

## Teilprojekt T01

### Titel

Spritzprägen dickwandiger Kunststoffoptiken mit bedarfsgerechter Werkzeugtemperierung unter Berücksichtigung des lokalen Kühlbedarfs

### Projektleitung/-bearbeitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hopmann, Christian (Leitung)  
Gerads, Jonas M.Sc. RWTH (Bearbeitung)  
Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung  
Seffenter Weg 201  
52074 Aachen

### Aufgabenstellung

Ziel des Transferprojekts T01 ist es, die Erkenntnisse der Grundlagenforschung aus B01 anhand eines anwendungsnahen Demonstrators umzusetzen und hierbei grundlegende Verfahrensprinzipien und Prozessansätze für das Spritzprägen dickwandiger optischer Komponenten zu untersuchen. Im Projektjahr 2020 wurde die Methodik weitergehend in Simulationen untersucht und angepasst. Zur volumetrischen Betrachtung dickwandiger Bauteile in der Methodik wurde der Gütebereich, der Bereich den der Algorithmus optimiert, variiert und untersucht. Zur Übertragung der Methodik auf das Spritzprägen wurden Anpassungen an dem Optimierungsbereich, dem umhüllenden Werkzeugbereich, vorgenommen. Durch die bewegliche Werkzeughälfte wird nun eine Kompression der Kunststoffschmelze während der Optimierung ermöglicht. Des Weiteren wurde aufgrund der Kompression die Druckabhängigkeit verschiedener Materialkennwerte betrachtet.

### Vorgehensweise

Zur spannungsarmen Herstellung von dickwandigen Kunststoffoptiken mit Wanddickensprüngen im Spritzprägeverfahren ist es wichtig, dass ein schmelzeförmiger Bereich über dem gesamten Bauteil während der Prägephase vorhanden ist. Daher ist eine Betrachtung des Algorithmus rein auf äußere Bauteilbereiche nicht zielführend und der zu

optimierende Bereich, genannt Gütebereich, anhand dessen die Optimierung Bauteiltemperatur berechnet wird, wurde für innere Bauteilbereiche untersucht. Die gesamte Methodik der inversen Kühlkanalauslegung wurde anschließend an den Spritzprägeprozess angepasst. Dazu wurde eine neue Geometriedefinition des Optimierungsraumes eingeführt, um einen Prägehub in der Optimierungssimulation zu ermöglichen. Bisher wurde in der Methodik ein konstanter Druck innerhalb des Bauteils angenommen, aufgrund der Kompression ändert sich der lokale Druck allerdings. Die Materialeigenschaften von Kunststoffen, wie z. B. die Glasübergangstemperatur, sind nicht nur temperaturabhängig, sondern auch druckabhängig, weshalb der Einfluss des Prägevorgangs auf die entstehende Temperatur- und Dichteverteilung nach Abkühlung unterhalb der Glasübergangstemperatur betrachtet wurde. Hierfür wurden insbesondere der Einfluss der spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit untersucht.

### **Ergebnisse**

Für den Spritzprägeprozess wurde aus der im Teilprojekt B01 entwickelten thermischen Methodik eine thermomechanische Berechnung abgeleitet, um die temperatur- und druckabhängigen Materialeigenschaften berechnen zu können. Durch den Prägevorgang entsteht des Weiteren ein Kontakt zwischen der zu prägenden Kunststoffschmelze und dem Werkzeug. Dieser Kontakt wurde durch die Finalisierung der Geometriedefinitionen in der Software COMSOL Multiphysics® modelliert. Anstatt der vom Programm vorgeschlagenen Standardvereinfachung, in welcher die Geometrie als Formverbund angenommen wird, wurde zur Modellierung einer Mehrkörperphysik die Form als Baugruppe mit Kontaktgrenzen definiert. Diese Einstellung verändert die Diskretisierung der Geometrie und ermöglicht eine neue Definition der Kontaktbedingungen. Im Teilprojekt B01 in der 2. Phase wird der Wärmeübergang des Formverbundes zwischen Kunststoff und Werkzeug über eine dünne Grenzschicht mit Wärmewiderstand modelliert. Bei der thermomechanischen Berechnung wird der Wärmeübergang als thermischer Kontakt über den spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten definiert. Durch diese Annahme wird der Prägevorgang durch den Kontaktdruck in die Modellberechnung miteinbezogen und ermöglicht eine Darstellung der sich ändernden Formteildicke. Neben den Kontaktdefinitionen in der

thermomechanischen Analyse musste auch die Definition des Optimierungsraumes aus der ersten Phase des SFB angepasst werden. Bisher wurde der Optimierungsraum als zusammenhängende Kontur durch eine Minkowski-Summe definiert, die eine Bauteilumhüllende beschreibt. In der Realität weist ein Spritzgießwerkzeug jedoch eine zur Entformung notwendige Trennebene auf, die eine Begrenzung in der Konstruktion der Kühlkanäle darstellt. Im Spritzprägeprozess wird bei nicht ganz geschlossenem Werkzeug eingespritzt, sodass ein Luftspalt in der Trennebene verbleibt. Anschließend schließt die Prägehälfte des Werkzeugs und bringt einen flächigen Druck auf das Formteil auf. Um diese Bewegung und den resultierenden Druckaufbau in der Optimierung zu modellieren, musste der Optimierungsraum in zwei Teile getrennt werden. Des Weiteren wurde die thermomechanische Analyse in COMSOL Multiphysics® im zweidimensionalen Raum umgesetzt. Eine Berechnung in 3D war trotz ausgiebiger Unterstützung und Austausch mit dem Hersteller der Software COMSOL AB nicht möglich. Zur weiteren Anpassung der Methodik für dickwandige Kunststoffformteile im Spritzprägeverfahren wurde das temperatur- und druckabhängige Materialverhalten untersucht. Dabei wurden die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  mittels Spritzprägesimulationen genauer betrachtet, um deren Einfluss auf die Optimierung zu untersuchen.

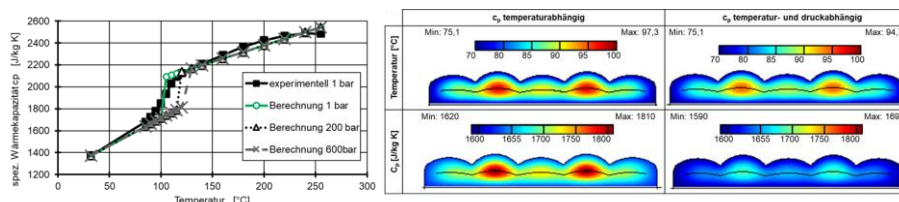


Bild 1: Modell der spezifischen Wärmekapazität und die Temperatur- und Wärmekapazitätsverteilung am Ende der Kühlzeit im Demonstratorbauteil

Es ist bekannt, dass die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  mit Erhöhung der Temperatur stetig zunimmt, jedoch einen sprunghaften Anstieg im Bereich der Glasübergangstemperatur aufweist. Eine Berechnung der spez. Wärmekapazität bei höheren Drücken zeigt die Verschiebung dieses Anstiegs zu höheren Temperaturen (Bild 1, links). Bei der Optimierung zeigt sich, dass sich bei einer vom Glasübergang abhängigen Wärmekapazität am Ende der Kühlzeit ein niedrigerer Wert für  $c_p$  einstellt (siehe Bild 1, rechts). Dies ist darauf zurückzuführen, dass aus der Druckerhöhung aufgrund der Kompression des Bauteils eine höhere Glasübergangstemperatur resultiert. Somit erreichen die Bauteilbereiche hohen Druckes zu einem früheren Prozesszeitpunkt die

sprunghafte Änderung der Wärmekapazität. Eine geringere Wärmekapazität führt zwar dazu, dass weniger Energie abgeführt werden muss, der Energietransport aber aufgrund einer unveränderten Wärmeleitfähigkeit konstant bleibt. Daher stellt sich in den Simulationen eine ähnliche Temperaturverteilung ein. Aus diesem Grund hat eine solche Anpassung keinen Einfluss auf eine inverse Kühlkanalauslegung, welche auf Basis der Temperaturverteilung optimiert wird. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  steigt nach *Dashora et al.* und *Hsieh et al.* mit steigender Temperatur an, erreicht ihr Maximum beim Glasübergang und sinkt bei weiterer Temperaturerhöhung wieder ab. Zusätzlich wird der Verlauf mit steigendem Druck zu höheren Werten verschoben (Bild 2, links). Zur temperatur- und druckabhängigen Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit wurde ein kombiniertes Modell nach *Dashora et al.* und *Hsieh et al.* entwickelt. Bei der Optimierungsberechnung in COMSOL Multiphysics zeigt sich eine geringe Temperaturverteilung bei Berücksichtigung der druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit. Insbesondere im Bereich der Masseanhäufungen konnte eine Differenz zwischen den Maximaltemperaturen gezeigt werden (Differenz von 18,3 °C). Dabei stellte sich auch heraus, dass die Abkühlung des Bauteils signifikant schneller und die Erstarrung früher eintritt (ca. 50 s) als bei einer rein temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit.

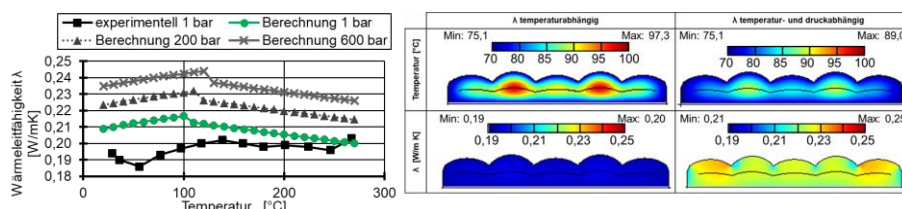


Bild 2: Verläufe des Wärmeleitfähigkeitsmodells und Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsverteilung am Ende der Kühlzeit im

Zur Bewertung der für dickwandige Optiken notwendigen Anpassung der in Teilprojekt B01 entwickelten Routine wurden drei Berechnungen einer Abkühlsimulation des Demonstrators mit umhüllendem Werkzeug durchgeführt. Eine Abkühlberechnung mit den ursprünglichen Annahmen zum Formverbund, eine Berechnung mit spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten und eine Abkühlung mit separiertem Optimierungsraum und spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten. Im Anschluss wurde der separierte Optimierungsraum mit dem mid-plane Ansatz als geeignetster Qualitätsbereich und der druckabhängigen Glastemperatur und Wärmeleitfähigkeit kombiniert und die Gütefunktion weiter angepasst. Neben der Originalformulierung des Zielfunktionals wurden zwei weitere Zielfunktionale definiert und analysiert. Dabei

wurden mehrere mögliche Fälle untersucht: das ursprünglichen Zielfunktional aus Phase 1 (Tabelle 1, Fall 1), die Homogenität der Temperatur auf der Mittelfläche, die möglichst nah an der Glasübergangstemperatur angestrebt wird, wodurch in allen Bereichen der Optik die Schmelze zum gleichen Zeitpunkt erstarrt und eine homogene Dichteverteilung auf der Mittelfläche zur Schwindungs- und Verzugsminimierung erreicht wird, wie im Ansatz von Projekt B01 (1. Phase) (Fall 2) sowie ein Zielfunktional, welches eine Mittelflächentemperatur möglichst nah am Glasübergang und eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur anstrebt, um das Einbringen von Eigenspannungen zu verhindern (Fall 3). Da die Gütefunktionen einheitenlos und auf den Faktor 1 skaliert werden sollten, wurden die Terme der einzelnen Funktionen normiert.

Fall	Bezeichnung	Gütefunktion
1	Projekt B01 (1. Phase) (Entformungstemperatur und Dichte)	$G(T_K) = \sum_{i=1}^m \int_0^{t_{\text{Ende}}} \left( \frac{T_{\text{Ent}} - T_{AF}(x_i, t; T_K)}{T_{\text{Ent}}} \right)^2 dt$ $+ \sum_{j=1}^k \int_0^{t_{\text{Ende}}} \left( \frac{\rho_{AF_i} - \rho_{AF_i}(x_j, t; T_K)}{\rho_{AF_i}} \right)^2 dt$
2	T <sub>g</sub> und Dichte	$G(T_K)_{t_{\text{Ende}}} = \sum_{i=1}^n \int_{A_{Fi}} \left( \frac{T_{g,i}(p) - T_i}{T_{g,i}(p)} \right)^2 dA_{Fi}$ $+ \int_{A_{Fi}} \left( \frac{\rho_i(T, p) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \right)^2 dA_{Fi}$
3	T <sub>g</sub> und Randtemperatur	$G(T_K)_{t_{\text{Ende}}} = \sum_{i=1}^n \int_{A_{Fi}} \left( \frac{T_{g,i}(p) - T_i}{T_{g,i}(p)} \right)^2 dA_{Fi} + \int_{A_F} \left( \frac{T - T_i}{\bar{T}} \right)^2 dA_F$

Tabelle 1: Untersuchte Gütefunktionen

In Bild 3, links sind die Temperaturverteilungen des Demonstrators der drei Zielfunktionale nach der Optimierung abgebildet. Die Temperaturverteilungen des Falls 2, welcher ausschließlich auf die Mittelfläche bezogen wurde, weist einen konstanten Gradienten der Temperatur auf. Die Oberseite des Bauteiles ist stark unterkühlt (~2 °C), während die Unterseite der Linse mit ~150°C eine hohe Temperatur zeigt. Dadurch wurde zwar die Gütefunktion erfüllt, aber eine Kühlung des Formteils unterhalb der Glasübergangstemperatur (~113 °C) kann damit nicht erreicht werden. Die Zielfunktionale, welche neben der Mittelfläche auch den Außenrand des Formteils AF mit in die Optimierung einbeziehen (Fall 1 und Fall 3), weisen dagegen eine zu erwartende Verteilung der Temperatur über das Bauteil auf. Die Optimierung nach Zielfunktional 3 weist ein ähnliches Ergebnis auf, das sich lediglich durch die maximale und minimale Temperatur unterscheidet. Die Simulationen wurden mit einer Anfangstemperatur von 240 °C von der

Kunststoffschmelze und 75 °C vom Werkzeugstahl bei einer Prozesszeit von 362 s durchgeführt.

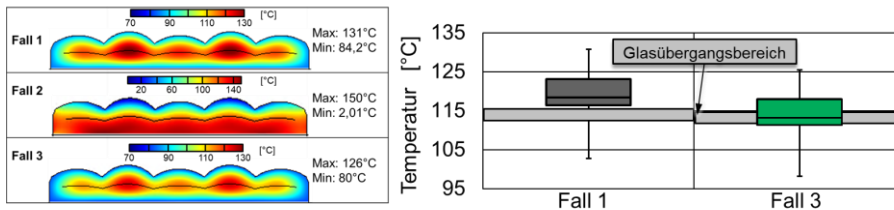


Bild 3: Temperaturverteilungen der verschiedenen Zielfunktionale am Ende der Kühlzeit

Bei genauerer Betrachtung der Temperaturverteilungen der Mittelflächen im letzten Zeitschritt (Bild 3, rechts) zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Temperatur im Bauteil. Für die Optimierung, die im Projekt B01 der 1. Phase entwickelt wurde, liegt eine Temperaturverteilung der Mittelfläche vor, bei der 75% der Datenpunkte oberhalb des Bereiches der Glasübergangstemperaturen liegen. Das Zielfunktional strebt die Entformungstemperatur auf der Bauteilaußenfläche und eine möglichst gleichmäßige Dichte auf der Mittelfläche des Formteils an. Die im Transferprojekt T01 neu definierte Zielfunktion hingegen fordert eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur bei einer Glasübergangstemperatur in der Bauteilmitte und führt bezüglich des Demonstrators, einer Kunststoffoptik mit Wanddickensprüngen zu besseren optischen Ergebnissen bzgl. der Doppelbrechung beim Erreichen der Glasübergangstemperatur über das gesamte Bauteil. Dadurch ist anzunehmen, dass weniger Einfallstellen aufgrund von Schmelzeinseln am Ende der Kühlzeit entstehen werden.

Des Weiteren wurde auch das Konvergenzverhalten der beiden Zielfunktionale über die Berechnungsiterationen der Optimierung betrachtet (Bild 4). In den Diagrammen sind die jeweiligen Werte der Objektiv der Optimierung dargestellt. Die Objektiv sind die Werte der berechneten Gütefunktionen, welche nach den jeweiligen Zielen einzeln und summiert betrachtet wurden. Die Werte der Objektiv sind logarithmisch auf der y-Skala aufgetragen. Die Optimierung wurde nach den folgenden Kriterien gestoppt: Das lokale Optimum kann nicht weiter verbessert werden, die maximale Anzahl der vom Nutzer vorgegebenen Iterationen wurde erreicht (max. 2000) oder die vorgegebene Optimalitätstoleranz ( $1E-10$ ) wurde erreicht. Bei Betrachtung der jeweiligen Verläufe ist zu erkennen, dass das

Objektiv vom Teilprojekt B01 (1. Phase) (Fall 1) nach etwa 30 Iterationen konvergiert. Das Objektiv des Zielfunktional für den Glasübergang und die homogene Randtemperatur (Fall 3) weist im Allgemeinen geringere Objektivwerte als das Zielfunktional auf. Zusätzlich erreichte das Objektiv schon 30 % früher bei ca. 20 Iterationen die Optimalitätstoleranz. Das Objektiv des Zielfunktional für den Glasübergang und die Randtemperatur weist im Allgemeinen geringere Objektivwerte als das Zielfunktional nach Projekt B01 (1. Phase) auf. Zusätzlich fluktuiert das Objektiv für einige Iterationen, fängt sich jedoch wieder in einem lokalen Optimum und erreicht noch vor 30 Iterationen die Optimalitätstoleranz, was auf ein globales Optimum deutet.

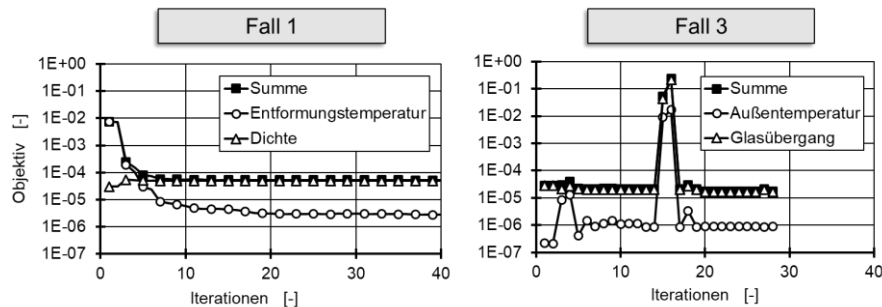


Bild 4: Konvergenzverhalten des Objektivs über die Optimierungsiterationen

Für die reduzierte Kunststoffoptik (Bild 1) konnte mittels COMSOL Multiphysics eine optimierte Temperaturverteilung berechnet werden und in Kühlkanäle umgesetzt werden. Diese wurden anschließend in einem am IKV bestehenden Werkzeug praktisch umgesetzt. Dabei wurde ein federgelagerter Prägerahmen um den optischen Einsatz konstruiert. Der optische Einsatz auf der schließseitigen Werkzeughälfte wurde vom Lehrstuhl Digital Additive Production DAP (Teilprojekt A11) additiv gefertigt und ermöglicht die Realisierung der optimierten Kühlkanalauslegung (Bild 5). Aufgrund der Anpassungen in der Kühlkanalauslegung an das bestehende Werkzeug wurde die optimierte Kühlkanalgeometrie nur einseitig realisiert und auf der gegenüberliegenden Bauteilseite, die mit keinen Wändickensprüngen behaftet ist, wurde ein klassisches Kühlkanalsystem gefertigt.

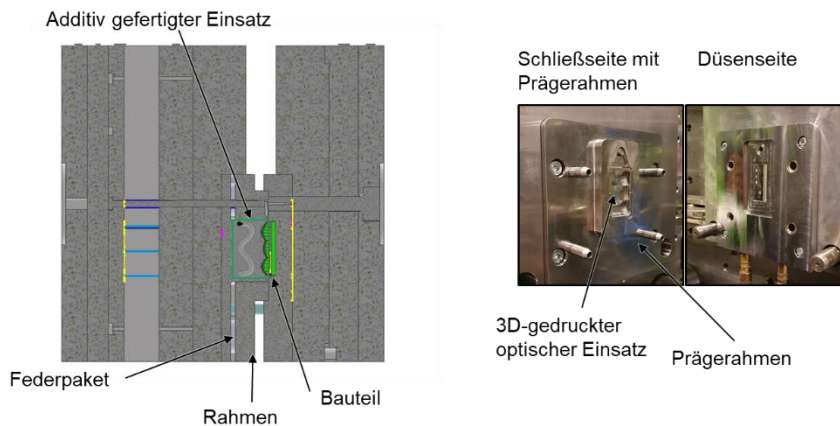


Bild 5: Werkzeugkonstruktion und montiertes Werkzeug in der Spritzgießmaschine

Die Spritzgießversuche wurden auf einer vollelektrischen Spritzgießmaschine vom Typ Engel e-motion 440/160, der Firma ENGEL Austria GmbH durchgeführt. Dabei wurde ebenso wie in den Simulationen zur Optimierung ein Prägehub von 1,5 mm und eine Prozesszeit von 360 Sekunden eingestellt.

Mittels der Auslegung in COMSOL wurde die Isotherme im Werkzeug für 80 °C ausgewählt, jedoch wird in dem Versuchsplan die Werkzeugtemperierung variiert, um den Einfluss der Kühlung betrachten zu können. In Bild 6 der am IKV gefertigte Demonstrator abgebildet und die Ergebnisse der Oberflächenmessung beispielhaft für einen Versuchspunkt in Differenz zum Einsatz dargestellt. Hierbei wurde eine Linienmessung mittels Weißlicht-Chromatographie in der Bauteilmitte vorgenommen. Die Prozessparameter zur Herstellung des Bauteils sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Prozessparameter	Wert	Einheit
Prägedruck über Schließkraft	150	kN
Nachdruckzeit	5	s
Prägezeit	3	s
Einspritzgeschwindigkeit	10	cm <sup>3</sup> /s
Werkzeugtemperierung	65	°C

Tabelle 2: Untersuchte Prozessparameter für den gezeigten Demonstrator



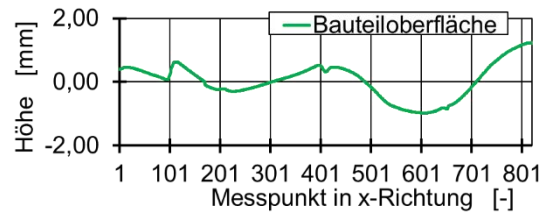


Bild 6: Abbildung des Demonstrators und einer Oberflächenmessung

Die Grafik zeigt die auf die CAD-Daten bezogene Vergleichsmessung. Es ist zu erkennen, dass die Abformung nicht der Einsatzoberfläche entspricht, was an den konstruktiven Änderungen zur Einpassung in ein bestehendes Werkzeug liegen kann. Die optimierte Kühlkanalgeometrie konnte bei der Einpassung in ein bestehendes Spritzgießwerkzeug nur einseitig realisiert werden und auf der anderen Seite wurde ein klassisches Kühlkanalsystem realisiert. Bei einer Werkzeugkonstruktion, die die Realisierung der optimierten Kühlkanalgeometrie verfolgt, sollte die Abformgenauigkeit deutlich gesteigert werden können. Des Weiteren wurden die Spritzgießparameter verwendet, die in den zuvor durchgeführten Simulationen in COMSOL verwendet wurden. Diese Software ist als Multiphysiksoftware vielseitig einsetzbar, jedoch werden hierbei der Spritzgießprozess und dessen Parameter nicht optimiert.

### Zusammenfassung

In dem Transferprojekt T01 konnte die bestehende Optimierung für dickwandige Kunststoffoptiken angepasst und um temperatur- und druckabhängigen Materialeigenschaften in der Simulationsumgebung erweitert werden. Dies wurde zur inversen Kühlkanalauslegung für einen industrienahen Demonstrator verwendet, die in einem Werkzeug praktisch umgesetzt werden konnte. Die dabei notwendigen Anpassungen an dem optimierten Kühlkanaldesign können ein Grund für die Abweichungen in der Oberflächenmessung darstellen. Des Weiteren wurde das Vorgehen zur inversen Auslegung der bedarfsgerechten Werkzeugtemperierung von dickwandigen Kunststoffoptiken im Spritzgießverfahren unter Berücksichtigung des lokalen Kühlbedarfs zur Übertragung in die Industrie in einem Leitfaden zusammengefasst.

### Veröffentlichungen

HOPMANN, CH., J. GERADS, T. HOHLWECK, 2021. Investigation of an inverse thermal injection mould design methodology in dependence of the part geometry. In *International journal of material forming* 14, S. 309-321 DOI: 10.1007/s12289-020-01604-6

GERADS, J., T. HOHLWECK, CH. HOPMANN, 2020. Inverse thermal mould design for complex injection compression moulded optical parts. In *Proceedings of 30th International Colloquium Plastics Technology*. Aachen, 2020. ISBN: 978-3-8440-6892-4

HOPMANN, CH.; GERADS, J., 2020 Reduction of internal stresses in optics through a demand-oriented cooling channel layout in injection moulding. In *Proceedings of the First International Joint Conference on Enhanced Material and Part Optimization and Process Intensification*, Aachen, EMPORIA. ISBN: 978-3-030-70331-8