

SFB 1120

Jahresbericht 2021



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Teilprojekt B3

Titel

Selbstoptimierende Prozessregelungsstrategien für eine hochsegmentierte Werkzeugtemperierung beim Spritzgießen

Projektleitung/-bearbeitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hopmann, Christian (Leitung)
M.Sc. Kahve, Cemi Emre (Bearbeitung)
Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung
Seffenter Weg 201
52074 Aachen

Aufgabenstellung

Ziel des Teilprojektes B3 ist es, den Verzug von Spritzgießformteilen durch die Homogenisierung des globalen spezifischen Volumens im Prozess zu minimieren. Hierzu wurde ein Spritzgießwerkzeug mit einer hochsegmentierten dynamischen Werkzeugtemperierung entwickelt und eine komplexe Anlagentechnik zur Regelung der Temperierzonen entwickelt. Zunächst wurde die Prozessführung der einzelnen Temperierzonen mittels eines klassischen PID-Reglers analysiert.

Zur Steigerung der Regelungsgüte wurde zudem im Projektjahr 2018 eine modellprädiktive Regelungsstrategie (MPC) entwickelt, die auf Basis einer diskretisierten eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung die Prädiktion von Werkzeug- und Formteilmperatur ermöglicht. Auf dieser Basis soll eine präzise Beherrschung des Schmelzprozesses realisiert werden.

Im Bearbeitungsjahr 2021 war die Validierung und Optimierung der Prädiktionsgrößen Temperatur und spezifisches Volumen ein wichtiges Teilziel, da diese Größen direkt mit der finalen Bauteilqualität korrelieren.

Weiterhin sollten erste Ansätze zur Entwicklung von selbstoptimierenden Strategien entwickelt werden, die es erlauben bis zum Ende der zweiten Förderperiode den Verzug der plattenförmigen Bauteilgeometrie zyklusübergreifend zu reduzieren.

Vorgehensweise

Eine direkte Messung des Temperaturprofils über der Bauteildicke ist während des Spritzgießprozesses nicht möglich. Daher wurde zur Validierung und Optimierung der Temperaturprädiktion ein simulationsgestützter Ansatz verfolgt (Abb. 1).

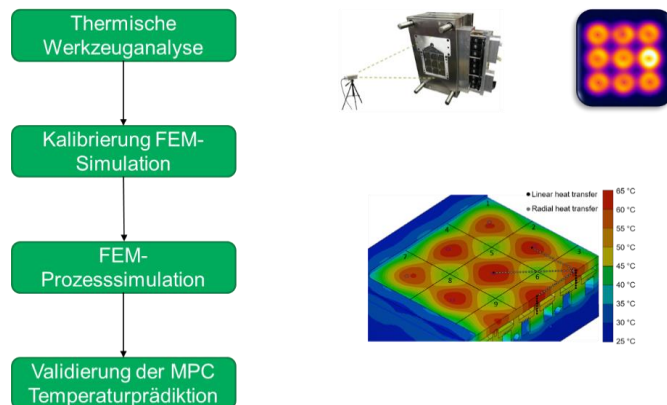


Abbildung 1: Schematische Vorgehensweise bei der Validierung und Kalibrierung der MPC Temperaturprädiktion.

Hierzu wurde zunächst das Systemverhalten mit einer Thermographiekamera quantifiziert. Anschließend wurde ein FEM-Spritzgießsimulationsmodell in Moldex3D aufgebaut und in rein thermischen Simulationen kalibriert. Anschließend wurde eine vollständige Prozesssimulation (Füllen, Nachdruck, Abkühlen) durchgeführt und die resultierenden Temperaturen exportiert. Die Temperaturen des MPC-Prädiktionsmodells (FDM) wurden anschließend mit den exportierten Temperaturen aus der FEM-Prozesssimulation verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs wurde das FDM-Modell kalibriert.

Die Vorhersagegenauigkeit des spezifischen Volumens hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Regelungspräzision. So ist bekannt, dass neben Druck und Temperatur die Kühlrate das spezifische Volumen beeinflusst. Daher wurden in vorangegangenen Jahren in Kooperation mit Teilprojekten B04 und B01 auf Basis von existierenden empirischen pvT-Modellen von Schmidt und Tait neue pvT-Modelle entwickelt, und in den modellprädiktiven Regler implementiert, um eine präzise Prädiktion und somit eine präzisere Beherrschung der Schmelze zu erreichen. Die Ermittlung der für die neuen pvT-Modelle

notwendigen Koeffizienten erfolgte mithilfe der pVT-Messzelle PVT 500, GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen unter sowohl isobaren als auch isothermen Randbedingungen. Die Validierung der auf diese Weise vollständig beschriebenen pVT-Modelle wurde mithilfe des hochsegmentierten Spritzgießwerkzeugs durchgeführt. Durch eine zusätzliche Erweiterung des MPC-Ansatzes um ein Modell zur Berechnung des Temperaturverlaufes außerhalb des Werkzeugs konnte die Dichte des Bauteils bei Umgebungsbedingungen vorhergesagt werden. Die lokale Dichte der produzierten Probekörper an den prädierten Sensorpositionen wurde mittels eines Gaspyknometers AccuPyc 1330, Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, USA vermessen und mit der jeweiligen Prädiktion des pVT-Modells verglichen. Insgesamt wurden verschiedene praktische Versuchsreihen durchgeführt, in denen die Kühlrate variiert worden ist. Neben verschiedenen dynamischen Heizleistungen wurden Versuchsreihen mit jeweils 30 °C und 80 °C Grundtemperierung für das Material Polypropylen durchgeführt.

Ergebnisse

Im Rahmen der Optimierung der Temperaturprädiktion wurde das Temperaturprofil resultierend aus der FEM-Prozesssimulation mit der FDM-Prädiktion verglichen.

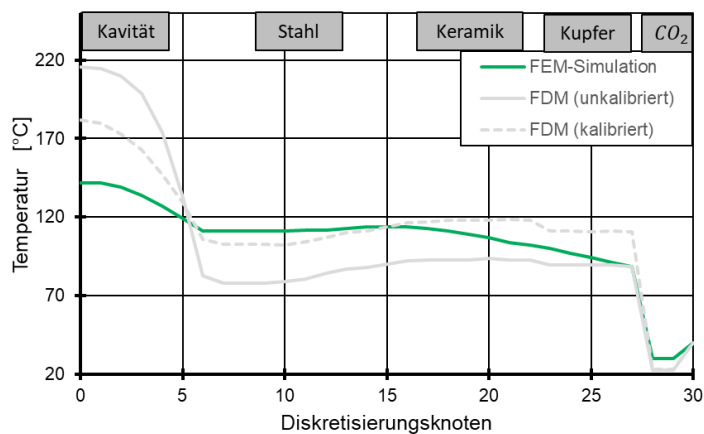


Abbildung 2: Vergleich von FEM-Spritzgießsimulation und FDM-Temperaturprädiktion vor Kalibrierung (links) und nach Kalibrierung (rechts) bei 16 s.

Abbildung 2, links zeigt für die Prozesszeit von 16 s große Unterschiede zwischen FEM und FDM. Insbesondere innerhalb der Kavität liegt eine maximale Abweichung von über 70 °C vor. Um die Präzision der FDM-Prädiktion zu erhöhen, wurden anschließend Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Materialgrenzen und Materialeigenschaften iterativ angepasst. Durch diese Anpassungen im Modell konnte der Fehler zwischen FEM und FDM um ca. 60 % reduziert werden. Der maximale Fehler liegt weiterhin innerhalb der Kavität.

Wie bereits erwähnt, ist die Berechnung des spezifischen Volumens ein weiterer wichtiger Faktor für eine präzise Regelung. Daher wurde die Prädiktion des spezifischen Volumens im Prozess mittels Dichtemessungen validiert. Die Dichtemessungen der realen Probekörper ergaben, dass für die Versuchsreihen mit 80 °C Grundtemperierung niedrigere spezifische Volumina aufgrund von Kristallisationsprozessen, aber auch durch eine verringerte Viskosität und bessere Nachdruckwirkung resultieren als bei 30 °C Werkzeugtemperatur.

Für die Prädiktion des spezifischen Volumens bei Umgebungsbedingungen wurden zwei Kühlraten ausgewählt: Eine dynamische Kühlrate, die aus der aktuell vorherrschenden Temperatur ermittelt wird, sowie eine konstante Kühlrate, die zum jeweiligen Kristallisationszeitpunkt korreliert. Abbildung 3 zeigt, dass die verwendete Kühlrate die Prädiktion entscheidend beeinflusst.

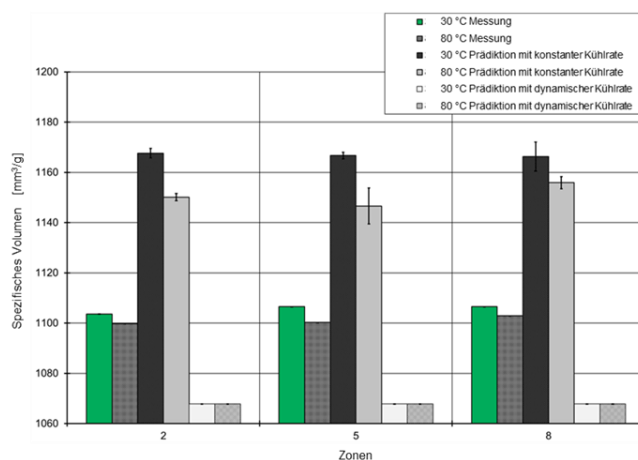


Abbildung 3: Vergleich gemessener und mittels des kühlratenabhängigen Tait-Modells prädizierter spezifischer Volumina mit konstanter und dynamischer Kühlrate.

Formatiert: Block

Für die dynamische Kühlrate können keine Unterschiede in der Prädiktion zwischen beiden Prozesspunkten festgestellt werden. Dies ist damit zu begründen, dass in der Versuchsreihe das finale spezifische Volumen bei Umgebungsbedingungen prädiziert wird. Unabhängig von der Ausgangstemperatur oder der Werkzeugtemperatur kühlt der Kunststoff nach genügend Zeit auf Umgebungstemperatur ab. Dabei sinkt die Kühlrate asymptotisch auf null. Bei der dynamischen Kühlrate wird die aktuell vorherrschende Kühlrate verwendet welche bei Abkühlung auf Umgebungstemperatur für beide Prozesspunkte (30 °C und 80 °C Werkzeugtemperatur) ungefähr bei 0 K/s ist. Daher resultiert für die Prädiktion mit der dynamischen Kühlrate kein Unterschied im spezifischen Volumen, wie es in den Dichtemessungen zu sehen ist. Verglichen mit den Dichtemessungen wird ein signifikant geringeres spezifisches Volumen vorhergesagt, da bei einer Kühlrate von 0 K/s der höchste Kristallisationsgrad erwartet wird.

Formatiert: Block

Da mittels der dynamischen Kühlrate das Materialverhalten im Prozess (Abnahme des spez. Volumens bei geringeren Kühlraten) nicht korrekt beschrieben werden kann, wurde ein alternativer Ansatz ausgewählt. Dabei wird eine konstante Kühlrate aus dem jeweiligen Kristallisationszeitpunkt für die Prädiktion des finalen spezifischen Volumens verwendet. Der Vorteil ist hierbei, dass Unterschiede in der Kühlrate während des Prozesses in die Prädiktion des spezifischen Volumens bei Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Weiterhin beeinflusst die Kühlrate am Kristallisationszeitpunkt den Kristallisationsgrad und damit das spezifische Volumen entscheidend. In Abb. 3 ist zu erkennen, dass zunächst deutlich höhere spezifische Volumina resultieren als bei der dynamischen Kühlrate. Dies liegt daran, dass die Kühlrate zum Kristallisationszeitpunkt vergleichsweise hoch ist, wodurch insgesamt ein geringerer Kristallisationsgrad und somit ein höheres spezifisches Volumen resultiert. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass die Kühlratenunterschiede am Kristallisationszeitpunkt das reale Materialverhalten deutlich besser abbilden, wo analog zur Dichtemessung geringere spezifische Volumina bei höheren Werkzeugtemperaturen resultieren.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Prädiktion von Temperatur und spezifischem Volumen sind für die Regelungsgüte entscheidend, weshalb hierfür eine Kalibrierung bzw. Validierung angegangen wurde.

Da eine direkte Messung der Formteilmtemperatur während des Prozesses nicht möglich ist, wurde ein indirekter simulationsgestützter Ansatz zur Validierung des FDM-Prädiktionsmodells entwickelt. Mithilfe des simulationsgestützten Ansatzes konnte das FDM-Prädiktionsmodell kalibriert und der Fehler von 70 °C auf 30 °C reduziert werden. Dennoch ist eine weitere Verbesserung der Präzision notwendig. Dies soll beispielsweise durch mehrdimensionale Temperaturberechnungen, sowie temperaturabhängige Materialdaten erreicht werden.

Die in den vorangegangenen Jahren entwickelten kühlratenabhängigen pvT-Modelle wurden in den MPC-Ansatz implementiert und im Rahmen mehrerer Versuchsreihen validiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Auswahl der Kühlrate einen entscheidenden Einfluss auf das prädizierte spezifische Volumen hat. Im Vergleich zu einer dynamischen Kühlrate konnte mithilfe einer konstanten Kühlrate entsprechend zum jeweiligen Kristallisationszeitpunkt das Materialverhalten deutlich genauer beschrieben werden. Dennoch liegen signifikante Unterschiede zur Messung vor, weshalb ein tieferes Verständnis des pvT-Verhaltens im Spritzgießprozess und neue spritzgießgerechte pvT-Modelle benötigt werden, welche das Kristallisationsverhalten im Prozess berücksichtigen und so eine präzisere Beherrschung des Formteilverzugs ermöglichen.

Die Arbeiten hinsichtlich der Entwicklung selbstoptimierender Regelungsstrategien für eine zyklusübergreifende Verzugsreduktion werden bis Mitte 2022 abgeschlossen. Hierdurch soll untersucht werden, inwiefern durch den MPC-Ansatz eine kontinuierliche Verzugsreduktion erreicht werden kann. Weiterhin soll der MPC-Ansatz im Hinblick auf die dritte Förderperiode für andere Geometrien und Materialien einfach übertragbar werden.

SFB 1120

Jahresbericht 2021



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Veröffentlichungen

HOPMANN, CH.; SCHMITZ, M.; KAHVE, C.; RÖBIG M.: *A comparison of predictive control strategies for a highly segmented injection mold tempering*, Polymer 2021, 218, 123494

HOPMANN, CH.; XIAO, C.; KAHVE, C. E.; FELLERHOFF, J.: *Prediction and validation of the specific volume for inline warpage control in injection molding*, Polymer Testing 2021, 104 (S1), 107393

HOPMANN, CH.; KAHVE, C.; XIAO, C.: *Analysis of Radial Heat Transfer in an Injection Mold with Highly Dynamic Segmented Mold Tempering*, Enhanced Material, Parts Optimization and Process Intensification, Proceedings of the First International Joint Conference on Enhanced Material and Part Optimization and Process Intensification, EMPORIA 2020, May 19-20, 2020, Aachen, Germany, 215-224, ISBN: 978-3-030-70332-5

FRITSCHKE, D; HOPMANN, CH.; KAHVE, C. ET AL.: *Einsatz und Einflussnahme von thermisch gespritzten Heizschichten im variothermen Spritzgießprozess*. Schriftbeitrag zur Technomer 2021 - 27. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, 04.-05.11.2021, Chemnitz, 2021