

Zeitschrift Kunststofftechnik Journal of Plastics Technology

archivierte, rezensierte Internetzeitschrift des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK)
archival, reviewed online Journal of the Scientific Alliance of Polymer Technology
www.kunststofftech.com; www.plasticseng.com

eingereicht/handed in: 12.04.2007
angenommen/accepted: 12.10.2007

**Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. W. Michaeli, Dipl.-Ing. S. Heßner, M. Sc. F. Klaiber,
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) Aachen**

Prozesskette zur optimierten Herstellung von optischen Bauteilen aus Kunststoffen im Spritzgieß- und -prägeverfahren

Die Herstellung optischer Bauteile im Spritzgieß- und -prägeverfahren stellt große Herausforderungen an Werkzeug- und Maschinenteknik sowie Prozessführung. Zurzeit werden bei einer dickwandigen plankonvexen Linse Abformgenauigkeiten im unteren zweistelligen Mikrometerbereich realisiert. Zur weiteren Qualitätssteigerung wird in einer Prozesskette die Kontur der Kavität iterativ modifiziert, um die lokale Schwindung vorzuhalten.

Process chain for optimized manufacturing of optical plastics components by injection moulding and injection-compression moulding

The manufacturing of optical components by injection moulding and injection-compression moulding is a big challenge for tool and machine technology as well as for process control. At present a geometrical moulding accuracy in the lower double digit micrometer range has been reached in the production of thick-walled lenses. To further increase the quality, the contour of the cavity is reworked, to compensate the local shrinkage.

Autor/author

Prof. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli,
Dipl.-Ing. Sebastian Heßner,
M. Sc. F. Klaiber
RWTH Aachen
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
Pontstraße 49
52062 Aachen

E-Mail-Adresse: hessner@ikv.rwth-aachen.de
Webseite: www.ikv-aachen.de

Prozesskette zur optimierten Herstellung von optischen Bauteilen aus Kunststoffen im Spritzgieß- und -prägeverfahren

Michaeli, W.; Heßner, S.; Klaiber, F; Forster, J.,
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) Aachen

Die Herstellung optischer Bauteile im Spritzgieß- und -prägeverfahren stellt große Herausforderungen an Werkzeug- und Maschinenteknik sowie Prozessführung. Zurzeit werden bei einer dickwandigen plankonvexen Linse Abformgenauigkeiten im unteren zweistelligen Mikrometerbereich realisiert. Zur weiteren Qualitätssteigerung wird in einer Prozesskette die Kontur der Kavität iterativ modifiziert, um die lokale Schwindung vorzuhalten.

The manufacturing of optical components by injection moulding and injection-compression moulding is a big challenge for tool and machine technology as well as for process control. At present a geometrical moulding accuracy in the lower double digit micrometer range has been reached in the production of thick-walled lenses. To further increase the quality, the contour of the cavity is reworked, to compensate the local shrinkage.

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Optik, Optoelektronik und Lasertechnik, allgemein auch „Optische Technologien“ genannt, werden als Schlüsseltechnologien bezeichnet. Als „Enabling Technologies“ sind sie die Grundlage und Voraussetzung für wichtige Entwicklungen [1]. Zukunftsfelder wie die Informations- und Kommunikationstechnologie, die Medizintechnik und die Biowissenschaften oder auch die industrielle Fertigung werden von Optik und Lasertechnik beeinflusst. Die optischen Technologien führen in allen diesen Feldern zu neuen Produkten und Verfahren und wirken zunehmend auf Industrie und Wissenschaft ein. Deutsche Unternehmen, die sich mit optischen Technologien befassen, haben einen Weltmarktanteil von etwa 23 %. Diese profitieren daher von Wachstumsraten, die derzeit bei etwa 10 Prozent pro Jahr liegen und weiter ansteigen sollen. Die Hauptwachstumsmärkte liegen im Bereich der Kamera- und Projektionstechnik [2].

Im Bereich der optischen Anwendungen wird der Werkstoff Glas in zunehmendem Maße durch den Werkstoff Kunststoff ersetzt. Allgemein ist zwar der Anteil der Produkte mit optischen Funktionen aus Kunststoff heute noch

vergleichsweise klein, allerdings gibt es gerade im Bereich der Hauptwachstumsmärkte erhebliches Substitutionspotenzial. Hier können die technologischen Vorteile des Werkstoffs Kunststoff, also seine gute Ur- und Umformbarkeit und die damit verbundenen Möglichkeiten, Mikrostrukturen sowie Asphären in großen Stückzahlen reproduzierbar abzuformen, sowie die relativ geringen Materialkosten und das geringe spezifische Gewicht optimal ausgenutzt werden.

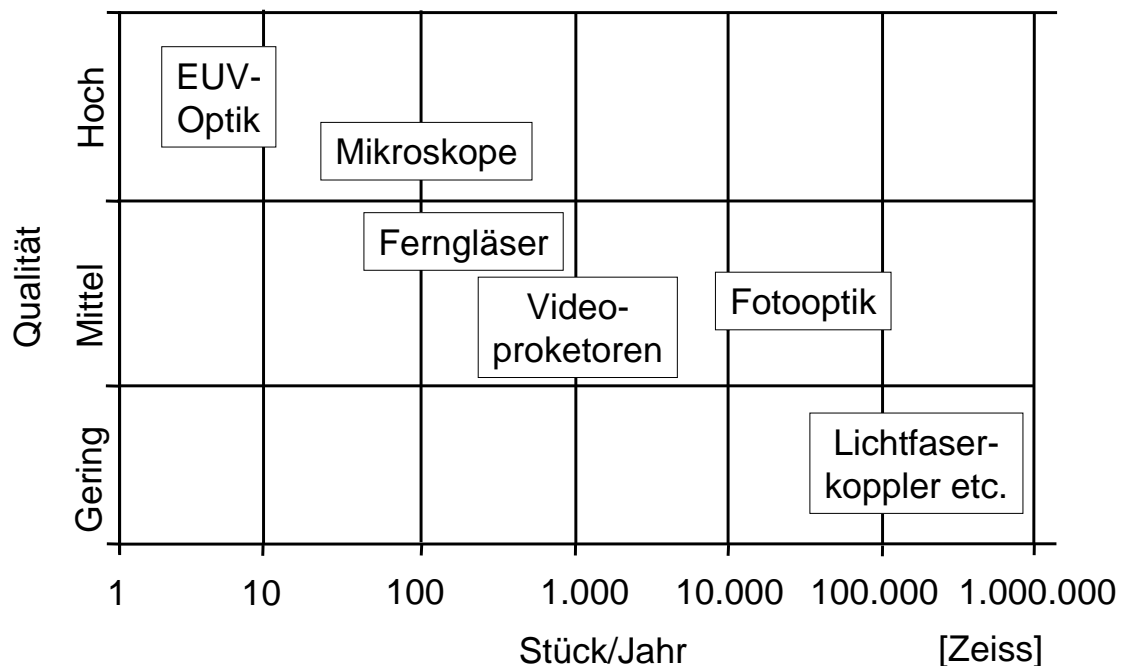
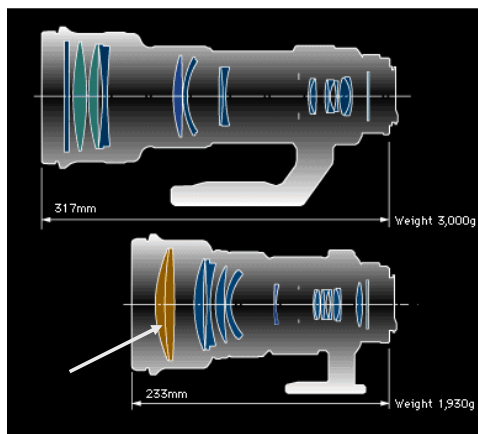


Bild 1: Schematische Darstellung der Relation von Stückzahl und Qualitätsklasse

Insbesondere im Bereich der abbildenden Systeme werden als Werkstoff für Optikkomponenten heute noch anorganische Gläser bevorzugt. Durch Verbesserung der optischen Qualität von Kunststoffen, der thermischen Materialeigenschaften sowie der Verfahrenstechniken zur Verarbeitung wird sich „Optik aus Kunststoffen“ in Zukunft in vielen Bereichen durchsetzen. Teilt man optische Anwendungen gemäß der an sie gestellten Anforderungen in drei Qualitätsklassen ein (Bild 1), so ergibt sich das größte Substitutionspotenzial im Bereich geringer und mittlerer Qualitätsanforderungen bei mittleren und hohen Stückzahlen [3].

Derzeit ist es allerdings nach wie vor nicht möglich, die Abbildungsqualitäten von Glaskomponenten, wie sie für Bauteile mit hohen Anforderungen benötigt werden, bei der Fertigung von Kunststoffkomponenten zu erzielen. Ursachen hierfür sind u. a. die häufig gegensätzlichen Anforderungen an die Formteilauslegung bezüglich der optischen Eigenschaften und der fertigungsgerechten Gestaltung, die charakteristischen Materialeigenschaften des Kunststoffs, wie z. B. die Schwindung beim Abkühlprozess, und die Komplexität des Spritzgießprozesses. Kunststoffe bieten jedoch aufgrund der guten Urformbarkeit die

Möglichkeit diffraktive, also Licht beugende Strukturen auf der Oberfläche von optischen Bauteilen zu erzeugen. Die Größe der aufgetragenen Strukturen liegt dabei in einem Bereich unterhalb der Wellenlänge des Lichtes. Durch die gezielte Integration solcher diffraktiver Optiken kann die Funktionalität eines optischen Systems teilweise deutlich gesteigert werden. Ein Beispiel für den erfolgreichen Einsatz eines diffraktiven Elementes zeigt Bild 2. Hier wurde durch den Einbau der Licht beugenden Optik bei einem Fotoobjektiv der Firma Canon eine Längenreduktion um etwa 26 % und eine Gewichtseinsparung von 36 % erreicht.



Diffraktion:

Lichtlenkung durch Beugung, also z.B. durch Oberflächenstrukturen eines optischen Elementes

Fotoobjektiv mit diffraktivem Element (unten)

→ Längenreduktion um 26%
Gewichtsreduktion um 36%

[Canon]

Bild 2: Substitutionspotenzial durch Verwendung eines diffraktiven Elements

Des Weiteren ergibt sich gerade im Bereich des stetig wachsenden Massenmarktes der optischen Systeme für Kamera- und Projektionstechnik das Potenzial zum Einsatz von polymeren Optiken. Insbesondere bei den Digitalkameras, die in Mobiltelefone integriert sind, führt die fortschreitende Miniaturisierung dazu, dass Bauraum und Gewicht eingespart werden müssen. Zudem werden auch Einsteigerhandys mittlerweile mit einer Kamera ausgestattet, um den Kaufreiz zu erhöhen. Dies führt dazu, dass die Systemkosten gering gehalten werden müssen. Hier trägt das geringere spezifische Gewicht des Werkstoffs Kunststoff zur Gewichtsreduzierung bei, zudem können die Systemkosten durch die Verwendung spritzgegossener Linsen bei hohen Stückzahlen deutlich gesenkt werden. Darüber hinaus kann durch den Einsatz asphärischer Kunststofflinsen der Bauraum deutlich verringert werden.

Der Markt für Korrekturlinsen, also Kontaktlinsen und Brillen wird schon heute vom Werkstoff Kunststoff dominiert. So werden bereits mehr als 70 % der Brillengläser aus Kunststoff hergestellt. Eine weitere Verdrängung des Werkstoffs Glas von 5 % bis 7 % pro Jahr wird darüber hinaus prognostiziert. Vorteile der meist durch Gießen von Duroplasten hergestellten Linsen sind das geringere Gewicht gegenüber Glas, die hohe Bruchfestigkeit und geringe Linsendicke der Kunststoffgläser.

Zusammenfassend lässt sich allerdings für den großen Bereich der optischen Systeme feststellen, dass Linsen aus Glas aufgrund ihrer herausragenden Materialeigenschaften auf absehbare Zeit den Markt dominieren werden. Substitutionspotenzial der Kunststoffoptiken gegenüber Glaslinsen besteht immer dann, wenn

- asphärische oder diffraktive Elemente gefordert werden,
- Bauraum und Gewicht gespart werden soll,
- die Herstellung eine Funktionsintegration ermöglicht (Montageträger),
- unterschiedliche Materialien im Prozess kombiniert werden oder
- sie bei hohen Stückzahlen und vollautomatisierter Fertigung Kostenvorteile bieten.

Im weiteren Sinne gehören Kunststoffverschiebungen, wie sie heute zunehmend im modernen Automobilbau Verwendung finden, auch zu optischen Bauteilen. Gleiches gilt für Kunststoffanwendungen in Beleuchtungskörpern. In den weiteren Ausführungen sollen jedoch diese beiden Anwendungsbereiche nicht weiter behandelt werden, sondern der Schwerpunkt auf die Herstellung abbildender und Licht führender Elemente gelegt werden [4].

2 KUNSTSTOFF ALS WERKSTOFF FÜR OPTISCHE FORMTEILE

Als Werkstoff für optische Bauteile aus Kunststoff kommen eine Reihe thermoplastischer Polymere in Frage. Die mit Abstand größte Verbreitung in optischen Anwendungen finden die beiden Polymere Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA) [5].

Für die Auslegung und Qualität der optischen Komponenten sind die optischen und thermischen Eigenschaften des Kunststoffs besonders wichtig. Tabelle 1 fasst physikalische Eigenschaften von vier im Bereich der optischen Anwendungen eingesetzten transparenten Kunststoffen zusammen [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Polycarbonat weist eine im Vergleich zu Polymethylmethacrylat und Cycloolefinischen Copolymeren (COC) größere Schlagzähigkeit auf, so dass es bevorzugt für Anwendungen eingesetzt wird, in denen Schlag- oder Stoßbelastungen auftreten können. So wird es beispielsweise für (Sport-) Schutzbrillen und Visiere, aber auch für Verschiebungen, die den oben genannten Belastungen ausgesetzt sein können, eingesetzt.

Physikalische Eigenschaft	Einheit	PMMA	PC	COC	PA (amorph)
n_d (Brechungsindex)	-	1,49	1,587	1,533	1,51
Transmissionsgrad	%	92	88	91	90
Dichte	g/cm ³	1,19	1,2	1,02	1,00
Zug-E-Modul (ISO 527)	MPa	3200	2400	3000	1600
Charpy-Schlagzähigkeit (ISO 179/1eU, 23 °C)	kJ/m ²	20	k. Bruch	13-15	k. Bruch
Wärmeformbeständigkeit	°C	100	139	170	135
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
Feuchteaufnahme (23 °C, 50 % rel. F.)	%	0,6	0,12	< 0,01	1,5

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften transparenter Kunststoffe

Die Cycloolefinischen Copolymere gehören im Vergleich zu PMMA und PC zu einer relativ jungen Werkstoffgruppe. Sie finden aufgrund ihrer guten optischen Eigenschaften, also guter Transmission und relativ hohem Brechungsindex bei gleichzeitig geringer Dichte, bereits in vielen optischen Produkten Anwendung. Bei langen Zykluszeiten im Spritzgießen, wie sie bei der Herstellung dickwandiger optischer Linsen vorkommen, besteht jedoch die Gefahr, dass das thermisch empfindliche Material durch die lange Verweilzeit bei der Schmelztemperatur in der Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine abbaut.

Polyamid (PA) ist, abhängig von seiner chemischen Struktur, als teilkristallines oder amorphes Material erhältlich. Transparentes Polyamid weist gute mechanische Kennwerte auf und ist gegenüber vielen Chemikalien beständig. Im Vergleich zu PC, COC und PMMA besitzt es jedoch den geringsten E-Modul.

Polymethylmethacrylat besitzt gute Transmissionseigenschaften. Sein Brechungsindex liegt allerdings unter dem von PC und COC. Besonders interessant für viele Anwendungen ist es deshalb, weil es von den optischen Thermoplasten neben guten optischen Eigenschaften die größte Härte und damit auch Kratzfestigkeit aufweist.

Bei den für optische Anwendungen eingesetzten Werkstoffen findet man weiterhin die folgenden transparenten Thermoplaste: Cycloolefinische Polymere (COP) sowie Polystyrol (PS), Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN), Styrol-Methylmethacrylat-Copolymer (SMMA) und einige wenige weitere Materialien, wie die im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts klaren, mikrokristallinen Polyamide (PA) [13, 14,15].

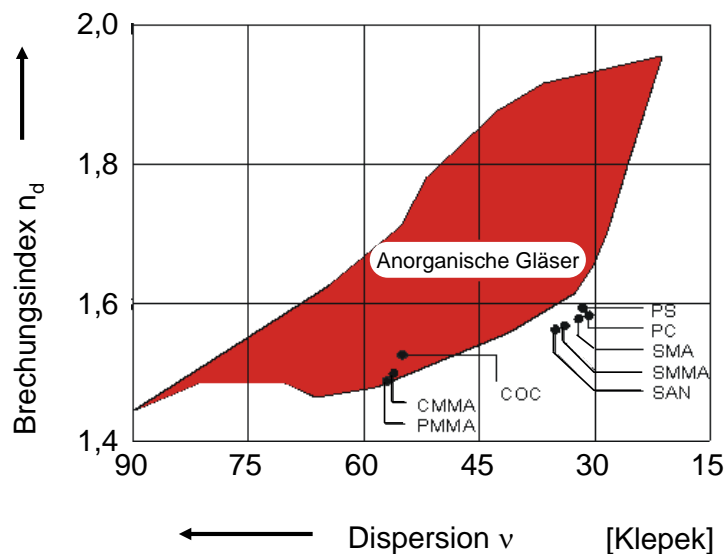


Bild 3: Brechungsindex und Dispersion optischer Kunststoffe und anorganischer Gläser (Abbé-Diagramm)

Die Auswahl des am besten geeigneten Kunststoffs stützt sich in der Regel auf die wichtigen optischen Kennwerte Brechungsindex und Dispersion (Bild 3) sowie die Transmissionseigenschaften, aber auch auf andere Parameter, wie Wasseraufnahme, E-Modul, oder Wärmeformbeständigkeit [4].

3 Gestaltung von Kunststoffoptiken

Das Spritzgießen als Verfahren gibt dem Designer generell eine große Gestaltungsfreiheit im Bezug auf Formteilgeometrie, Oberflächenform und -struktur. Es sind jedoch einige Einschränkungen zu beachten, die zum großen Teil allgemein für die Konstruktion von Spritzgussbauteilen gelten. So dürfen beim Urformprozess des Spritzgießens keine Hinterschnitte ausgeformt werden, die anschließend beim Entformen des Bauteils aus dem Spritzgießwerkzeug eine Bewegung in Entformungsrichtung verhindern und dazu führen, dass das Bauteil verformt oder geschädigt wird. Lassen sich Hinterschnitte nicht vermeiden, muss das Werkzeug so ausgelegt werden, dass bewegliche Kerne Raum zur Entformung freigeben. Ebenfalls aus Gründen der guten Entformbarkeit sind Bauteiloberflächen, deren Entformungsrichtung tangential verläuft, mit einer Entformungsschräge von 1° - $1,5^\circ$ zu versehen. Diese beiden Richtlinien gelten sowohl für die optische Komponente als Ganzes, aber auch für eine gegebenenfalls mikrostrukturierte Bauteiloberfläche mit optischer Funktion. Ungünstig, und daher nach Möglichkeit zu vermeiden, sind Wanddickensprünge in der Formteilgeometrie. Wanddickensprünge führen zum einen zu einer ungleichmäßigeren Füllung der Kavität in der Einspritzphase, was im ungünstigsten Fall zum Einschließen von Luft im Formteil und damit direkt zu Ausschuss führt. Zudem ergibt sich im Bereich der größeren Wanddicke ein größeres Schwindungspotenzial, welches beim Abkühlen des Kunststoffs zu Einfallstellen oder Verzug des Bauteils führen kann.

Für eine optische Funktion einer Linse sind aber unterschiedliche Wanddicken innerhalb eines Bauteils erforderlich. Das Bauteil muss dann so ausgelegt sein, dass durch eine kontinuierliche Veränderung der Bauteildicke ein gutes Füllverhalten in der Einspritzphase erreicht wird. Kritisch ist in dieser Hinsicht die Herstellung von konkav-konkav Linsen im Spritzgießprozess. Dieser Linsentyp ist auf beiden Seiten kontinuierlich so gewölbt, dass sich die größte Wanddicke im Randbereich befindet.

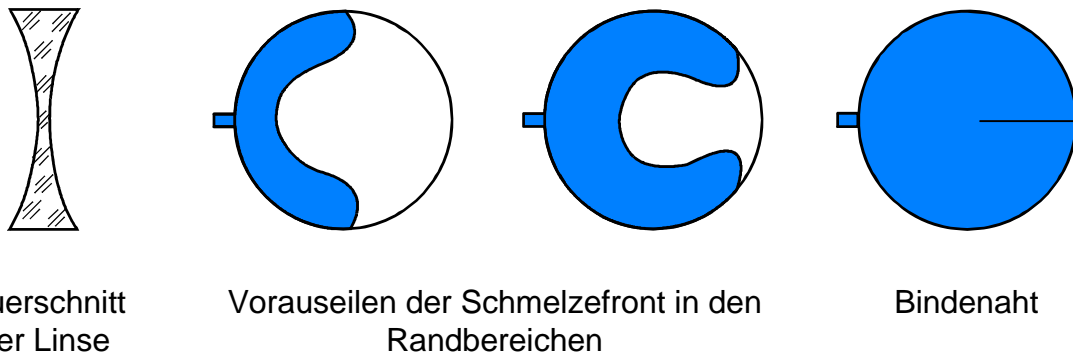


Bild 4: Füllvorgang einer bikonkav Linse (schematisch)

Die Kavität für eine Kunststofflinse wird in der Regel von der Seite her gefüllt, da ein Anspritzen über die optische Funktionsfläche zu Markierungen im Funktionsbereich führen würde, was unerwünscht ist. Die in der Einspritzphase von der Seite her einströmende Schmelze bewegt sich nun aufgrund der größeren Fließkanalhöhe im Randbereich der Linse schneller voran als im Zentrum (Bild 4). Ist der Dickenunterschied zu groß, kommt es, wie im Bild dargestellt, zum Zusammenfließen der im Randbereich vorgeeilten Fließfronten, bevor der zentrale Bereich überströmt und eine Bindenaht entsteht, welche als linienförmige Fehlstelle in der fertigen Linse zu erkennen ist. Außerdem besteht die Gefahr eines Luft einschusses im Zentrum der Linse. In der Regel lassen sich Kunststofflinsen im Spritzgießprozess noch fertigen, solange die Dicke am Rand kleiner ist als das Dreifache der minimalen Dicke in der Linsenmitte.

3.1 Werkzeugtechnik

Für die im weiteren Verlauf dargestellten Spritzgieß- und Spritzprägeversuche wird ein Stammwerkzeug eingesetzt, welches im Rahmen des transregionalen Sonderforschungsbereichs „Prozessketten zur Replikation komplexer Optikkomponenten“ (SFB/TR4) entwickelt und gebaut worden ist. Eine wesentliche Anforderung bei der Auslegung des Spritzgießwerkzeugs war die Modularität, das heißt, das Werkzeug ist nicht für die Herstellung einer einzelnen Linsengeometrie konstruiert worden, sondern es kann diverse Formeinsätze aufnehmen. Die Formeinsätze werden durch Polieren oder Diamantfräsen bearbeitet und bilden mit ihrer kavitätsseitigen Oberfläche im Spritzgießprozess die Funktionsoberfläche der Linse ab. Dadurch ist es möglich, mit einem Spritzgieß-Stammwerkzeug durch Austausch der Formeinsätze Linsen mit unterschiedlicher Geometrie herzustellen.

Für die optische Funktion einer Linse ist eine Einhaltung der gewünschten Oberflächenkontur und -qualität besonders wichtig. Während die Oberflächenqualität der Linse (z. B. Rauheit, Mikro-Strukturen etc.) von der Qualität der Werkzeugeinsätze abhängt, ist für die Konturtreue das Spritzgieß-Stammwerkzeug von großer Bedeutung. Die Abformung im Spritzgießprozess kann nicht genauer sein als die Konturtreue der Kavität bei geschlossenem Spritzgießwerkzeug. Als Forderung ergibt sich also, dass sich die Werkzeugeinsätze in den Formhälften und die Formhälften des Werkzeugs während des Schließvorgangs reproduzierbar zueinander ausrichten müssen.

Die Positionierung der Formeinsätze im Stammwerkzeug wird über eine Kegelnzentrierung erreicht. Während die Formeinsätze in den Formhälften im Spritzgießzyklus montiert und somit zentriert bleiben, werden die Formhälften in jedem Spritzgießzyklus zur Entformung des Kunststoffteils geöffnet und bei Start des nächsten Zyklus wieder geschlossen. Die Ausrichtung der Formhälften zueinander geschieht während der Schließbewegung zunächst über Bolzen, welche aus der einen Werkzeughälfte herausragen und in Führungen der anderen Werkzeughälfte eintauchen. Um eine genauere Ausrichtung der Formhälften zueinander zu erreichen, ist allerdings eine Feinzentrierung nach dem Eintauchen der Bolzen erforderlich, die im Folgenden noch genauer beschrieben wird.

Das Spritzgieß-Stammwerkzeug ist sowohl für das Spritzgießen als auch für die Prozessvariante Spritzprägen geeignet. Für das Spritzprägen ist es notwendig, die Kavität gegen ein Austreten von Schmelze abzudichten, noch bevor das Werkzeug vollständig geschlossen ist. Eine konstruktive Möglichkeit, dies zu erreichen, ist üblicherweise die Integration einer Tauchkante in das Werkzeug, sodass die Kavität über diese umlaufende Parallelführung verschlossen wird, bevor sich das Werkzeug in der vollständig geschlossenen Position befindet. Um eine Überlagerung der Führung durch die Tauchkante und der Positionierung der Formhälften zueinander über die Zentrierelemente zu verhindern, wird die Funktion der Tauchkante von einem federnd gelagerten Dichtring übernommen. Die Feinzentrierung wird durch einen ebenfalls federnd gelagerten, kegeligen Ring ausgeführt. Das Funktionsprinzip ist in Bild 5 dargestellt.

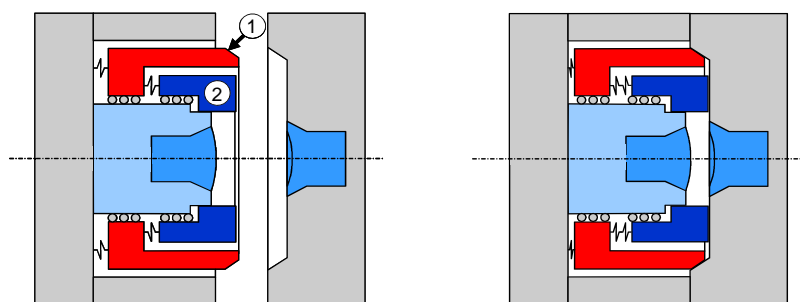


Bild 5: Schnitt durch das Spritzgießwerkzeug mit Prinzipskizze der Zentrierung

Auf der Schließseite des Werkzeugs ist der kegelige Zentrierring (1) federnd gelagert und berührt beim Schließen des Werkzeugs die entsprechende Gegenfläche auf der Düsenseite. Damit richtet sich der Zentrierring (1) relativ zur Düsenseite aus. Über eine spielfrei vorgespannte Kugelführung wird der schließseitige Formstempel, welcher den Formeinsatz trägt, ebenfalls relativ zur Düsenseite ausgerichtet. Nachdem dieser Vorgang abgeschlossen ist, kommt der über Federn abgestützte Dichtring (2) zur Anlage auf der Düsenseite und verschließt so die Kavität.

In dieser Position ist das Werkzeug noch nicht vollständig geschlossen, so dass neben dem Spritzgießen auch die Variante des Spritzprägens mithilfe der Schließeinheit für die Herstellung der Kunststoffoptiken eingesetzt werden kann. Bild 6 zeigt die konstruktive Umsetzung des oben dargestellten Konzepts, das dem Spritzgieß-Stammwerkzeug zugrunde liegt [16].

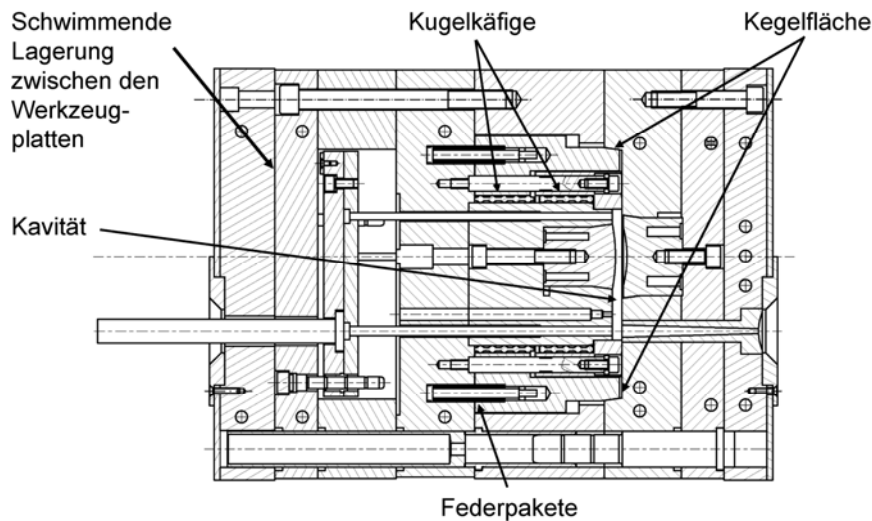


Bild 6: Schnitt durch das Werkzeug mit federnd gelagertem Zentrierring

3.2 Formteilgeometrie

Für die im Folgenden dargestellten Prozessanalysen wird eine plan-konvexe Linse mit einem Außendurchmesser von 80 mm und einer optischen Funktionsfläche von 50 mm Durchmesser untersucht (Bild 7). Der Anguss ist über einen 15 mm breiten Steg seitlich mit der Linse verbunden. Die Dicke der nicht optischen Fläche im Randbereich misst 8 mm, der sphärische Radius der konvexen Linsenoberfläche beträgt 150 mm und die maximale Dicke der Linse 10,9 mm.

Daten der optischen Funktionsflächen

- Grundradius $R_1 = 150 \text{ mm}$
- $R_2 = \infty$
- Durchmesser $d = 50 \text{ mm}$
- Brennweite $f \approx 306 \text{ mm}$

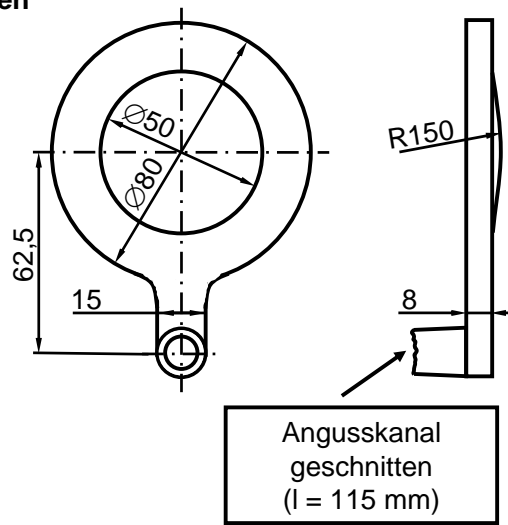


Bild 7: Untersuchte Formteilgeometrie

4 SPRITZGIEßEN UND SPRITZPRÄGEN – PROZESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

Für die Spritzgieß- und Spritzprägeversuche wird aufgrund der guten optischen Eigenschaften und der verbreiteten Anwendung auf Polymethylmethacrylat-Formmassen (PMMA) zurückgegriffen. Zum Einsatz kommt die Type Plexiglas 7N OQ der Röhm GmbH & Co. KG, Darmstadt. Plexiglas 7N OQ ist eine Formmasse mit guten Fließeigenschaften und mittlerer Wärmeformbeständigkeit und wird zur Herstellung von optischen und technischen Formteilen eingesetzt. Der Vermerk OQ sichert der Formmasse eine geprüfte optische Qualität zu und ist daher für die Herstellung dickwandiger optischer Bauteile besonders geeignet.

Bei den Spritzgießversuchen werden innerhalb des gewählten statistischen 2²-Versuchsplans die Einstellparameter Einspritzvolumenstrom und Restkühlzeit variiert. Aus Vorversuchen ist bekannt, dass eine Variation der Nachdruckhöhe nicht sinnvoll ist, sondern ein möglichst hohes Nachdruckniveau gewählt werden sollte. Der maximale Druck ist durch die einwandfreie Entformbarkeit der Bauteile begrenzt und wird mit 1300 bar festgelegt.

Einstellparameter	Einstellniveau		
	-	0	+
Einspritzgeschwindigkeit [cm ³ /s]	20	40	60
Restkühlzeit [s]	300	390	480

Tabelle 2: Einstellwerte im vollfaktoriellen 2²-Versuchsplan

Beim Spritzprägen wird ein umfangreicherer 2^4 -Versuchsplan durchgeführt und ausgewertet, da noch keine so umfangreichen Kenntnisse aus Vorversuchen vorliegen. Die variierten Einstellparameter sind Prägespalt, Prägegeschwindigkeit, Zuhaltkraft nach Ende Nachdruck und die Restkühlzeit.

Einstellparameter	Einstellniveau		
	-	0	+
Prägespalt [mm]	3	4	5
Prägegeschwindigkeit [mm/s]	1	2	3
Zuhaltkraft nach Ende Nachdruck [kN]	250	350	450
Restkühlzeit [s]	300	390	480

Tabelle 3: Einstellwerte im vollfaktoriellen 2^4 Versuchsplan

Die Zielgröße ist die geometrische Abweichung der Linsenkontur von der Oberfläche des Formeinsatzes.

5 BESTIMMUNG DER FORMABWEICHUNG DER OBERFLÄCHEN

Die optischen Eigenschaften eines Bauteils werden wesentlich von der Oberflächengeometrie beeinflusst. Eine Möglichkeit, die Oberflächengeometrie zu erfassen, ist die berührungslose, optische Messung der Bauteile auf dem Messgerät MicroGlider FRT GmbH, Bergisch Gladbach. Zur Analyse der Abformgenauigkeit werden die aus der MicroGlider-Messung gewonnenen Daten in ein Auswertungsprogramm geladen. Bei diesem Programm handelt es sich um einen Software-Prototypen, der am IKV entwickelt wurde [17] und auf der Softwareumgebung Matlab, The MathWorks, Natick, Massachusetts (USA) basiert. Die dreidimensionalen Daten der konvexen und planen Formteiloberfläche und der zugehörigen Kavität werden eingelesen und graphisch dargestellt. Da die Kavität und die Formteile bei der Messung mit dem MicroGlider evtl. nicht ganz plan auf dem Messtisch aufliegen, wird zunächst diese Verkippung kompensiert. Dies geschieht, indem der plane Spiegelrand der Formteile als Bezugsebene genutzt wird. Weiterhin müssen die Kavitäts- und Formteildaten, die verdreht zueinander liegen können, in der Ebene richtig positioniert werden. Diese Verdrehung entsteht während der getrennten Erfassung der Oberflächendaten von Kavität und Formteil, wenn sie auf dem Messtisch des MicroGlider (geringfügig) unterschiedlich positioniert werden. Um die Verdrehung zu eliminieren, wird zunächst die Lage einer Nut auf dem Spiegelrand von der Kavität und vom Formteil bestimmt (Bild 8).

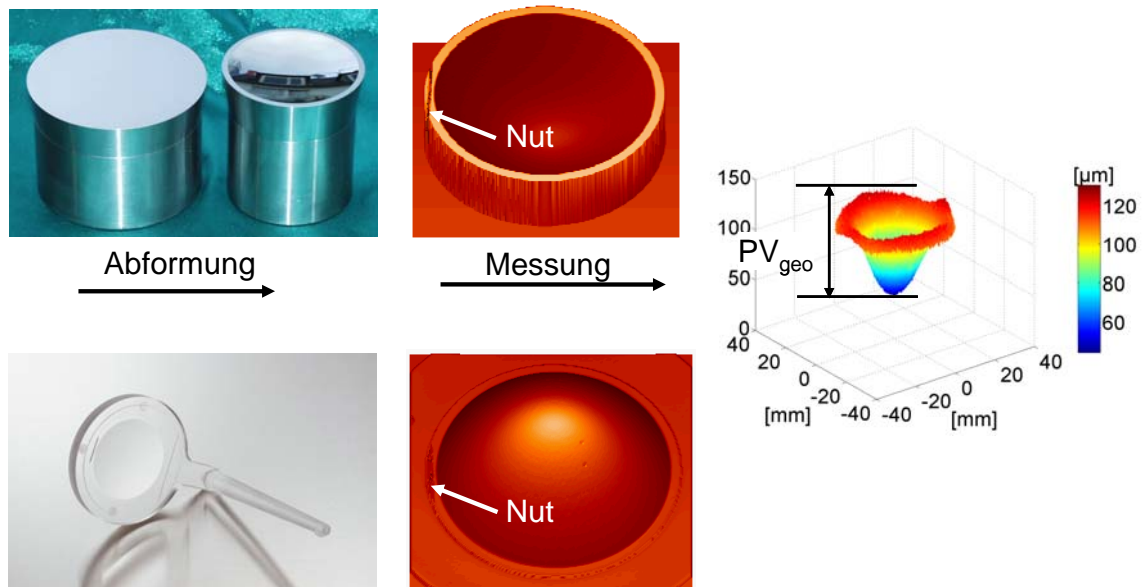


Bild 8: Kunststofflinse und Formeinsatz mit Nut

Anschließend werden die Daten so gedreht, dass die zwei Nuten genau übereinander liegen. Nach dieser Ausrichtung der Messdaten zueinander werden die Kavitäts- und die Formteiloberfläche voneinander subtrahiert. Die Differenz, die idealerweise Null ergeben sollte, wird wiederum graphisch dargestellt. Aus dem Differenzbild wird der Peak-to-Valley-Wert (PV_{geo}) als Differenz zwischen größter und kleinster Abweichung als Maß für die maximale Abweichung von der Idealgeometrie abgelesen. Für die plane und konvexe Seite der Linsen ergeben sich die beiden Kennwerte $PV_{geo, plan}$ und $PV_{geo, konvex}$.

6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE – VERGLEICH DER ABFORMGENAUIGKEIT SPRITZGIEßEN / SPRITZPRÄGEN

Als Qualitätskennwert für die geometrische Abformgenauigkeit wird die Formabweichung der planen und konvexen Linsenoberfläche bestimmt. Beim Spritzgießen sind die Haupteffekte der Parameter Einspritzgeschwindigkeit und Restkühlzeit auf $PV_{geo, plan}$ statistisch hoch signifikant. Eine geringe Einspritzgeschwindigkeit und eine lange Restkühlzeit verbessert $PV_{geo, plan}$. Hinsichtlich $PV_{geo, konvex}$ haben ebenfalls alle Faktoren einen statistisch signifikanten Haupteffekt. Bleibt bei der Einspritzgeschwindigkeit die Tendenz gleich, so kehrt sich die Richtung des Effekts bei der Restkühlzeit im Vergleich zu $PV_{geo, plan}$ um. Eine geringe Einspritzgeschwindigkeit und eine kurze Restkühlzeit verringern $PV_{geo, konvex}$.

Beim Spritzprägen sind bis auf den Effekt der Prägegeschwindigkeit alle Haupteffekte signifikant. Hinsichtlich des $PV_{geo, plan}$ wirken sich ein geringer

Prägespalt, eine geringe Zuhaltkraft nach Ende des Nachdrucks und eine hohe Restkühlzeit positiv aus.

Spritzgießen	Optimaler Wert
Einspritzgeschwindigkeit [cm ³ /s]	20
Restkühlzeit [s]	480
Spritzprägen	
Prägespalt [mm]	3
Prägeschwindigkeit [mm/s]	3
Zuhaltkraft nach Ende Nachdruck [kN]	250
Restkühlzeit [s]	480

Tabelle 4: Günstigste Einstellwerte der Spritzgießmaschine

Tabelle 4 zeigt die im Rahmen der statistischen Versuchspläne günstigsten Einstellungen der Spritzgießmaschine. An diesen Betriebspunkten wurden hinsichtlich des $PV_{\text{geo, plan}}$ die besten Ergebnisse ermittelt [16].

Aus den Geometriedaten ergibt sich eine maximale Dicke von 10,9 mm im Zentrum der Linse. Bei den abgeformten Linsen können auf einem Prüfdurchmesser von 50 mm bei geeigneter Prozessführung Formabweichungen im Bereich von 11 μm bis 17 μm zwischen Kavitäts- und Formteiloberfläche erreicht werden (Bild 9).

Die maximale Formabweichung der Linsen wird durch den Wechsel vom Spritzgießen zum aufwändigeren Spritzprägen in geringem Maße verbessert. Für die Funktion der Linse in einem optischen System ist jedoch neben der möglichst exakten Einhaltung der Geometrie vor allem die sich ergebende optische Wirkung von Bedeutung. Die optischen Eigenschaften einer Linse hängen dabei von der Geometrie der optischen Oberfläche und den inneren Eigenschaften im Kunststoff ab. Verunreinigungen im Kunststoff, Molekülorientierungen oder innere Spannungen können die optische Funktion einer Linse trotz guter Einhaltung der Geometrie beeinträchtigen.

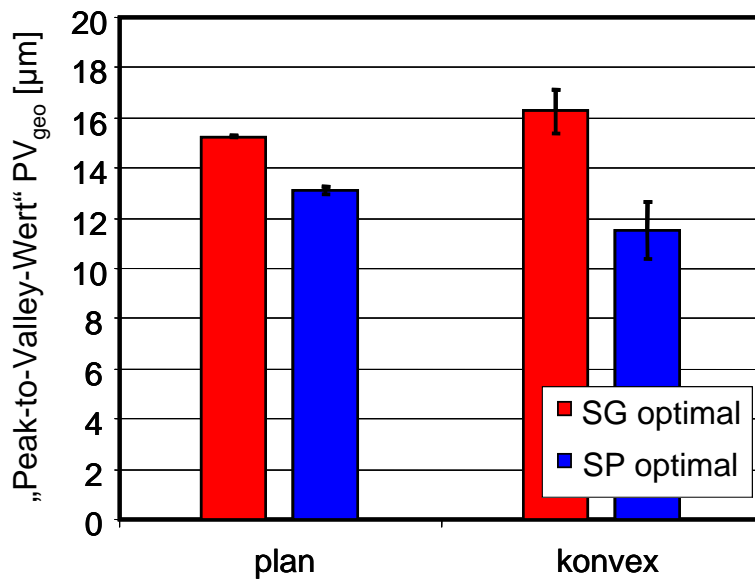


Bild 9: Vergleich der maximalen geometrischen Differenz zwischen Formteil und Formeinsatz an optimierten Betriebspunkten für Spritzgießen und Spritzprägen

7 ITERATIVE FORMKOMPENSATION

Die erreichte geometrische Abformgenauigkeit ist für hochgenaue optische Formteile noch nicht ausreichend. Aus diesem Grund beschäftigen sich am IKV weitere Forschungsprojekte mit Untersuchungen zur iterativen Erhöhung der geometrischen Abformgenauigkeit optischer plan-konvexer Kunststofflinsen aus PMMA mittels Spritzgießen. Bei plan-konvexen Linsen ist unter anderem eine Herausforderung, dass die Dicke der Linse in radialer Richtung nicht konstant ist. Daraus resultiert in der Linsenmitte von solchen Kunststoffoptiken ein höheres Nachschwindungspotenzial als am Rand. Dies führt zu Formabweichungen der optischen Funktionsfläche, welche die optische Leistung der Linse beeinträchtigt.

7.1 Zielsetzung

Abweichungen von der Sollgeometrie einer Linse haben mehrere Ursachen. Einerseits zeichnen sich Formfehler des Formeinsatzes im Replikat ab, andererseits entstehen Formabweichungen durch die bereits erwähnten lokal unterschiedlichen Schwindungspotenziale. Die Summe der Formfehler lässt sich messen und in einen systematische Anteil und einen statistischen Anteil aufgliedern. Die statistisch auftretende Formabweichung kann durch die Optimierung des Spritzgießprozesses reduziert werden. Der verbleibende systematische Formfehler, der durch den Spritzgießprozess nicht beeinflusst wird, soll durch eine entsprechende lokale Nacharbeitung des Formeinsatzes korrigiert werden. Bis zur korrekten Abformung der Linse ist es notwendig, eine Prozesskette iterativ zu durchlaufen, in der sowohl der Formeinsatz als auch die

Replikate vermessen werden und anschließend die Formkorrektur durchgeführt wird.

7.2 Lösungsweg

Zur Steigerung der Abformgenauigkeit wird zunächst die Formabweichung der planen Linsenseite betrachtet. Um den oben genannten Herausforderungen zu begegnen, ist eine neue Prozesskette zur Herstellung von hochgenauen optischen Kunststoffformteilen entwickelt worden, welche iterativ durchlaufen wird, wie im Bild 10 dargestellt.

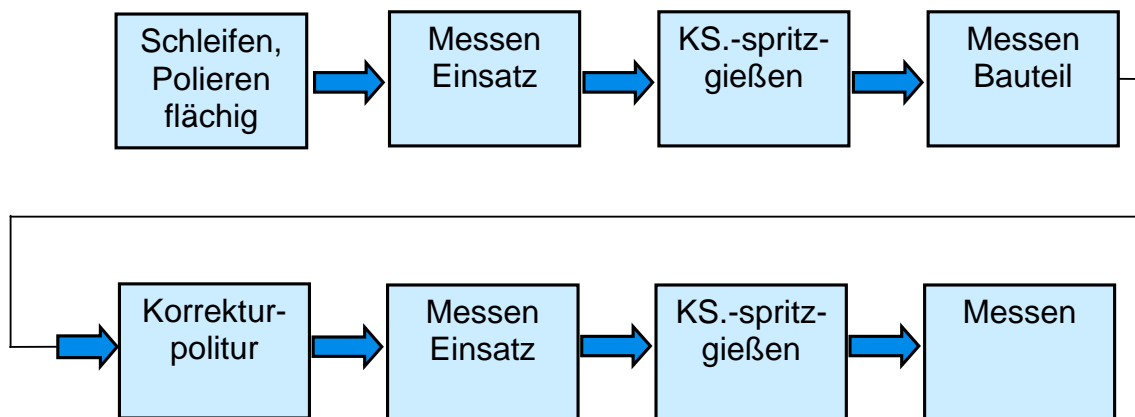


Bild 10: Prozessschritte zur Herstellung von Kunststofflinsen

Das verwendete Werkzeug ist wie in Bild 5 und 6 ersichtlich modular aufgebaut, sodass die Formeinsätze gewechselt werden können. Im ersten Schritt werden die Formeinsätze mit einer Präzisionspoliermaschine poliert. Im folgenden Arbeitsgang wird der Formeinsatz vermessen. Daran anschließend folgt die Abformung der Kunststofflinsen im Spritzgießverfahren. Die ersten Linsen werden aufgrund von thermischen Einschwingvorgängen verworfen. Es folgt die kontinuierliche Abformung von Kunststofflinsen zur Vermessung. Um ein quantitatives Kriterium zur Bewertung der Abformung einer Oberfläche zu haben, benötigt man einen konkreten Zahlenwert. Hier bietet sich der bereits erwähnte Peak-to-Valley-Wert (PV_{geo}) an. Um nun diesen $PV_{\text{geo, plan}}$ Wert zu minimieren, ist es zielführend, die Formabweichung auf dem Formeinsatz vorzuhalten. Hierfür muss eine entsprechende Vorhaltestrategie entwickelt werden. Fertigungstechnisch wird eine Korrektur des Formeinsatzes mittels lokaler Politur vorgenommen [18, 19]. Hierfür wird ein adaptiver 5-Achs-Polierkopf, welcher sich zur lokalen Feinkorrektur von Werkzeugeinsätzen mit optischer Qualität eignet, verwendet. Im weiteren Verlauf der Prozesskette wird nun der korrigierte Formeinsatz erneut vermessen. Der korrigierte Formeinsatz wird dann wieder in das Werkzeug eingebaut. Es folgt ein erneutes Abformen von Kunststofflinsen unter exakt gleichen Prozessparametern wie bei den vorher gegangenen Iterationsschritten.

7.3 Ergebnisse

Nach dem ersten flächigen Polieren des planen Formeinsatzes ist eine rotationssymmetrische konkave Formabweichung des Formeinsatzes von der planen Sollgeometrie von $5,2 \mu\text{m}$ gemessen worden. Ausgangssituation ist also keine ideal plane Formeinsatzkontur. Für die anschließende Abformung von Kunststofflinsen werden die in Vorversuchen bereits bestimmten optimalen Spritzgießparameter verwendet, um die statistisch auftretende Formabweichung gering zu halten. Nach der Abformung findet die messtechnische Untersuchung der replizierten Linsen statt. An den Linsen wird eine konkav elliptische Formabweichung von der planen Sollgeometrie von im Mittel $4,5 \mu\text{m}$ gemessen. Die Zusammenfassung der messtechnischen Charakterisierung ergab eine Gesamtformabweichung von Formeinsatz zu Linse von $9,7 \mu\text{m}$ (Bild 11), die es vorzuhalten gilt.

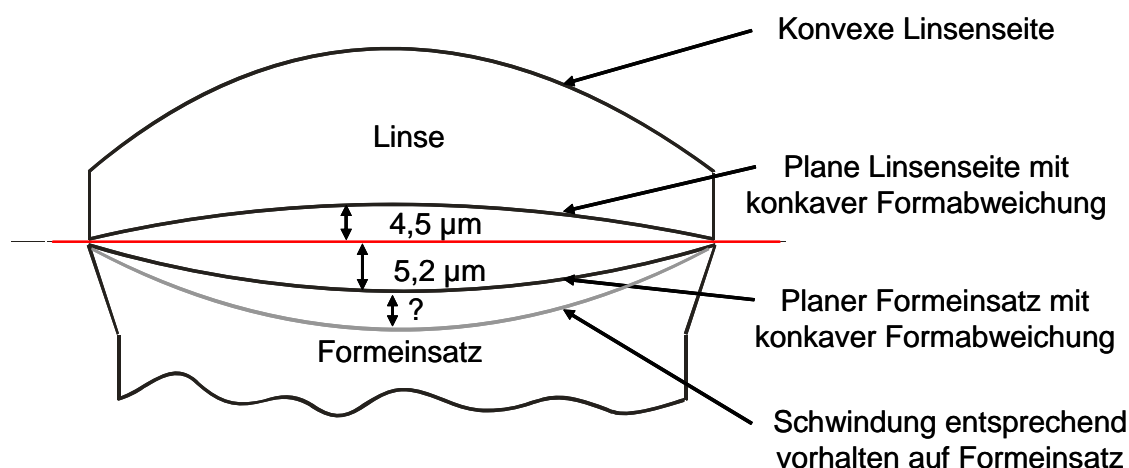
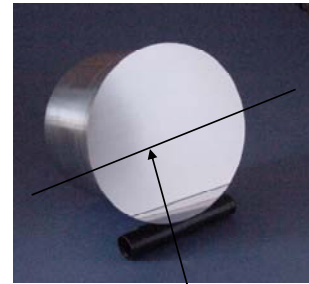
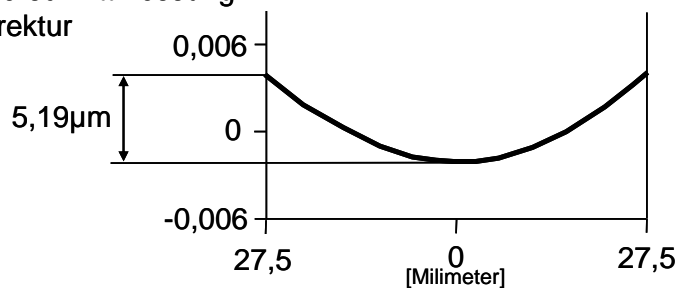


Bild 11: Vorhaltestrategie

Dazu wird die Kontur des Formeinsatzes in geeigneter Art und Weise lokal mittels lokaler Korrekturpolitur modifiziert [18, 19]. Um die konkave Formabweichung der Linse reduzieren zu können muss die bestehende Konkavität des Formeinsatzes mittels lokaler Korrekturpolitur erhöht werden.

In Bild 12 sind die ursprüngliche Formeinsatzkontur sowie das Korrekturergebnis in Form einer Profilquerschnittmessung dargestellt. Die Konkavität des Formeinsatzes wurde auf $12,5 \mu\text{m}$ erhöht, jedoch ist eine Abweichung von der idealen Sphäre zu erkennen. Nach Einbau des korrigierten Formeinsatzes in das modulare Stammwerkzeug folgte ein erneutes Abformen von Kunststofflinsen am optimalen Betriebspunkt des Spritzgießprozesses. Anschließend wurde eine Vergleichsmessung der korrigierten Linsen durchgeführt. Der PV-Wert konnte auf $3,7 \mu\text{m}$ reduziert werden. Es ist anzumerken, dass das Profil der Abformung mit Schwankungen im Bereich von $\pm 1,5 \mu\text{m}$ inhomogen ist. Weiterhin ist eine lokale Überkorrektur in der Mitte des Bauteils festzustellen.

Profilquerschnittmessung
vor Korrektur



Profilquerschnittmessung
nach Korrektur

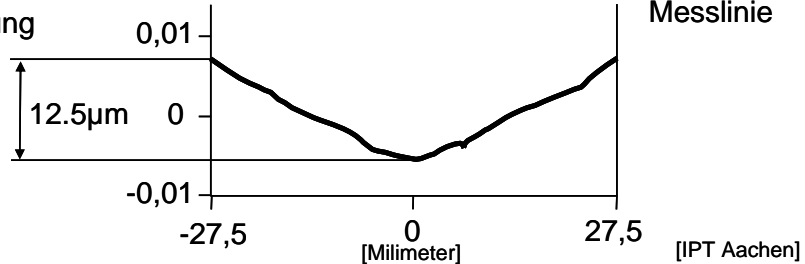


Bild 12: Ergebnis der Formkorrektur des Formeinsatzes

Die Prozesskette zur lokalen Korrektur des während der Kunststoffreplikation auftretenden reproduzierbaren Fehlers an einer plan-konvexen Optik konnte erfolgreich durchlaufen werden. Im ersten Durchlauf konnte die reproduzierbare durchschnittliche Abweichung der planen Linsenfläche von $4,5 \mu\text{m}$ auf $3,7 \mu\text{m}$ reduziert werden. Zur Herstellung einer idealen planen Linsengeometrie sind jedoch weitere Korrekturschritte notwendig.

Ziel ist die Minimierung der Iterationsschritte bei der Fertigung von hochpräzisen optischen Komponenten. Um eine ideale Abformung einer vorgegebenen Kontur im Spritzgießprozess zu erreichen, ist die Erarbeitung von Grundlagenwissen notwendig. Da die Schwindung im Mikrometerbereich nicht simuliert werden kann, muss die Abweichung von der Sollgeometrie messtechnisch erfasst und iterativ korrigiert werden. Bei der ersten Iteration wurde eine Reduktion der Abweichung um 20 % erzielt.

8 FAZIT UND AUSBLICK

Spritzgießen und Spritzprägen sind Urformverfahren, die ein großes Potenzial zur Herstellung optischer Bauteile in großer Stückzahl haben. Besonders im Bereich der abbildenden Optik ist der Anspruch an die notwendige Formtreue hoch, sodass ein sehr gutes Prozessverständnis erforderlich ist, um die geforderten Toleranzen erreichen und einhalten zu können.

Das Spritzgießen bietet bei geeigneter Wahl der Einstellparameter bereits die Möglichkeit, Kunststoffteile mit Toleranzen im Mikrometerbereich herzustellen. Ist die so erreichbare Präzision noch nicht ausreichend, lässt sich durch die Verfahrensvariante Spritzprägen und eine geeignete Werkzeugtechnik eine weitere Steigerung der Formtreue erreichen, wie in den vergleichenden Untersuchungen dargestellt werden konnte.

Eine zusätzliche Qualitätssteigerung von Kunststoffoptiken kann durch das Vorhalten der lokalen Schwindung in der Form erreicht werden. In zukünftigen Untersuchungen soll festgestellt werden, ob sich mittels des neuartigen Polierverfahrens Freiformflächen auf Formeinsätzen herstellen lassen, wodurch die lokale Schwindung kompensiert werden kann. Damit soll iterativ die Sollgeometrie einer Kunststofflinse erreicht werden. Durch die Iterationen wird Prozesswissen gesammelt, um in Zukunft die Formkontur vorherzusagen und damit die gewünschte Bauteilgeometrie zu erreichen.

Zukünftige Potenziale von Kunststoffoptiken liegen im Bereich von Bauteilen, die heute noch schwer oder aufwändig herzustellende, komplexe Geometrien aufweisen. Um ein Bauteil zu erhalten, dessen Oberfläche genau der im Optikdesign festgelegten entspricht, ist es erforderlich, den verbleibenden Formfehler in der Kavität vorzuhalten. Gelingt dies, so lassen sich durch das Spritzprägen auch komplexe Geometrien wie Asphären oder optische Freiformflächen in einem Prozessschritt erzeugen. Der Einsatz von optischen Freiformflächen, beispielsweise für Beleuchtungszwecke, ist noch jung und hat ein großes Wachstumspotenzial [20]. In diesem Marktsegment sind Massen Anwendungen häufig, so dass sich insbesondere in Kombination mit der fortschreitenden LED-Technologie ein breites Einsatzgebiet für die Kunststoffoptik neu entwickeln kann [21, 22]. Auch in Systemen der abbildenden Optik (z. B. Head-up-Displays) werden aufgrund eines günstigeren Optikdesigns (z. B. zur Verringerung des Raumbedarfs oder des Gewichts) zunehmend Freiformflächen eingesetzt, die zu einem großen Teil vorteilhaft aus Kunststoff gefertigt werden können [3].

Dank

Die dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des transregionalen Sonderforschungsbereiches SFB/TR4 durchgeführt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Michaeli, W.
Schröder, T.: Wirtschaftliche Bedeutung des Kunststoffs im Bereich optischer Anwendungen, In: Tagungsband des Seminar zur Kunststoffverarbeitung: Optische Bauteile aus Kunststoff, S. 1-14. IKV, Aachen, 2005
- [2] N.N.: Optische Industrie weiter im Aufwärtstrend. Pressemitteilung Deutscher Industrieverband für optische, medizinische und mechatronische Technologien e.V. (Spectaris), 29. Juni 2005

- [3] Günther, G., Hofmann, J., Leitel, A.: Präzisionsbauteile aus Kunststoff in optischen Systemen, In: Tagungsband der Internationalen Jahrestagung Spritzgießen 2004, S. 13-35. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Baden-Baden, 2004
- [4] Michaeli, W. Forster, J. Qualität und Effizienz bei der Herstellung optischer Kunststoffbauteile – Eine Herausforderung für Produktion und Entwicklung, In: Tagungsband des 23. IKV-Kolloquium, Plenarvortrag I, Aachen, 2006
- [5] Gärtner, R. Wirtschaftliche Bedeutung des Kunststoffs im Bereich der optischen Anwendungen und der Informationstechnologie. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Promotionsvortrag, 2005
- [6] N.N. Produktinformation Plexiglas Formmasse 6N, Plexiglas Formmasse 7N, Plexiglas Formmasse 8N. Darmstadt: Röhm GmbH & Co. KG, 2001
- [7] N.N. Topas - Cyclic Olefin Copolymers, Optics Applications. Frankfurt a.M.: Ticona GmbH, 2001
- [8] N.N. Technisches Merkblatt Grilamid TR90. Domat/Ems: Ems-Grivory, 2001
- [9] N.N. Anwendungstechnische Informationen (ATI 8013) Makrolon (PC). Leverkusen: Bayer AG, Geschäftsbereich Kunststoffe, 2002
- [10] N.N. Lieferprogramm Formmassen. Darmstadt: Röhm GmbH & Co. KG, 2004
- [11] Oenbrink, G. Innovative Problemlösungen mit transparenten Polyamiden, In: Tagungsumdruck Transparente Kunststoffe, S. D1-D17. SKZ, Würzburg, 2005
- [12] Osswald, T. A., Menges, G. Optical Properties of Polymers. In: Materials Science of Polymers for Engineers, Carl Hanser Verlag, Munich, S. 545-569
- [13] Kirchner, F. Maßgeschneiderte Polymere. Kunststoff Trends (2001) Oktober, S. 18-19
- [14] Klepek, G. Kunststofflinsen. Herstellung - Vergütung - Anwendung in Objektiven. Feinwerktechnik & Messtechnik 96 (1988) 1/2, S. 43-48
- [15] Müller, W., Petzold, S. Optik aus Kunststoff - Möglichkeiten und Grenzen. In: Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Verlag Schiele & Schön, Berlin
- [16] Forster, J. Vergleich der optischen Leistungsfähigkeit spritzgegossener und spritzgeprägter Kunststofflinsen. RWTH Aachen, Dissertation, 2006

- [17] Gärtner, R. Analyse der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile durch Spritzgießen. RWTH Aachen, Dissertation, 2005
- [18] Weck, M., Wenzel, C. Adaptive five Axis Polishing Machine Head. Production Engineering XI (2004) 1, S.95-98
- [19] Brecher, C., Wenzel, C., Lange, S. Kinematic Influences on the Formation of the Footprint During Local Polishing of steel. Production Engineering XIII (2006) 1, S. 23-26
- [20] Timinger, A. Dem Licht auf der Spur. F + M, Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 109 (2001) 9, S. 13-15
- [21] Gold, S. Kunststoffoptik in der Automobilindustrie am Beispiel des Head-up-Displays von SiemensVDO, In: Tagungsumdruck zur Jahrestagung Spritzgießen 2004, S. 457-466. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Baden-Baden, 2004
- [22] Lachmayer, R. Kfz-Beleuchtung im Wandel. Neue Ansprüche - neue Märkte, In: Tagungsumdruck zum Seminar Optik - Schlüsseltechnologie mit Zukunft, S. 5.3-5.25. Fraunhofer IPT, Aachen, 2004

Stichworte:

deutsch:

Optik, Spritzgießen, Spritzprägen, Korrekturpolitur

englisch:

optics, injection moulding, injection-compression moulding

Herausgeber/Editor:

Europa/Europe
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Phone: +49/(0)9131/85 - 29703
Fax.: +49/(0)9131/85 - 29709
E-Mail-Adresse: ehrenstein@ikt.uni-erlangen.de

Amerika/The Americas
Prof. Dr. Tim A. Osswald, responsible
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Phone: +1/608 263 9538
Fax.: +1/608 265 2316
E-Mail-Adresse: osswald@enr.wisc.edu

Verlag/Publisher:

Carl-Hanser-Verlag
Jürgen Harth
Ltg. Online-Services & E-Commerce,
Fachbuchanzeigen und Elektronische Lizenzen
Kolbergerstrasse 22
81679 Muenchen
Tel.: 089/99 830 - 300
Fax: 089/99 830 - 156
E-mail: harth@hanser.de

Beirat/Editorial Board:

Professoren des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik/
Professors of the Scientific Alliance of Polymer Technology