

## 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 T1 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

In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B01 wurden unterschiedliche Bauteilgeometrien, ein dünnwandiges mit Rippen versehenes Kästchen (Bauteildicke  $d \leq 2$  mm), eine bikonvexe Linse ( $d \leq 6$  mm) und eine mit großen Wanddickenunterschieden behaftete Linse ( $d \leq 15$  mm) mit verschiedenen Gütebereichen (Bild 1) untersucht. Dabei ist der 2D Ansatz an der bestehenden Methodik angelehnt und der 3D Ansatz betrachtet das gesamte Volumen, das vom 2D Bereich umschlossen wird. Da dies aber zu einem hohen Rechenaufwand führt und der Glasübergang bei optimaler Temperierung über dem gesamten Bauteil zum gleichen Zeitpunkt erfolgen sollte, wurde der mid-plane Ansatz entwickelt. Dieser Gütebereich liegt äquidistant zu der oberen und unteren Bauteiloberfläche.

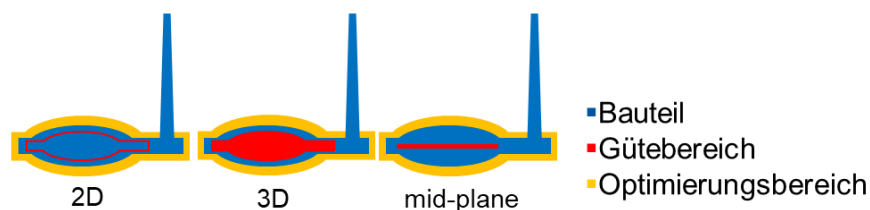


Bild 1: Verschiedene Ansätze des Gütebereichs am Beispiel der bikonvexen Linse

Bild 2 zeigt die berechnete Durchschnittstemperatur der Bauteilmittellebene für die verschiedenen Bauteilgeometrien und Gütebereiche zum Zeitpunkt der Entformung. Für die bikonvexe Linse liefert der mid-plane Ansatz die niedrigste Durchschnittstemperatur bei hohen Standardabweichungen. Dies liegt an einer starken Abkühlung der Randbereiche der Linse. Bei komplexeren dickwandigen Bauteilen mit Wanddickensprüngen liefert der mid-plane Ansatz ebenso gute Ergebnisse bezüglich der Durchschnittstemperatur und eine geringe Standardabweichung und somit eine homogene Temperaturverteilung im Bauteil. Zum Vergleich sind die Ergebnisse eines dünnwandigen Bauteils in Bild 2 zusätzlich dargestellt. Im Gegensatz zu dickwandigen Bauteilen führt der mid-plane Ansatz zu hohen Durchschnittstemperaturen.

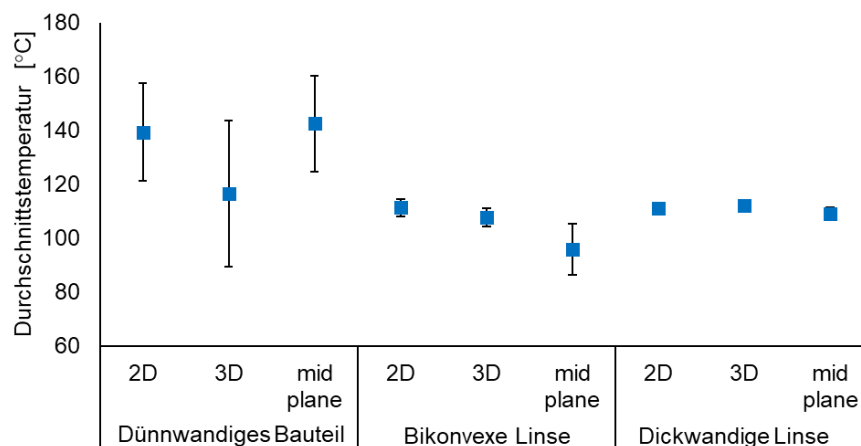


Bild 2: Mittlere Temperatur in der Mittelebene der Bauteile nach der Optimierung

Die Dicke des Bauteils hat einen entscheidenden Einfluss darauf, welcher Gütebereich zu wählen ist, um eine homogene Temperaturverteilung zu erzielen. Basierend auf dieser Erkenntnis müssen Bauteile im Hinblick auf den zu wählenden Qualitätsbereich analysiert werden, bevor mit der thermischen Optimierung begonnen wird.

Im nächsten Schritt wurde die Methodik auf das Verfahren Spritzprägen angepasst. In Bild 3 sind die zur Anpassung untersuchten Zielfunktionale mit den Geltungsbereichen sowie die Anpassung des Optimierungsbereichs aufgezeigt. Zum Vergleich ist die bestehende Methodik nach Nikoleizig mit der Temperaturoptimierung auf der Bauteilaußenfläche ( $A_F$ ) bezogen auf die Entformungstemperatur und der Dichteoptimierung auf der Bauteilinnenfläche ( $A_{Fi}$ ) dargestellt. Beim mid-plane Ansatz wird die Temperatur bezogen auf die

Glasübergangstemperatur und die Dichte auf der Bauteilinnenfläche optimiert. Das Dritte Zielfunktional betrachtet anstatt einer homogenen Dichte auf der Innenfläche eine homogene Temperatur auf der Bauteilaußenfläche.

Des Weiteren wurde eine Trennebene im Optimierungsraum des mid-plane Ansatzes eingeführt. Aufgrund der Trennung des Optimierungsbereichs mussten zusätzlich neue Kontaktbedingungen zwischen Kunststoff und Stahl definiert werden. Der Wärmeübergang wird nicht mehr über einen Wärmewiderstand in einer Grenzschicht definiert, sondern mittels des druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha^*(p)$  berechnet. Der mid-plane Ansatz (in der Mitte in Bild 3 dargestellt) führt dazu, dass eine homogene Temperaturverteilung am Ende der Kühlzeit auf dem Gütebereich  $A_{Fi}$  vorliegt, jedoch konnte dieses Ergebnis nur durch sehr hohe Temperaturen von über 140 °C an der Bauteilunterseite erreicht werden. Dies konnte durch eine zusätzliche Randbedingung auf der Bauteilaußenfläche verhindert und dadurch eine optimierte Abkühlung erreicht werden.

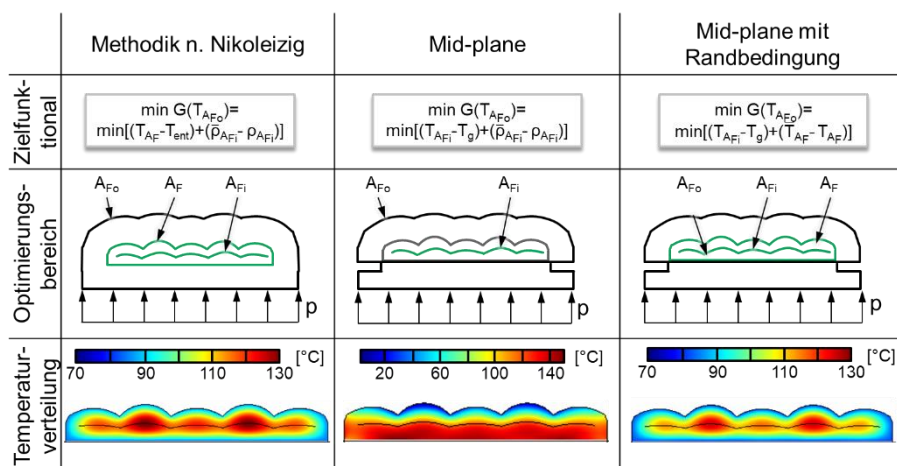


Bild 3: Temperaturverteilungen im Bauteil zum Entformungszeitpunkt der verschiedenen Zielfunktionale und Optimierungsbereiche

Des Weiteren konnte in den Untersuchungen gezeigt werden, dass eine Optimierung mittels des Zielfunctionals bezogen auf die druckabhängige Glasübergangstemperatur beim Spritzprägen ausreichend ist.

Bisher wurde lediglich das spezifische Volumen mithilfe des Tait Modells druck- und temperaturabhängig betrachtet. Dabei wurde ein über dem gesamten Bauteil konstant verteilter Druck angenommen, der über der Zeit abfällt. Durch die Kompression

beim Prägeprozess ändert sich der Druck innerhalb des Bauteils lokal und dadurch muss eine Betrachtung der Materialkennwerte durchgeführt werden. In Bild 4 sind die simulativen Ergebnisse bei einer temperatur- und druckabhängig modellierten Wärmekapazität  $c_p$  dargestellt. Bei Optimierung mittels druckabhängiger Wärmekapazität führt dies zu einer deutlich niedrigeren Wärmekapazität am Ende der Kühlzeit, da die Kompression des Bauteils von 1 mm und die damit einhergehende Druckerhöhung zu einer höheren Glasübergangstemperatur führt. Somit erreichen die Bauteilbereiche hohen Drucks zu einem früheren Prozesszeitpunkt die Glasübergangstemperatur und an dieser Temperatur liegt eine sprunghafte Änderung der Wärmekapazität vor. Jedoch zeigt sich trotz der deutlichen Druckabhängigkeit nur ein sehr geringer Einfluss der Wärmekapazität auf die zu optimierende Temperaturverteilung und Dichteverteilung im Bauteil und hat daher keinen signifikanten Einfluss auf die Kühlkanalauslegung.

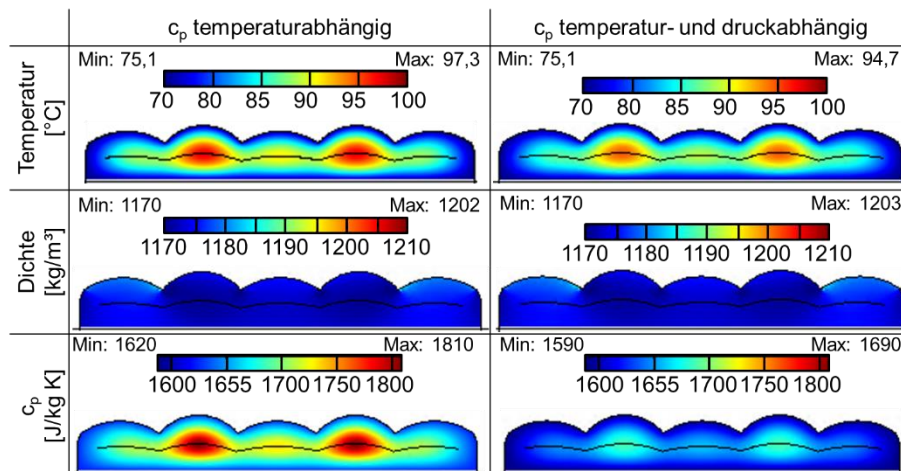


Bild 4: Temperatur-, Dichte- und Wärmekapazitätsverteilung für eine temperatur- und druckabhängig modellierte Wärmekapazität  $c_p$

In Bild 5 sind die Temperatur-, Dichte- und Wärmeleitfähigkeitsverläufe am Ende der Kühlzeit des Spritzprägeprozesses dargestellt. Links sind die Ergebnisse für eine Wärmeleitfähigkeit aufgezeigt, welche anhand der temperaturabhängigen experimentellen Daten bestimmt wurde. Rechts sind die Ergebnisse anhand eines kombinierten Modells für Temperatur- und Druckabhängigkeit dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit wird mittels einer druckabhängigen Verschiebung modelliert. Trotz ähnlicher Werte zum Zyklusbeginn tritt durch die Kompressionsphase eine bis zum Ende der Kühlzeit in Bild 5 erkennbare große Differenz

zwischen den berechneten Wärmeleitfähigkeiten ein. Bei einer druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit liegt zum Ende des Prozesses eine signifikant homogenere Temperaturverteilung vor als bei einer rein temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit.

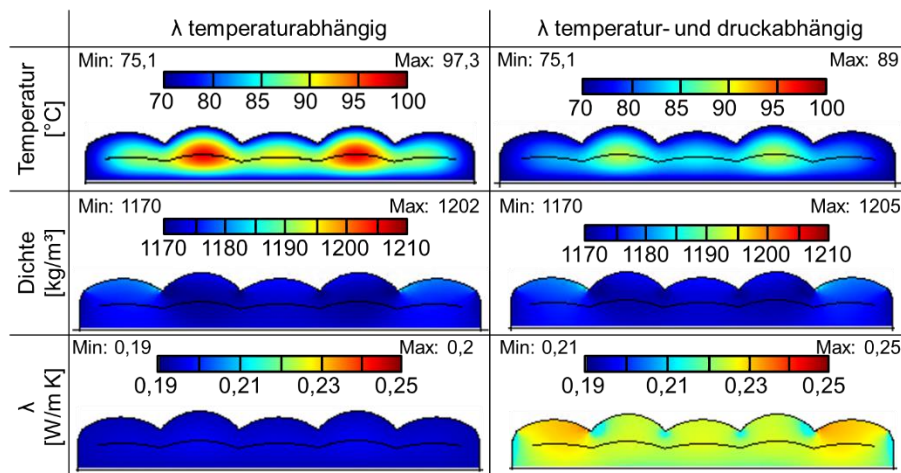


Bild 5: Temperatur-, Dichte- und Wärmekapazitätsverteilung für eine temperatur- und druckabhängig modellierten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$

Anhand der Ergebnisse der Optimierungen wurden anschließend ein Kühlkanalsystem aus dem Ergebnis des Zielfunktional mid-plane mit Randbedingungen abgeleitet und in Spritzprägesimulationen validiert. Die Ergebnisse des Optimierungstool COMSOL Multiphysics® und der Spritzprägesimulationssoftware Moldex3D sind in Bild 6 dargestellt. Dabei wurden zum Vergleich Simulationen mit einer ideal temperierten Werkzeugumhüllenden durchgeführt. In COMSOL Multiphysics® ist die Temperaturverteilung insgesamt zu höheren Werten verschoben, die Temperaturverteilung entspricht aber qualitativ den Ergebnissen aus Moldex3D. Dadurch sollte ein abgeleitetes Kühlkanalsystem zu einer homogenen Temperaturverteilung in praktischen Versuchen führen.

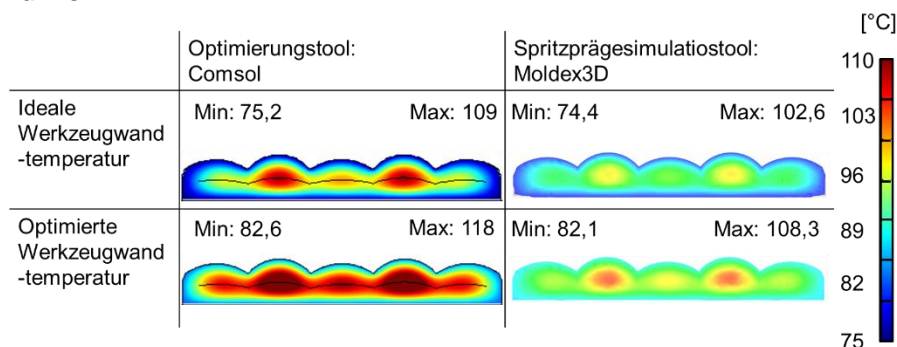


Bild 6: Temperaturverteilungen COMSOL Multiphysics® und Moldex3D am Ende der Kühlzeit

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Methodik wurde mittels Trennebene und neuen Kontaktbedingungen auf das Spritzprägeverfahren angepasst und übertragen. Des Weiteren wurden temperatur- und druckabhängige Materialkennwerte in die Optimierung implementiert und deren Einfluss untersucht. Die Wärmeleitfähigkeit zeigt im Gegensatz zur Wärmekapazität einen signifikanten Einfluss auf die im Bauteil resultierende Temperaturverteilung. Der Algorithmus zur Optimierung und der zu betrachtende Gütebereich wurden grundlegend untersucht und verbessert. Das Vorgehen wurde direkt an der mit Wanddickensprüngen versehenen Demonstratorgeometrie durchgeführt. Eine Anpassung eines bestehenden Werkzeugs zur praktischen Validierung befindet sich zurzeit in der Konstruktion und Fertigung. Mit dieser und den gefertigten optischen Werkzeugeinsätzen werden anschließend die simulativen Ergebnisse praktisch validiert.

## Veröffentlichungen

Hopmann, Ch.; Kech, A.; Hohlweck, T.; Gerads, J.; Alms, J.: Increasing precision in injection moulding by controlled solidification. In Hopmann, Ch. (Hrsg.): *30<sup>th</sup> International Colloquium Plastics Technology*. Düren: Shaker Verlag, 2020