

## Teilprojekt B4

### **Titel**

Analyse der thermischen Kopplung von Schmelze, Gefüge und Werkzeug zur präzisen Vorhersage von Schwindung und Verzug im Spritzgießprozess

### **Projektleitung/-bearbeitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hopmann Christian (Leitung)  
Wipperfürth, M. Sc., Jens (Bearbeitung)  
Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung (IKV)  
Seffenter Weg 201  
52074 Aachen

### **Aufgabenstellung**

Aktuelle Modelle zur Beschreibung von Schwindung und Verzug beim Thermoplast-Spritzgießen berücksichtigen nur unzureichend thermische Wechselwirkungen zwischen Schmelze, Gefüge und Werkzeug. Eine genaue Beschreibung der zugrundeliegenden Prozesse erfordert ein tieferes Verständnis und daher eine präzise Messung der Schmelzetemperatur im laufenden Prozess. Für den Spritzgießprozess soll ein Werkzeugkonzept entwickelt werden, das eine Messung der Temperaturverteilung in der Kunststoffschmelze ermöglicht. Weitere thermische Materialdaten werden zusätzlich in Laborversuchen unter spritzgießrelevanten Randbedingungen in Abhängigkeit der Gefügestruktur gemessen. Hierzu erfolgt unter anderem die Weiterentwicklung einer Apparatur zur druckabhängigen Messung des Wärmeübergangskoeffizienten. In der zweiten Phase des Sonderforschungsbereichs wird in diesem Teilprojekt die Beschreibung geeigneter prozessnaher Materialmodelle fokussiert, die mit den entwickelten Messmethoden der ersten Phase sowohl validiert als auch mit präzisen prozessabhängigen Materialparametern ergänzt werden können. In einem ersten Schritt ist dazu die Erweiterung der Messmethoden, die zur Ermittlung orts aufgelöster Temperaturen und des Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden, notwendig. Besonderer Fokus liegt auf der Berücksichtigung der im Spritzgießprozess auftretenden hohen Abkühlraten, die den Erstarrungsvorgang und damit das Gefüge massiv beeinflussen. Aus den erzielten Erkenntnissen werden physikalisch motivierte Zusammenhänge abgeleitet, die in der am IKV entwickelten Gefügeberechnung implementiert werden. Zur präziseren Beschreibung des Wärmetransports vom Kunststoff in das Werkzeug wird außerdem die bei der Erstarrung freiwerdende Kristallisationswärme berücksichtigt.

Eine präzise Vorhersage der Gefügestruktur ermöglicht in dem mit Teilprojekt B7 entwickelten Mehrskalensatz die Berechnung lokaler, inhomogener thermischer und thermoelastischer Werkstoffeigenschaften. Im Rahmen der zweiten Phase sollen Methoden hergeleitet werden, wie diese Eigenschaften auf gesamte Bauteile übertragen werden können, um eine präzise Vorhersage und ein tiefes Verständnis des Verzugs zu ermöglichen.

### Vorgehensweise

Zur Messung der Temperaturverteilung wurde ein ultraschalltomografisches Konzept vorgeschlagen ausgearbeitet und in einem Spritzgießwerkzeug umgesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des vorgeschlagenen Aufbaus die Temperatur an 200 Ortspunkten im radialsymmetrischen Messbereich unter Verwendung algebraischer Rekonstruktionstechniken berechnet werden kann (ca. 3,5mm<sup>2</sup>). Die Arbeiten im vergangenen Jahr fokussierten vor allem die Auswertung der Ultraschallsignale, die aufgrund des hohen Signal-Rausch-Verhältnisses, erschwert ist. Neben der Signalfilterung durch Bandpassfilter wurden ebenfalls Experimente auf einer elektrischen Spritzgießmaschine durchgeführt, um die Rauscheffekte zu minimieren. Zudem wurde durch Echo-Messungen gezeigt, dass ausreichend Signalintensität vom Wandler in die Schmelze übertragen werden kann.

Zur Ermittlung des druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten wurde ein plattenförmiger Werkzeugeinsatz entwickelt, mit dem mithilfe von sechs Thermoelementen innerhalb der Schmelze, sowie 3 Thermoelementen in der Werkzeugwand der Temperaturgradient in der Schmelze über eine Formteildicke von 2 mm ermittelt werden kann. Zusätzlich ermöglichen drei weitere Thermoelemente im Werkzeug die Ermittlung des Wärmegradienten in das Werkzeug hinein. Auf diese Weise ist die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten möglich. Hierbei wurden insbesondere konstruktive Maßnahmen ergriffen, um die nur 0,1 mm dicken Thermoelemente geeignet in der Kavität einzubringen, ohne dass diese durch die Prozessbedingungen zerstört werden und das Messergebnis beeinflussen. Der Werkzeugeinsatz und die dazugehörige Peripherie werden derzeit in Betrieb genommen.

Zur Beschreibung des pvT-Verhaltens bei hohen Abkühlraten werden Flash-DSC Messungen durchgeführt, die die thermische Materialanalyse bei hohen Abkühlraten (4000 K/s) ermöglicht. Die Flash-DSC befindet sich derzeit in Beschaffung. Mit Hilfe der Daten soll zukünftig der aktuell gebräuchliche Tait-Ansatz zur Berechnung des pvT-Verhaltens erweitert und in Abhängigkeit des konkreten Fest-Flüssig-Anteils beschrieben werden, da dieser Zusammenhang den

Phasenübergang präziser beschreibt, als der Temperaturbereich indem die Phasenumwandlung stattfindet.

### **Ergebnisse**

Die ultraschalltomografischen Messungen auf einer elektrisch betriebenen Spritzgießmaschine weisen ein deutlich geringeres Rauschen im Vergleich zu Messungen auf einer hydraulisch betriebenen Spritzgießmaschine auf. Dennoch kann das Signal nicht einwandfrei detektiert werden. Durch das Messsystem werden Schallfrequenzen detektiert, die durch den Ultraschallwandler selbst nicht erfasst werden können. Dieser Effekt konnte mit Hilfe von Schallmessungen in Wasser bestätigt werden und deutet somit auf eine Störung innerhalb des Messsystems (z.B. Isolierung) hin. Aus diesem Grund werden Bandpassfilter eingesetzt, die das Signal im erwarteten Frequenzbereich von ca. 2 MHz filtern. Hierbei zeigt sich bei allen Messungen ein deutlich ablesbares Signal, welches sich wie erwartet im Verlauf des Spritzgießprozesses (Einspritzvorgang, Nachdruckphase, etc.) entwickelt. Jedoch liegt der Zeitpunkt, bei dem sich das Signal entwickelt deutlich hinter der erwarteten Laufzeit und entsteht vermutlich aufgrund der Überlagerung verschiedener Ultraschallwellen im Messbereich (z.B. durch Streuung). Im erwarteten Laufzeitbereich unterscheiden sich potenzielle Signale nur schwer vom Rauschen, welches zur Reduktion bereits über mehrere Messungen gemittelt wurde. Es konnte aber gezeigt werden, dass der Ultraschall in geeigneter Weise in die Schmelze eingekoppelt wird. Hierzu wurden Reflexionsmessungen an einem Wandler bei leerer und mit Schmelze gefüllter Kavität durchgeführt. Die unterschiedlichen Übergänge von Werkzeug/Luft bzw. Werkzeug/Schmelze bedingen ein unterschiedlich ausgeprägtes Reflexionsverhalten des Ultraschalls, wodurch ein deutlicher Signalabfall bei der Reflexionsmessung in Anwesenheit der Schmelze zu erwarten ist. Dieser Effekt konnte bestätigt werden.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Zur präzisen Vorhersage von Schwindung und Verzug ist die präzise Modellierung der Wärmeausgleichsvorgänge entscheidend. Hierfür sind prozessnahe Eingangsdaten, wie die Temperaturverteilung der Schmelze und der Wärmeübergangskoeffizient, unbedingt erforderlich. Die in Teilprojekt B4 entwickelte Ultraschalltomografie ermöglicht prinzipiell die Ermittlung der Temperaturverteilung der Schmelze. Es konnte gezeigt werden, dass ausreichend viele Signale erfasst werden können, um zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei der Erstarrung die Temperaturverteilung berechnen zu können. Die Signalauswertung ist derzeit aufgrund des trotz intensiver Filterung hohen Signal-Rausch-Verhältnisses problematisch und verhindert

eine genaue Rekonstruktion des Temperaturprofils. Versuche zur Messung des Wärmeübergangskoeffizienten und die Materialanalyse sind derzeit noch ausstehend. Das gebräuchliche Tait-Modell zur Beschreibung des pVT-Verhaltens von Kunststoffen wird derzeit konzeptionell erweitert und soll durch Flash-DSC Messungen validiert werden.

### Veröffentlichungen

WIPPERFÜRTH, J.; HOPMANN, CH.: A concept of an injection compression mould for non-invasive ultrasound tomographic temperature measurements. *AIP Conference Proceedings*, 2055 (2019) 070004

HOPMANN, CH.; WIPPERFÜRTH, J.: Ultrasound Tomography for Spatially Resolved Melt Temperature Measurements in Injection Moulding Processes. *Journal of Applied Mechanical Engineering* 6 (2017) 3, S. 1000264

LASCHET, G.; WIPPERFÜRTH, J.; SPEKOWIUS, M.; SPINA, R.; APEL, M.; HOPMANN, CH.: Effective thermal properties of an  $\alpha$ -iPP injection moulded part by a multiscale approach. *Material Science and Engineering* 48 (2017) 12

HOPMANN, CH.; WIPPERFÜRTH, J.; SCHÖNGART, M.: Spatially resolved temperature measurement in injection moulding using ultrasound tomography. *AIP Conference Proceedings* 1914 (2017) 90005