptiken durch Mehrschichtspritzgießverfahren um Sonderlösungen, die sich in der Regel nicht ohne weiteres auf andere Anwendungsfälle übertragen lassen.

Neben den werkzeug- bzw. verfahrenstechnischen Ansätzen zur Schwindungskompensation, die im Rahmen des Projekts untersucht und weiterentwickelt wurden, bietet die gezielte Modifikation der Werkzeugformeinsätze eine Möglichkeit zur Schwindungskompensation. Diesbezüglich ist nicht bekannt, dass bei anderen Stellen eine Möglichkeit besteht, vergleichbar mit den im Projekt »InnoLight« entwickelten Möglichkeiten eine Schwindungskompensation für komplexe Geometrien durchzuführen.

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Im Laufe des Projekts »InnoLight« wurden die Ergebnisse des Teilvorhabens T1 im Rahmen von Konferenzen und Messen veröffentlicht.

Es wurden zwei Veröffentlichungen bei der »European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (Euspen)« eingereicht:

Metrology Data Feedback for Shrinkage Compensated Polymer Lenses

C. Brecher, R. Schmitt, C. Buss, P. Kolb, C. Wenzel, D. Köllmann

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Analysis of the Injection Overmoulding Process for Polymer Lenses by use of a Specially Designed Mould

C. Brecher, P. Kolb, C. Wenzel

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Darüber hinaus wurden das im Projekt »InnoLight« aufgebaute Stammwerkzeug zur Replikation sowie Demonstratoren für Formeinsätze mit Nickel-Phosphor-Beschichtung und Prototypen der finalen Produktdemonstratoren auf der Fachmesse »Optatec 2010« präsentiert.