

Teilprojekt B9

Titel

Thermomechanische Mehrphasensimulation mit lokaler Berechnung von Werkstoffeigenschaften zur Vorhersage und Minimierung des Verzugs von Gussbauteilen

Projektleitung/-bearbeitung

Bührig-Polaczek, Andreas, Prof. Dr.-Ing.
Gießerei-Institut - Projektleitung

Vossel, Thomas M.Sc.
Gießerei-Institut - Projektbearbeitung

Aufgabenstellung

- Physikalische Modellierung des Wärmeübergangs
 - Implementierung eines physikalischen HTC Modells
 - Verifikation durch inverse Simulation und Modellvergleich

Vorgehensweise

➤ Implementierung eines physikalischen HTC Modells
Ein inverses oder empirisches HTC Modell kann zwar Werte für den Wärmeübergang liefern, die bei Anwendung für eine gute Wiedergabe der vorherrschenden Bedingungen sorgen, sind jedoch auf das Vorliegen experimenteller Messdaten bzw. auf die Festlegung empirischer Modellparameter beschränkt und nicht als auf jeden Aufbau übertragbare Allgemeinlösung anwendbar. Eine Betrachtung der physikalischen Gegebenheiten wie etwa dem Wärmeübergang über einen Luftspalt oder ein verbesserter Wärmeübergang durch steigenden Kontaktdruck ermöglicht es, ein rein physikalisches Modell aufzustellen, um so ein allgemeingültiges Modell – eine Kenntnisse der physikalischen Daten der beteiligten Materialien vorausgesetzt – zu erhalten. Hierzu würde im Hinblick auf Gießprozesse eine Unterscheidung in drei grundlegende Phänomene vorgenommen: 1.) Der fest-flüssig Kontakt zwischen flüssiger Schmelze und festen Formwänden. 2.) Der Übergang über einen Gasspalt 3.) Der Kontakt unter zunehmendem Kontaktdruck.

Das sich ergebende Modell wurde als Routine in Abaqus implementiert.

➤ Inverse Simulation der HTC Entwicklung

Neben der Nutzung von HTC Modellen, die auf physikalischen oder empirischen Modellannahmen beruhen, soll auch eine Modellierung für den Wärmeübergang erfolgen, die rein temperaturabhängig ist und auf den im Experiment erhaltenen Messdaten beruht. Hierzu wird der experimentell genutzte Aufbau in der Simulationssoftware Magmasoft nachgebildet und die Abkühlkurven der im Experiment genutzten Thermoelemente als Input Daten eingespeist (vgl. Abbildung 1). Da es sich beim Experiment um das Aufschrumpfen eines zylindrischen Napfes auf einen Innenkern handelt, wird der Wärmeübergang auf der Außenseite durch einen durch den Volumenschwund entstehenden Luftspalt geprägt, während auf der Innenseite des Napfes ein steigender Kontaktdruck zwischen Napf und Innenkern auftritt. Da diese beiden Fälle einen unterschiedlichen Verlauf für den HTC haben, werden für die beiden Regionen separate HTC Verläufe bestimmt. Hierzu wird eine parametrisierte Funktion genutzt, deren Parameter genutzt werden können, um die Funktion so anzupassen, dass die sich ergebenden $HTC(T)$ Verläufe zu einer guten Übereinstimmung zwischen experimentell gemessenen Abkühlkurven und entsprechenden aus den Simulationsergebnissen entnommenen Kurven führen.

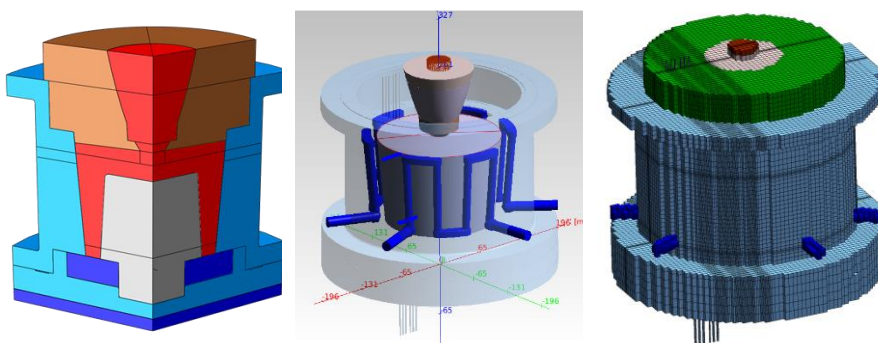


Abbildung 1: Links: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Guss rot, Kokillen hellblau/grau, Isolierung dunkelblau, Sand braun)
Mitte: Simulationsaufbau in Magmasoft
Rechts: Vernetzung

➤ Modellvergleich der Wärmeübergangsmodelle

Die Modellierung des HTC in der numerischen Simulation der Erstarrung von Schmelzen stellt eine essentielle Größe dar, um den Wärmehaushalt zu beschreiben. Aus diesem Grund wurden thermomechanische Erstarrungssimulationen mit Abaqus durchgeführt, in denen ein inverses HTC Modell, das rein temperaturbasiert Werte für den Wärmeübergang liefert, einem empirischen HTC Modell gegenübergestellt, das die Resultate der thermomechanischen Simulation wie Spaltbreite und Druck nutzt, um so auf Basis dieser Parameter lokal aufgelöste und zeitliche HTC liefert, die in der Simulation genutzt werden können. Zum Vergleich der Güte der beiden Modelle, werden die sich ergebenden Abkühlkurven wie auch z.B. die Druckentwicklung am Innenkern und die Spaltentwicklung auf der Außenseite des Gussteils mit denen aus der experimentellen Messung verglichen.

Ergebnisse

➤ Implementierung eines physikalischen HTC Modells

Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die sich durch das HTC Modell ergebenden Verläufe für den Wärmeübergang:

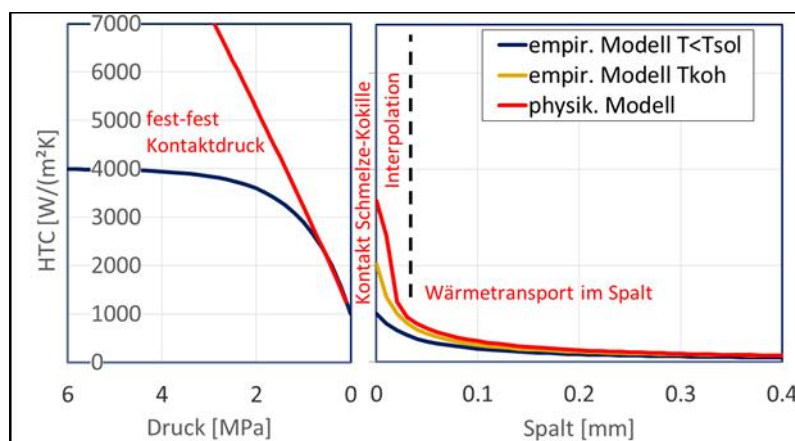


Abbildung 2: HTC Verläufe des empirischen und physikalischen Wärmeübergangsmodells für den Fall des Kontaktdrucks und der Spaltbildung

Die Modellierung bildet drei verschiedene Kontaktbedingungen ab:

- Kontakt Schmelze-Kokille
- Fest-Fest Kontakt unter zunehmendem Kontaktdruck
- Fest-Fest Kontakt bei vorliegendem Luftspalt zwischen den Kontaktflächen

Der Schmelze-Kokille Kontakt modelliert den Wärmeübergang zwischen flüssiger Schmelze in den Formwänden. Hierbei wird die Oberflächenrauigkeit beachtet und inwiefern es der Schmelze möglich ist diese Oberfläche zu benetzen. Dies ist notwendig um eine Aussage über die tatsächliche Flüssig-Fest-Kontaktfläche zwischen Schmelze und Formwand treffen zu können. Sobald die Schmelze erstarrt ergeben sich zwei Varianten für den dann vorliegenden Fest-Fest-Kontakt: Entweder kommt es durch den Volumenschwund während der Abkühlung zu der Bildung von Luftspalten zwischen den Kontaktpartnern oder es besteht weiterhin ein direkter Fest-Fest-Kontakt, der gerade durch den Effekt eines Aufschumpfens unter erhöhten Kontaktdrücken stattfinden kann. Die Modellierung bei einer Spaltbildung berücksichtigt insbesondere die Wärmeübertragung durch die Luft, die in diesem Fall den ausschlaggebenden Faktor darstellt und im Vergleich mit den anderen Kontaktbedingungen zu vergleichsweise niedrigen HTC's führt. Für den Kontakt unter Kontaktdruck können z.B. elastische Modellierungsansätze nach Mikic gewählt werden, in den physikalische Daten wie z.B. der E-Modul der beiden in Kontakt stehenden Materialien einfließen können. Hierbei nimmt mit steigendem Druck der Wärmeübergangskoeffizient zu.

➤ Inverse Simulation der HTC Entwicklung

Die HTC Verläufe der inversen Simulation unterscheiden sich wie erwartet deutlich hinsichtlich einer vorliegenden Spaltbildung oder Druckzunahme (vgl. Abbildung 3). Da es sich bei der Simulation mit Magma um keine gekoppelte thermomechanische Rechnung handelt, wird die Spaltbildung nicht konkret simuliert und ihre Folgen nur über Änderungen am HTC abgebildet um den Abkühlkurven der experimentellen Messungen, bei denen dieser Effekt natürlich auftritt, zu entsprechen. Es kann damit auch ohne Kenntnis der vorherrschenden Spaltbreite respektive des Kontaktdrucks auf der Innenseite des Gussteils eine Aussage über den zur experimentellen Messung passenden HTC gemacht werden. Die sich für den Fall des herangezogenen experimentellen Aufbaus ergebenden Verläufe für den Wärmeübergangskoeffizienten sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Für den Fall der Spaltbildung sinkt der HTC ausgehend von einem Wert, der den flüssig-fest Wärmeübergang widerspiegelt auf sehr geringe Werte ab, da der Wärmeübergang über einen Luftspalt vergleichsweise ineffektiv ist. Auf der Seite des Aufschumpfens des Gussteils und in Folge mit steigendem Kontaktdruck erhöht sich der HTC kontinuierlich.

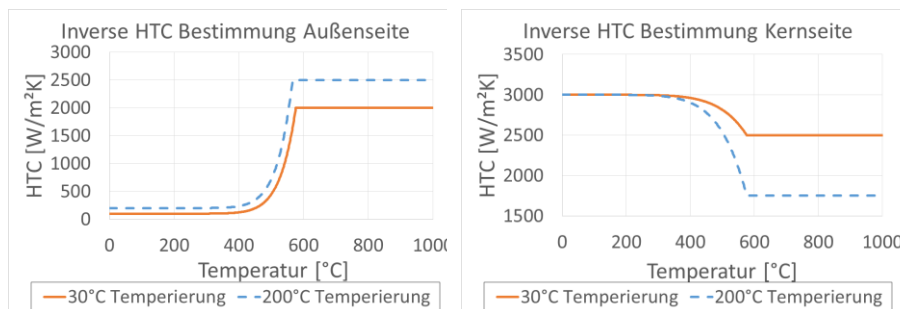


Abbildung 3: HTC(T) Verläufe aus den inversen Simulationen für zwei Temperierungen des Aufbaus

➤ Modellvergleich der Wärmeübergangsmodelle

Vergleicht man die abgebildeten Abkühlkurven (vgl. Abbildung 4) für Experiment, inverses und empirisches HTC Modell, so sieht man, dass beide HTC Modelle insbesondere im Bereich der Erstarrung in sehr guter Übereinstimmung mit den experimentellen Messwerten liegen. Das empirische Modell weist jedoch nach Ende der Erstarrung eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten auf. Dies lässt sich auf die Möglichkeiten des Modells die Spaltbildung und Kontaktdruckzunahme phänomenologisch im HTC zu berücksichtigen, während das inverse HTC Modell hier auf eine rein temperaturabhängige Beschreibung angewiesen ist, die diese Effekte nicht hinreichend gut berücksichtigen kann.

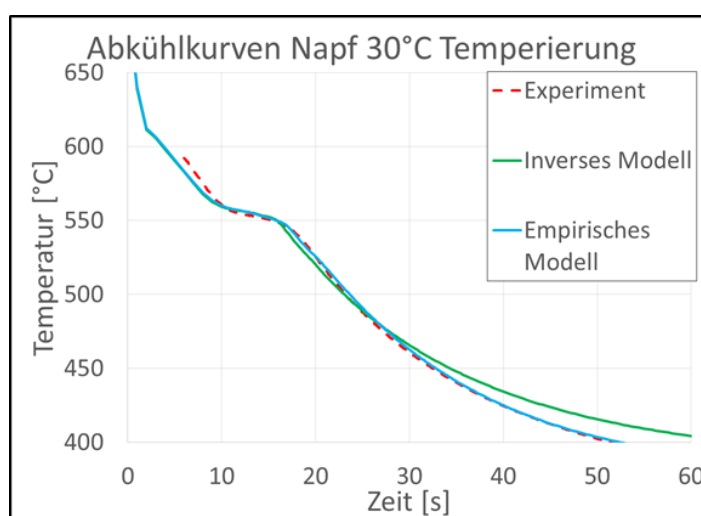


Abbildung 4: Abkühlkurven für inverses und empirisches HTC Modell sowie Messwerte aus experimenteller Messung

Zusammenfassung und Ausblick

Die erarbeiteten Ergebnisse ermöglichen ein genaueres Bild hinsichtlich der Wärmeübergänge in einem Gießprozess. Es zeigt sich, dass die in Prozesssimulationen häufig angewendeten groben Abschätzungen für den HTC viel Potential für eine bessere Beschreibung des Wärmehaushalts bieten, da sie nicht nur in den Verläufen der angenommenen HTC Werte nur eine grobe Abschätzung sind, sondern auch nicht allgemeingültig verwendet werden können – gerade eine Unterscheidung zwischen Regionen mit Luftspalt und Kontraktdruck ist für eine hinreichend gute Beschreibung der vorliegenden Wärmeübergänge unerlässlich. Weiterhin ermöglichen die durchgeführten Simulationen es die Entwicklungen von z.B. Druck oder Spalt auch an Positionen jenseits der experimentellen Messung zu betrachten, um hier zusätzliche Erkenntnisse zu gewinnen.

Im weiteren Verlauf des Projektes wird unter anderem der Wärmeübergang weiter betrachtet werden insbesondere hinsichtlich des physikalischen HTC Modells, das für eine Prozesssimulation angewandt werden wird, um so Vergleiche hinsichtlich der bereits angewendeten inversen und empirischen Modelle ziehen zu können. Ziel ist es durch das physikalische Modell einen allgemeinen Ansatz zu haben der in Prozesssimulationen angewendet werden kann ohne das Messdaten für eine inverse HTC Bestimmung vorliegen und ohne das empirische Aussagen über den vorliegenden Kontakt getroffen werden müssen.

Veröffentlichungen

-