

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

- Implementierung und Benchmarktest für kolumnares Kornwachstumsmodell
- Thermomechanische Simulation des „Napf“ Versuchsstandes und Vergleich von verschiedenen Ansätzen für das Erstarrungsmodell und der Beschreibung des HTC
- Implementierung und Interpolation homogener Werkstoffdaten für den E-Modul
- Erprobung der erarbeiteten Simulationsmodelle für den Fall einer mikroskaligen Erstarrung während Laserschneid- und Laserschweißprozessen

Vorgehensweise

- Implementierung und Benchmarktest für kolumnares Kornwachstumsmodell

Aufbauend auf einer Modellierung nach Wu et al. wurden Gleichungen zur Beschreibung der Entstehung und des Wachstums kolumnarer Körner aufgestellt und in Abaqus implementiert. Ein Algorithmus für die columnar to equiaxial transition („CET“), der mit einer hard und soft blocking Methodik arbeitet, differenziert hinsichtlich der lokal entstehenden Kornstruktur, also dem Übergang zwischen äquiaxialen und kolumnaren Körnern. Die implementierten Algorithmen und die so gelieferten Simulationsergebnisse werden mit experimentellen Untersuchungen von Ahmadein et al. verglichen und somit validiert.

- Thermomechanische Simulation des „Napf“ Versuchsstandes und Vergleich von verschiedenen Ansätzen für das Erstarrungsmodell und der Beschreibung des HTC

Erweiterung der bereits erfolgten rein thermischen Simulationen des „Napf“ Bauteils um mechanische Werkstoffdaten, verschiedene Ansätze für die temperaturabhängige Entwicklung des Festphasenanteils und ein Modell für den temperatur- und druckabhängigen Wärmeübergang. Durch die thermomechanische Simulation kann der Verzug des Bauteils nachvollzogen und die lokalen spalt- bzw. anpressdruckabhängigen Wärmeübergänge entsprechend berücksichtigt werden. Es werden Abkühlkurven gemäß der Temperaturdaten an den Positionen, die der Temperaturmessung im Experiment entsprechen, erstellt um die simulativ ermittelten Abkühlkurven mit Messungen aus experimentellen Abgüssen zu vergleichen. Hierdurch können die unterschiedlichen Modellansätze der Simulation miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit den experimentellen Messwerten verglichen werden.

- Implementierung und Interpolation homogenisierter Werkstoffdaten für den E-Modul

Integration der von Teilprojekt B7 bestimmten homogenisierten Werkstoffdaten für den E-Modul in Abaqus. Die so erhaltenen Daten erlauben eine festphasenanteilabhängige Beschreibung für den E-Modul. Diese Daten kommen bei der thermomechanischen Simulation des „Napfes“ zum Einsatz.

- Erprobung der erarbeiteten Simulationsmodelle für den Fall einer mikroskaligen Erstarrung während Laserschneid- und Laserschweißprozessen

Anwendung des äquiaxialen Erstarrungsmodells für die Erstarrung einer mikroskaligen Menge an Schmelze wie sie bei Laserschneid- und Laserschweißprozessen vorliegen. Hierzu wird eine entsprechende Geometrie aus Prozesssimulationen nach Abaqus übertragen und die zugehörigen thermischen Randbedingungen wie der Wärmefluss an den Randgebieten der simulierten Geometrie aus der Prozesssimulationssoftware exportiert und in Abaqus eingelesen. Durch die Anwendung des Erstarrungsmodells kann die Entstehung der Kornstruktur unter den gegebenen Abkühlbedingungen vorhergesagt und mit Korngrößenmessungen aus Experimenten unter entsprechenden Prozessparametern verglichen werden.

Ergebnisse

- Implementierung und Benchmarktest für kolumnares Kornwachstumsmodell

Die Simulation der Erstarrung eines Benchmarktests gibt die im Experiment festgestellte Verteilung von äquialer und kolumnarer Kornstruktur wieder, Abbildung 1. Es kann daher eine simulative Vorhersage der sich in einem Bauteil bildenden Kornstruktur erstellt werden. Diese Information kann für die Nutzung festphasenanteil- und kornstrukturabhängiger Werkstoffdaten eingesetzt werden.

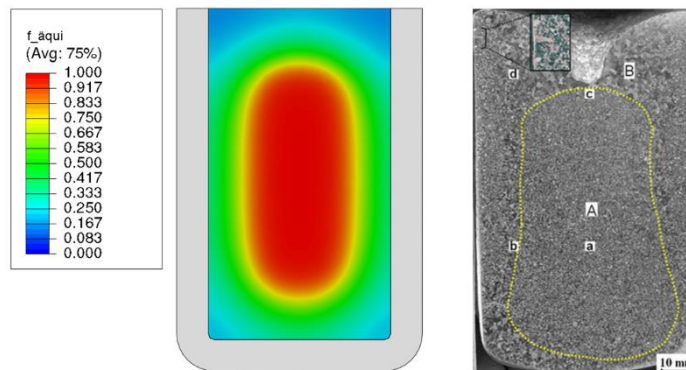


Abbildung 1: Links: Simulierter äquialer Kornstrukturanteil (kolumnarer Anteil verhält sich invers hierzu) und rechts: experimentell bestimmte rein äquiale Region

- Thermomechanische Simulation des „Napf“ Versuchsstandes und Vergleich von verschiedenen Ansätzen für das Erstarrungsmodell und der Beschreibung des HTC

Durch ein geometriebedingtes Abschrumpfen des Napf Bauteils von den Außenwänden der Form und ein Aufschumpfen auf die Innenformgeometrie zeigt sich die Betrachtung der Entwicklung der Spaltbildung und der druckabhängige Wärmeübergang als wesentliche Größen für eine gute Modellierung des sich einstellenden Wärmehaushalts. Durch die Anwendung verschiedener Modellierungsansätze für die Entwicklung des Festphasenanteils konnte auch der Einfluss dieser Annahme auf die Ergebnisse der Simulation untersucht werden. Neben dem Ablauf der Freigabe der latenten Wärme beeinflussen Unterschiede in der Entwicklung des Festphasenanteils auch die vorliegenden mechanischen Eigenschaften und damit auch die Bedingungen für den Wärmeübergang. Es konnte gezeigt werden, dass die durch Mikrostruktursimulation berechnete

Festphasenanteilsänderung in Kombination mit dem manuell optimierten druck- und spaltabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten die experimentellen Abkühlkurven am besten widerspiegeln und so eine präzisere Beschreibung ermöglichen als zum Beispiel via Festphasenanteilsentwicklungen nach einem Scheil Modell gemäß Stand der Forschung.

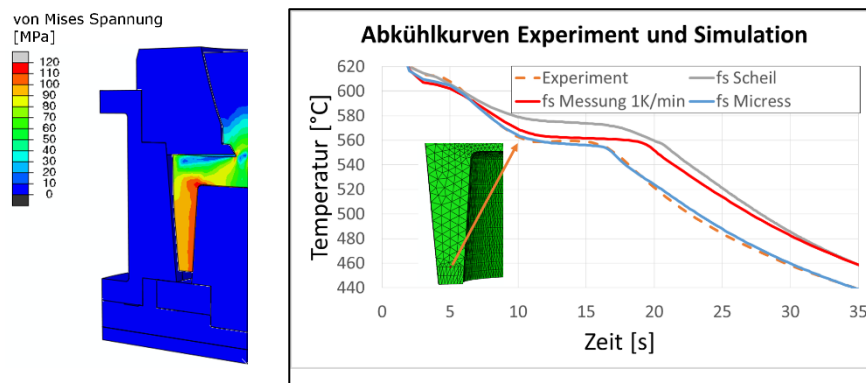


Abbildung 2: Verzug des Bauteils (skaliert um Faktor 10) und vorherrschende Mises Vergleichsspannung (links) und Abkühlkurven aus Simulation und Experiment (rechts)

- Implementierung und Interpolation homogenisierter Werkstoffdaten für den E-Modul

In Kooperation mit dem Teilprojekt B7 kommt das entwickelte Kornwachstumsmodell zum Einsatz, um das Fortschreiten der Erstarrung einer A356 Legierung zu simulieren. Die so erhaltene Erkenntnis über den lokal im Bauteil zu jedem Zeitpunkt vorliegenden Festphasenanteil ermöglicht den Einsatz von Werkstoffdaten, die nicht mehr wie gemäß dem Stand der Forschung üblich einen rein temperaturabhängigen Verlauf haben, sondern die sich nun als Funktion des Festphasenanteils beschreiben lassen. Dies ermöglicht insbesondere eine präzisere Beschreibung der Materialeigenschaften im fest-flüssig Bereich für den es sich grundsätzlich in messtechnologischer Hinsicht schwierig gestaltet experimentelle Messwerte zu ermitteln. Dies wurde beispielhaft für den E-Modul aufgezeigt, dessen Entwicklung als Funktion des Festphasenanteils in Abaqus implementiert und über die sich ergebende Kornstruktur interpoliert wurde. Abbildung 3 zeigt den Verlauf des für eine äquiaxiale Erstarrung bestimmten E-Moduls gegenüber Literaturwerten wie sie von Decultieux bestimmt

wurden. Es wird deutlich, dass es die im SFB1120 generierte Methode erlaubt die Bildung eines Festkörperskeletts zum Zeitpunkt der Kohärenz abzubilden was sich in einem Anstieg des E-Moduls äußert. In den experimentell bestimmten Daten nach Decultieux war eine messtechnische Erfassung dieses Anstiegs im fest-flüssig Bereich nicht möglich.

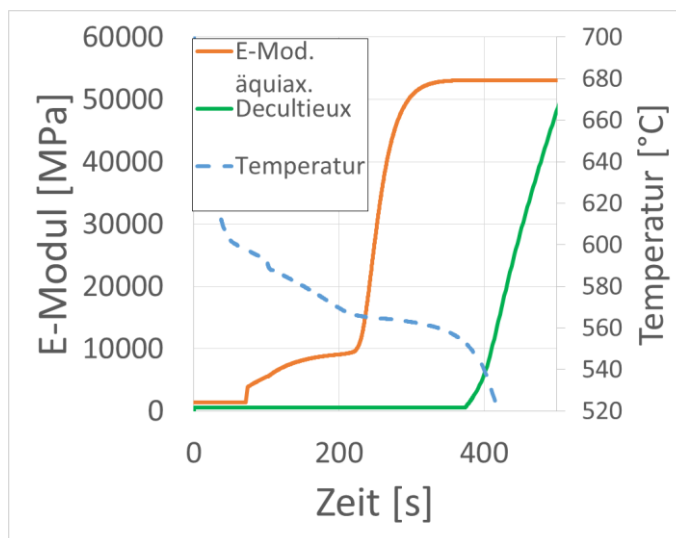


Abbildung 3: Verlauf der Entwicklung des E-Moduls bei voranschreitender Erstarrung für Messungen nach Decultieux wie auch für die homogenisierten, festphasenanteilsabhängigen Werkstoffdaten des SFBs

- Erprobung der erarbeiteten Simulationsmodelle für den Fall einer mikroskaligen Erstarrung während Laserschneid- und Laserschweißprozessen

Die entwickelten Modelle und Methoden zur Erstarrungssimulation wurden in Kooperation mit den Teilprojekten A1, A3, A8 und A9 auf eine Anwendung für mikroskalige Schmelzevolumina wie sie bei Laserprozessen auftreten übertragen. Hierfür wurden Daten aus Prozesssimulationen des Laserschneidens und Laserschweißens exportiert und in Abaqus integriert, um die Geometrien und Randbedingungen der Prozesse abbilden zu können. Die sich ergebende Kornstruktur konnte im Anschluss mit den im Experiment festgestellten Größen verglichen werden. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer solchen Simulation. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen simulativen und experimentellen Werten aufgezeigt werden, obgleich sich auch

zeigte, dass die bisherigen Modellanpassungen, um die gegenüber makroskaligen Gießprozessen deutlich höheren Abkühlraten zu berücksichtigen, alleine nicht ausreichen um die Erstarrungseffekte solcher mikroskaligen Volumina hinreichend abzubilden. Für eine noch bessere Übereinstimmung von Simulation und Experiment müssten Effekte wie ein epitaxiales Wachstum im Modell implementiert werden.

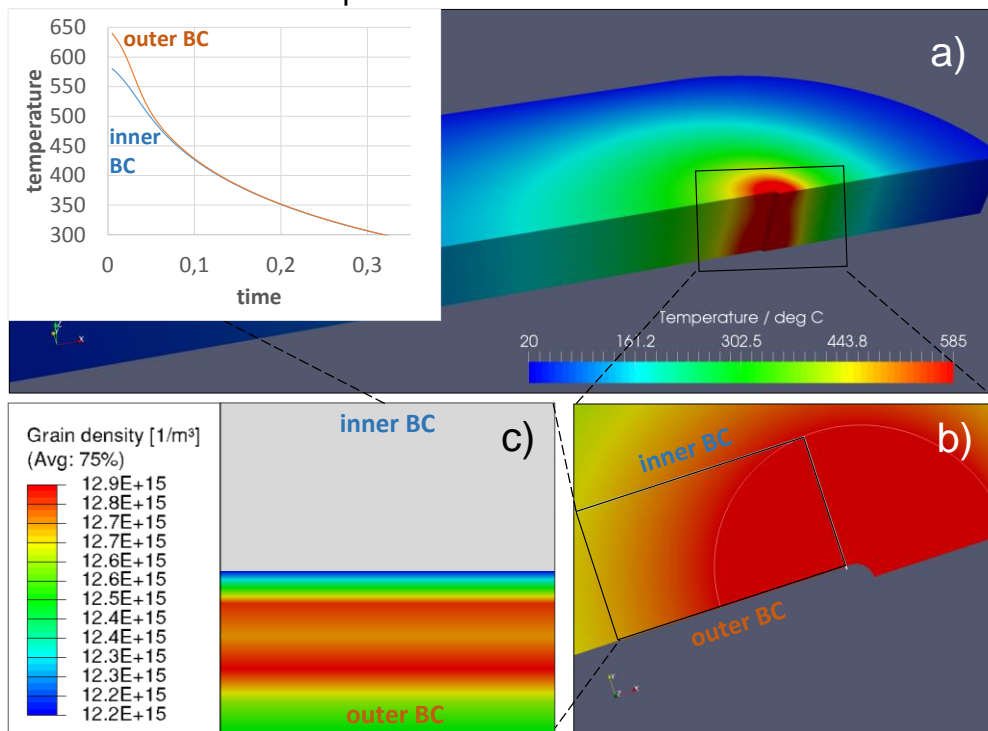


Abbildung 4: Thermische Simulation des Laserschneidens mit
 a) Simulationsbereich mit zugehöriger Temperaturverteilung
 b) Horizontaler Schnitt bei Tiefe $z = -4,5$ mm mit isothermer Aufschmelzlinie und Randbedingungen
 c) Ergebnis der Keimdichtensimulation

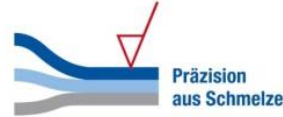
Zusammenfassung und Ausblick

Die erzielten Fortschritte erlauben es neben einer erweiterten Modellierung des Kornwachstums hinsichtlich einer kolumnaren Erstarrung auch weitere innovative Werkstoffdaten in die Simulationen einzubeziehen. Dies ermöglicht erstmals eine präzisere Abbildung des Werkstoffverhaltens im messtechnologisch schwierig zu erfassenden fest-flüssig Bereich und erlaubt so eine Erhöhung in der Präzision der Simulation. Hierdurch wird ein Fortschritt im Hinblick auf das

übergeordnete Ziel einer verbesserten Vorhersage des Verzugs, um diese Zielgröße im weiteren Verlauf des Projekts minimieren zu können, erreicht. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass sich die erarbeiteten Modelle und Methoden auf Problemfälle jenseits der makroskaligen Gussprozesse wie einer Erstarrung im mikroskaligen Bereich im Rahmen der Laserprozessierung anwenden lassen, was die Modularität und Anpassungsfähigkeit des gewählten Ansatzes unterstreicht. Weitere Verbesserungen am Kornwachstumsmodell, die Implementierung zusätzlicher Werkstoffdaten und weitere Betrachtungen zur Beschreibung der Wärmeübergänge können die Güte der gelieferten Ergebnisse noch weiter steigern und es bietet sich an die Betrachtungen hinsichtlich einer Berücksichtigung von Phänomenen wie der Heißrissbildung und Optimierungsmethoden einer Vorkompensation der Geometrie zu erweitern.

Veröffentlichungen

- [1] Laschet G., Vossel T., Wolff N., Apel M. and Bührig-Polaczek A.: Multiscale solidification simulation of an axisymmetrical A356 component in die casting, SP17 conf. Paper, accepted, 2017
- [2] Wolff, N.; Pustal, B.; Vossel, T.; Laschet, G.; Bührig-Polaczek, A.: Development of an A356 Die Casting Setup for Determining the Heat Transfer Coefficient Depending on Cooling Conditions, Gap Size, and Contact Pressure, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 48, Heft 12, 2017
- [3] Pustal, B.; Schwedt, A.; Arntz, D. Haeusler, A.; Jansen, U.; Schöler, C.; Vossel, T.; Gillner, A.; Bührig-Polaczek, A.; Mayer, J.; Schulz, W.; Poprawe, R.: Modelling Approach towards Tailored Grain Structure in Laser Processing, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2017, 48 (Heft 12)
- [4] Vossel T., Pustal B., Bührig-Polaczek A.: Modellierung der Erstarrungskinetik kolumnarer und äquiauxialer Kornstrukturen zur gefügebasierten Interpolation der Werkstoffeigenschaften im Hinblick auf die Verzugsvorhersage, Special November 2 (2017) 130-134



- [5] Wolff, N.; Pustal, B.; Vossel, T.; Laschet, G.; Bührig-Polaczek, A.: Entwicklung eines Versuchsaufbaus mit adaptiver Kühlung und Ermittlung des spalt- und kontaktdruckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten, Special November 2 (2017) 123-126
- [6] Pustal B., Behnken H., Vossel T., Laschet G., Wolff N., Bührig-Polaczek A.: Modellierung des Verzugs eines oberflächennah gekühlten A356 Gussteils mit unterschiedlichen Wärmeübergangs- und Erstarrungsansätzen, Gießerei Special November 2 (2017) 134-137