

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 Projektes ist es, den Verzug von Spritzgießformteilen durch die Homogenisierung des globalen spezifischen Volumens mithilfe einer hochdynamischen und -segmentierten Rastertemperierung zu minimieren. Die Regelung der einzelnen Temperierzonen erfolgte zunächst durch einen klassischen PID-Regler. Zur Steigerung der Regelungsgüte wurde im Projektjahr 2018 eine modellprädiktive Regelungsstrategie (MPC) entwickelt, die auf Basis einer diskretisierten eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung die Prädiktion von Werkzeug- und Formteiltemperatur ermöglicht.

Im Bearbeitungsjahr 2019 war das übergeordnete Ziel, die Prädiktionsgüte der Temperatur und des spezifischen Volumens zu optimieren, sowie erste Erkenntnisse über zuvor unbekannte Prozesseinflüsse und -abhängigkeiten zu gewinnen.

Des Weiteren war die Entwicklung einer weiteren Formteilgeometrie mit einem komplexeren Schwindungs- und Verzugsverhalten vorgesehen. Hierbei ist das Ziel die Übertragbarkeit des modellprädiktiven Regelungsansatzes zu untersuchen.

Vorgehensweise

Der modellprädiktive Regelungsansatz, welcher im Projektjahr 2018 für die schließseitigen Temperierzonen des Spritzgießwerkzeugs implementiert worden ist, wurde 2019

auch für die düsenseitigen Temperierzonen implementiert. In praktischen Versuchsreihen wurde die Regelungsgüte von PID und MPC untersucht und verglichen. Hierzu wurde ein Soll-spezifisches Volumen ausgehend von einem asymmetrischen Temperaturprofil als Zielgröße vorgegeben, sodass unregelmäßige Schwindung und dadurch Verzug provoziert wird. Für beide Regelungsstrategien galt es, den vorgegebenen Verlauf des spezifischen Volumens durch eine gezielte Aktivierung der Temperierzonen zu reproduzieren. Insgesamt wurden jeweils 15 Formteile produziert. Durch die Datenaufzeichnung konnte somit die Präzision des geregelten spezifischen Volumens untersucht werden. Des Weiteren wurden die produzierten Formteile nach einer Kühlzeit von 48 Stunden mit einem taktilen Koordinatenmessgerät vermessen. Hierbei konnte die Reproduzierbarkeit hinsichtlich des sich eingestellten Verzugs untersucht werden.

Zur Steigerung der Regelungsgüte wurde in diesem Projektjahr die Optimierung von numerischen und physikalischen Größen des aktuellen Regelungsmodells auf Basis von Spritzgießversuchen angestrebt.

Um die Prädiktion der Schmelztemperatur zu verbessern, wurde die Quantifizierung des Einflusses konkurrierender Temperierzonen bezüglich der lokalen Temperatur aller Temperierzonen angestrebt. Hierzu wurde das Spritzgießwerkzeug inklusive Heizkeramiken, CO₂ Kühlungen und Sensoren in der Simulationssoftware Moldex3D modelliert, sodass parallel zur Füllsimulation, eine thermische Simulation durch Aktivierung der individuellen Temperierzonen ausgeführt werden konnte.

Für die Entwicklung der Formteilgeometrie wurden umfassende Simulationen bezüglich des Schwindungs- und Verzugsverhaltens verschiedener Formteilkonzepte mit den Simulationsprogrammen Moldex3D und Cadmould durchgeführt. Dabei galt es eine Geometrie mit einem komplexeren Schwindungs- und Verzugsprofil zu entwickeln. Bei der Auslegung des Formteilmodells mussten jedoch insbesondere die Positionen der Drucksensoren mitberücksichtigt werden, da die drei Druckwerte repräsentativ für alle Temperierzonen sein müssen.

Ergebnisse

Der modellprädiktive Regelungsansatz wurde im Projektjahr 2019 vollständig implementiert. Die praktischen Versuche an der Spritzgießanlage zeigten, dass der Verzug mit dem modellprädiktiven Regelungsansatz genauer und reproduzierbarer eingestellt werden kann als mit einem klassischen PID Regler.

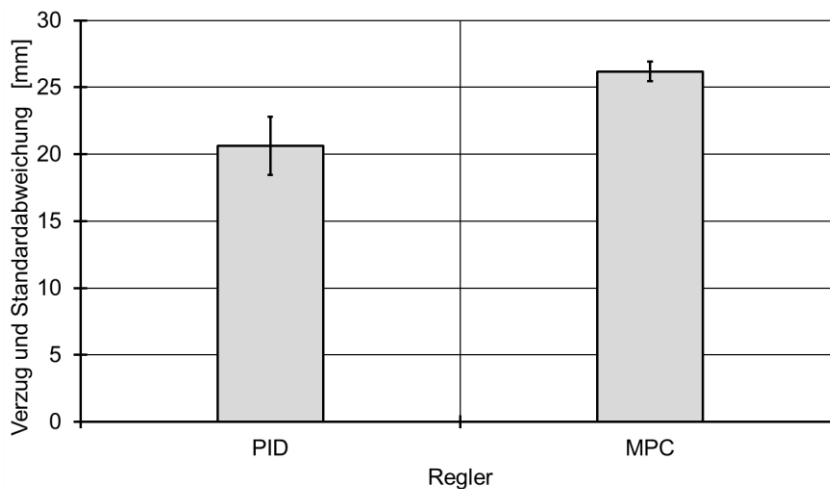


Abbildung 1: Durchschnittlicher Verzug und Standardabweichung von jeweils 15 Produzierten Formteilen für ein asymmetrisches Temperaturprofil

Die Genauigkeit, mit welcher der modellprädiktive Regler ein vorgegebenes spezifisches Volumen erreicht, ist dennoch nicht hinreichend.

Um die Genauigkeit der Temperaturprädiktion weiterhin zu verbessern, wurden thermische Simulationen durchgeführt, welche den gegenseitigen Einfluss der Temperierzonen bezüglich der Temperatur quantifizieren soll.

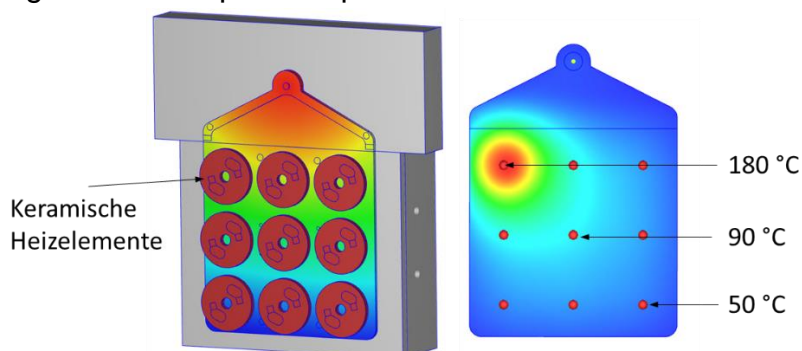


Abbildung 2: Einfluss von heizender Temperierzone 1 auf die Temperatur benachbarter Temperierzonen

Aus den ersten Simulationsergebnissen geht hervor, dass die Heiz- und Kühlleistung einer Temperierzone einen signifikanten Einfluss auf die Temperatur benachbarter Temperierzonen hat. Die derzeitige Betrachtung eindimensionaler Wärmeleitung führt daher zwangsweise zu Fehlern in der Temperaturprädiktion und somit in der Prädiktion des spezifischen Volumens.

Bezüglich einer weiteren Formteilgeometrie wurde auf Basis der simulativen Ergebnisse ein finales Konzept ausgewählt und eine technische Zeichnung zur Fertigung erstellt. Aufgrund der Tatsache, dass es lediglich drei Drucksensoren im Werkzeug gibt, müssen die Druckwerte an den drei Ebenen entlang der Fließrichtung für alle anderen Temperierzonen übertragbar sein. Dies stellte eine erhebliche Limitierung bezüglich der Entwicklung einer komplexeren Formteilgeometrie dar.

- Drucksensor
- Äquivalenter Druck auf Ebene

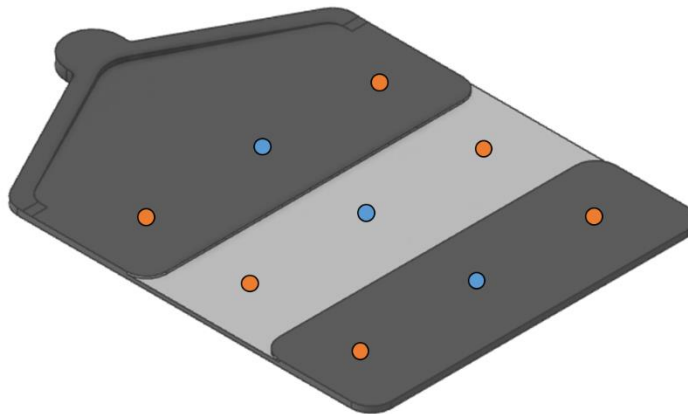


Abbildung 3: Neue Formteilgeometrie mit Wanddickensprung

Gemäß Abbildung 3 enthält das neue Formteil einen Wanddickensprung in der Mitte. Durch die geringere Dicke in der Mitte entsteht eine abweichende Kühlhistorie und somit auch ein anderer pVT-Verlauf, welcher von der Regelung berücksichtigt werden muss.

Zusammenfassung und Ausblick

Der modellprädiktive Regelungsansatz wurde vollständig implementiert und bietet somit die aktive Regelung aller 18 Temperierzonen. Darauf basierend wurden asymmetrische Temperierversuche durchgeführt, die gezeigt haben, dass der

modellprädiktive Regler das spezifische Volumen genauer und reproduzierbarer Regeln kann als der PID Regler.

Um die Genauigkeit der Prädiktion weiterhin zu erhöhen, muss neben eindimensionaler Wärmeleitung radiale Wärmeleitung berücksichtigt werden. Erste simulative Versuche bezüglich des gegenseitigen Einflusses der Temperierzonen haben gezeigt, dass die Vernachlässigung radialer Wärmeleitung für eine präzise Prädiktion der Temperatur nicht zulässig ist.

In dem folgenden Projektjahr gilt es, das lineare Prädiktionsmodell weiterhin zu optimieren. Zusätzlich soll das Prädiktionsmodell um die Berechnung radialer Wärmeleitung erweitert werden, sodass eine Kommunikation benachbarter Temperierzonen ermöglicht wird.

Die neu entwickelte Formteilgeometrie soll zudem zur Fertigung freigegeben werden.

Des Weiteren sollen in dem folgenden Projektjahr erste Ansätze eines thermomechanischen Modells zur Vorhersage des Verzugs auf Basis des In-Situ bestimmten spezifischen Volumens verfolgt werden.

Veröffentlichungen

WANG, J.; HOPMANN, C.; SCHMITZ, M.; HOHLWECK, T.; WIPPERFÜRTH, J.: *Modeling of pvT behavior of semi-crystalline polymer based on the two-domain Tait equation of state for injection molding*. Materials & Design 183 (2019), S. 108149.

WANG, J.; HOPMANN, C.; SCHMITZ, M.; HOHLWECK, T.: *Influence of measurement processes on pressure-specific volume-temperature relationships of semi-crystalline polymer: Polypropylene*. Polymer Testing 78 (2019), S. 105992