

FOTO: CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, INSTITUTE OF METAL RESEARCH

# Schleudergießen von großen Ti-6Al-4V-Strukturkomponenten mit Unterstützung virtueller Prozessmodellierung

Um das Auftreten von Porosität, Spannungen und Verformungen vorhersagen zu können, wurden in einem länderübergreifenden Gemeinschaftsprojekt Methoden zur virtuellen Modellierung des Schleudergießens entwickelt.

VON OLE KOESER UND BADARINATH KALKUNTE, LAUSANNE, SCHWEIZ, RUI YANG, SHENYANG, CHINA, UND HAI NAN, BEIJING, CHINA

Die Entwicklung der Gießprozess-technologie für sehr große dünnwandige TiAl-Strukturkomponenten folgt einem generellen Trend in der Produktentwicklung. Die Produkthanforderungen, in diesem Fall für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, gehen hinsichtlich der Materialeigenschaften, des

Leichtbaus und der geometrischen Komplexität immer mehr an die Grenzen des technisch Machbaren. Entsprechend müssen auch die Fertigungsprozesse diesen Forderungen angepasst werden.

Ermöglicht wird diese Prozessverbesserung durch die Synthese der konkreten Gießprozessentwicklung mit den gebotenen Möglichkeiten der Prozessmodellierung. Immer häufiger werden dabei für die Prozessauslegung voraussagekräftige und validierte Simulationsverfahren verlangt, welche die grundlegende Phy-

sik des Fertigungsprozesses beinhalten. Potentielle Probleme (füllungsbezogene Defekte wie Einschlüsse, unterbrochene Füllung und Lunker, Porosität, Verzug) müssen durch die Modellierung in einer Weise abgebildet werden, die auf Änderungen der physikalischen Prozessbedingungen (gesteuert z. B. durch Füllzeit und Fülltemperatur, Vorheiztemperatur der Form, Rotationsgeschwindigkeit) empfindlich reagiert und somit die virtuelle Überprüfung von Sets potentiell besserer Prozessparameter erlaubt.

Die folgenden Ausführungen sollen zeigen, wie im Rahmen des COLTS-Projekts die derzeitigen Softwarefunktionalitäten so ausgeweitet wurden, dass sie den spezifischen Anforderungen an das Schleudergießen großer TiAl-Strukturkomponenten gerecht werden. Die entsprechend modifizierte Simulationssoftware wurde in die Prozessentwicklung integriert, was anhand eines Anwendungsbeispiels gezeigt wird.

### Implementierung und Validierung der erweiterten Modellierungsmöglichkeiten

Für die Implementierung der erweiterten Funktionalitäten wurden vier unterschiedliche industrielle Komponenten ausgewählt. Bei zwei Komponenten handelt es sich um typische Anwendungen aus dem Flugzeugbereich (Bild 1a Türrahmenkomponente, Bild 1b Triebwerksgehäuse), während zwei weitere Strukturkomponenten (je eine Struktur mit würfelförmiger bzw. zylindrischer Grundform) aus dem Raumfahrtbereich stammen. Alle Komponenten weisen große Abmessungen (im Bereich von 1 m) sowie geringe Wanddicken (4-5 mm) auf. Die Komplexität der ausgewählten Strukturen ermöglicht eine Verifizierung der Simulationssoftware im Detail und stellt sicher, dass die erweiterten Modellierungsfähigkeiten die gewünschte Leistung erbringen und die Produktion solch komplexer Geometrien ermöglichen. Für diese Aufgabenstellung wurde ProCAST von ESI eingesetzt.

Die Schwerpunkte für den Modellierungsansatz lagen auf Strömungsaspekten (Füllsimulation), thermischen Aspekten (Erstarrung, Abkühlen des Teils in der

### KURZFASSUNG:

Die Verwendung großer Ti-Strukturkomponenten in Flugzeugen und Raumfahrzeugen kann zu signifikanten Gewichtseinsparungen führen und sowohl den Treibstoffverbrauch als auch die Schadstoffemissionen reduzieren. Aus Kostengründen bietet es sich an, solch komplex aufgebaute Komponenten im Schleudergießverfahren herzustellen. Auch unter technischen Aspekten, um ein vollständiges Füllen der Gussform zu erreichen, ist angesichts der Bauteilgröße (1-2 m) der dünnwandigen Geometrien (unter 5 mm) und der eingeschränkten Überhitzung (auf 40 °C limitiert durch den Schmelzprozess) die Anwendung des Schleudergießens sinnvoll. Um das Formfüllen, die Erstarrung, die Ausbildung von Porosität, Spannungen und Verformungen vorhersagen zu können und so die Auslegung des Gießprozesses zu unterstützen, wurden Methoden zur virtuellen Modellierung des Gießprozesses entwickelt. Der Beitrag zeigt im Detail die Leistungsmerkmale der Gießmodellierung (Materialeigenschaften, Wärmeübergangskoeffizient Form/Schmelze, Randbedingungen), wie die Ergebnisse der Modellierung mit dem realen Guss übereinstimmen und welche Maßnahmen ergriffen wurden, um die Qualität von Gussteilen sicherzustellen und zu verbessern. Die Arbeiten wurden im Rahmen des FP7-Projekts COLTS mit europäischen und chinesischen Partnern durchgeführt.

Keramikschale), der Vorhersage von Porosität sowie der Vorhersage von Spannungen und Verformung.

ProCAST verfügt über industriell eingesetzte Solver für thermische, strömungs- und strukturmechanische Aufgabenstellungen, die im Projektrahmen für die Berücksichtigung von Zentrifugalkräften validiert bzw. entsprechend erweitert wurden. Zum einen wurde die Performance vom Strömungssolver optimiert, um unter den gegebenen Randbedingungen komplexe turbulente Strömung in einem FEM-Modell mit mehreren Millionen Elementen verlässlich berechnen zu können (s. Bild 1), zum anderen wurde der Einfluss der Richtung der Zentrifugalkraft auf die Bildung von Porosität in den thermischen Solver implementiert.

In Bild 2 wird anhand einer Beispielgeometrie der Einfluss der Zentrifugalkraft auf die Bildung von Porosität dargestellt. Während in Bild 2 oben lediglich der Schwerkrafteinfluss berücksichtigt wurde, ist im unteren Teil ersichtlich, wie die Porosität unter Berücksichtigung der Zentrifugalkraft zum Zentrum des Gussteils wandert. Eine weitere Validierung der Porositätsvorhersage ist in den folgenden Abschnitten zu finden.

Durch das Füllen bedingte Defekte, wie beispielsweise Einschlüsse, sind oftmals in den zuletzt gefüllten Bereichen zu finden, da sie während des Füllvorgangs mit der freien Oberfläche des flüssigen Metalls transportiert werden. Im zuletzt gefüllten Bereich der würfelförmigen Struktur treffen auch Metallströme aus unterschiedli-

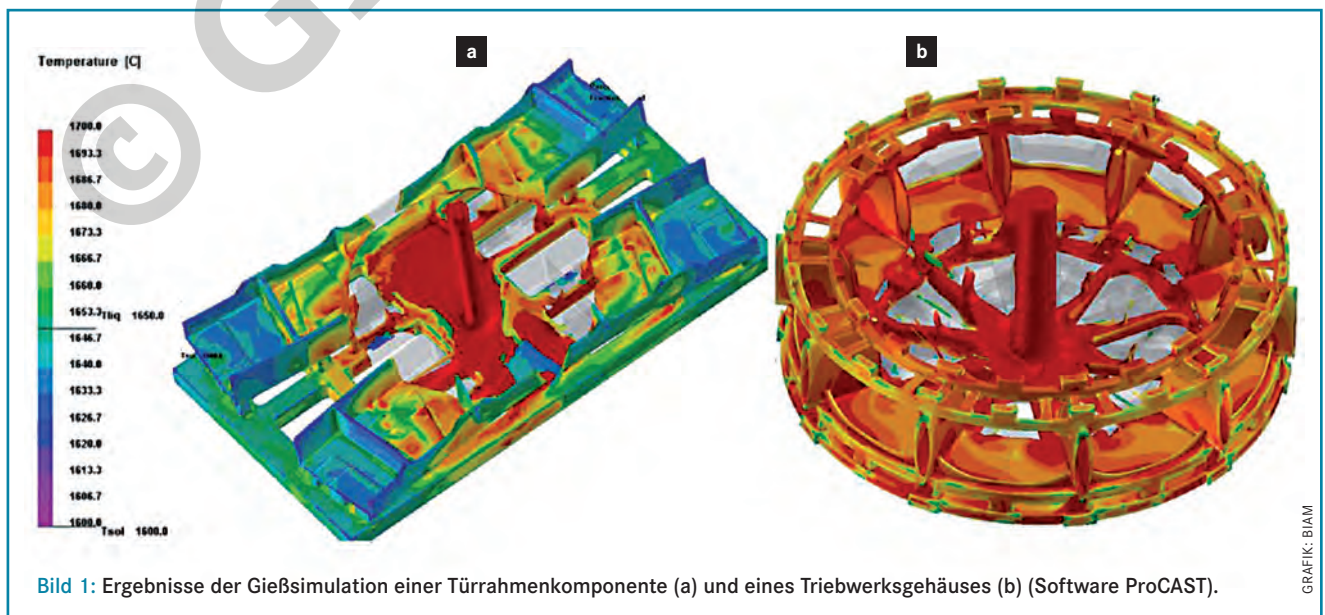
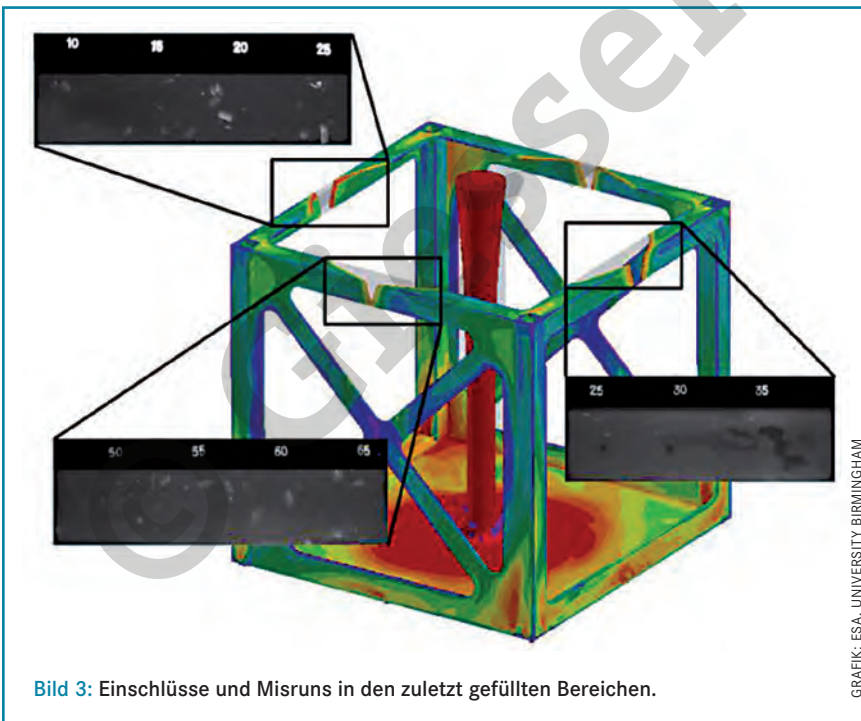
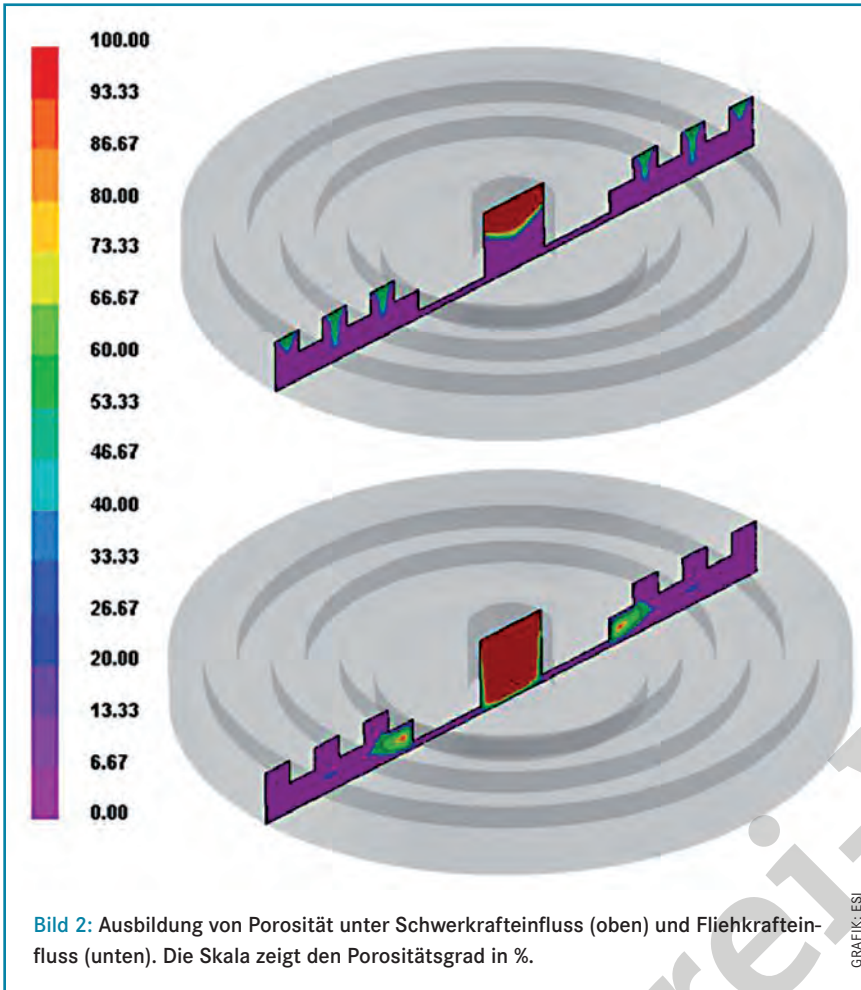


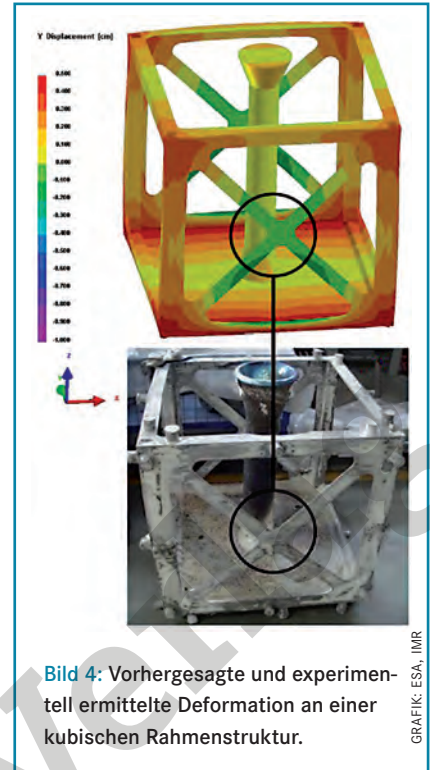
Bild 1: Ergebnisse der Gießsimulation einer Türrahmenkomponente (a) und eines Triebwerksgehäuses (b) (Software ProCAST).

GRAFIK: BIAM



chen Richtungen zusammen, was zu einem schlecht ausgelaufenem Guss führen kann, wenn diese Temperaturen nahe am Schmelzpunkt von TiAl liegen. In den **Bild 3** dargestellten Ergebnissen der Füllsimulation eines großen kubischen Rah-

menelements mit der Kantenlänge 1 m sind die zuletzt gefüllten Bereiche ersichtlic und um Röntgenbilder dieser Regionen ergänzt. Der Vergleich zeigt, dass die Simulationsergebnisse gut mit den experimentellen Beobachtungen übereinstimmen.



Ein weiteres großes Problem beim Feingießen großer dünnwandiger Komponenten ist die Tendenz zu unerwünschten Deformationen, die zu einer Überschreitung der festgesetzten Toleranzen führen können. **Bild 4** zeigt den Vergleich von simulationstechnisch (oben) und experimentell (unten) ermittelten Deformationen an dem großen würfelförmigen Rahmen. Der Grund für die Deformation liegt in den unterschiedlichen Wanddicken von äußerem Rahmen und den inneren Querstreben, was zu ungleichförmigen Temperaturverteilungen bei Erstarrung und Abkühlung führt. Die dünneren inneren Querstreben erstarren schneller, wodurch an den inneren Ecken des äußeren Rahmens aufgrund des induzierten Schrumpfens Zug auftritt, der wiederum zu einer elasto-plastischen Deformation in den Eckenbereichen führt. Da Erstarrung und Schwindung des äußeren Rahmens später eintreten, werden die inneren Querstreben (die durch die plastische Deformation quasi verlängert sind) bezogen auf die durch den quadratischen Rahmen gebildete Ebene um einige Millimeter nach außen gebogen (**Bild 4** unten). Dieses Verhalten konnte in der Simulation mit hoher Übereinstimmung reproduziert werden.

### Prozessentwicklung durch Modellierung

Nach der vorab beschriebenen Validierung der ProCAST-Simulationssoftware

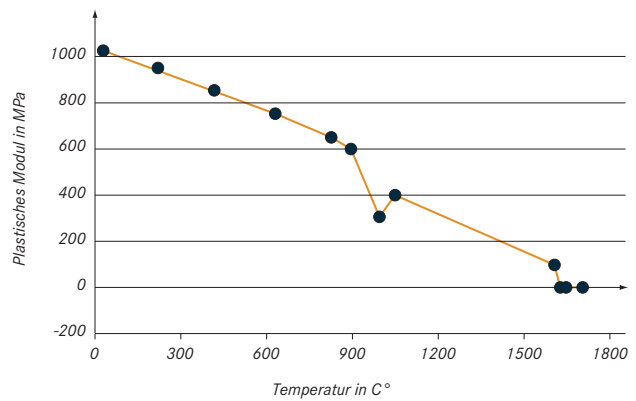
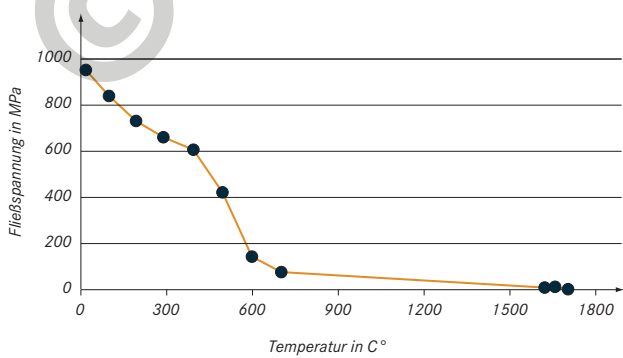
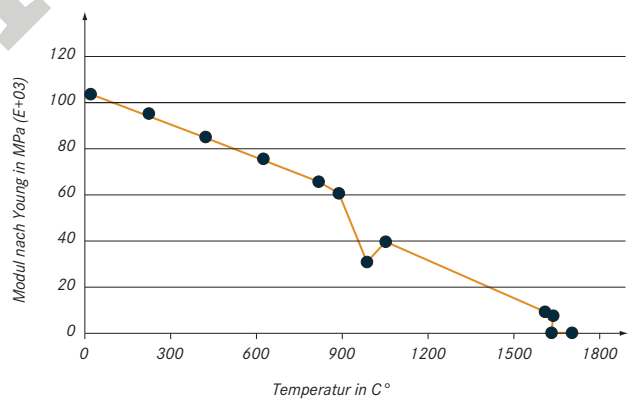
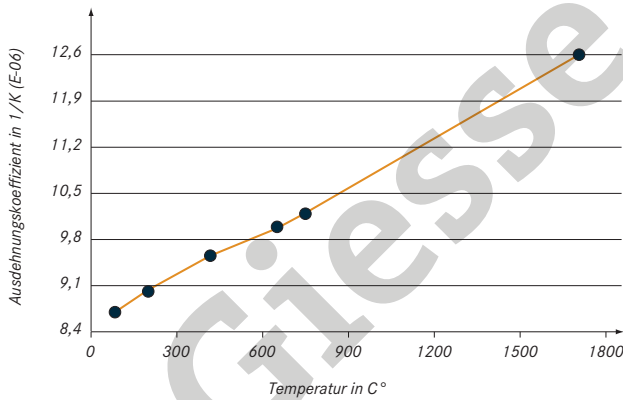
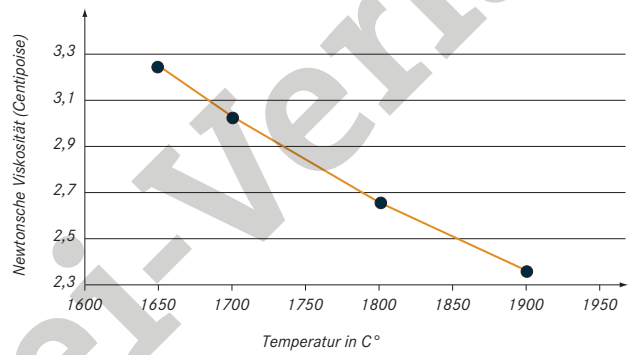
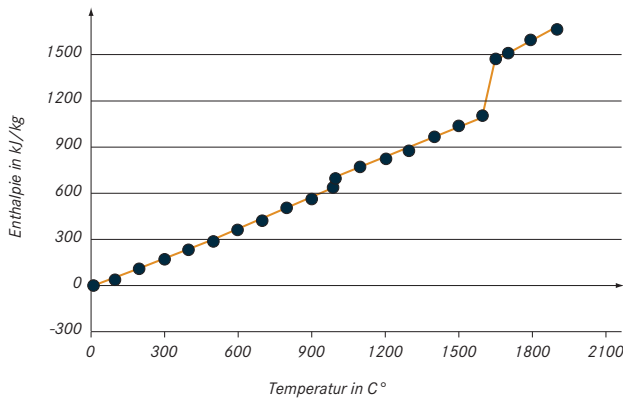
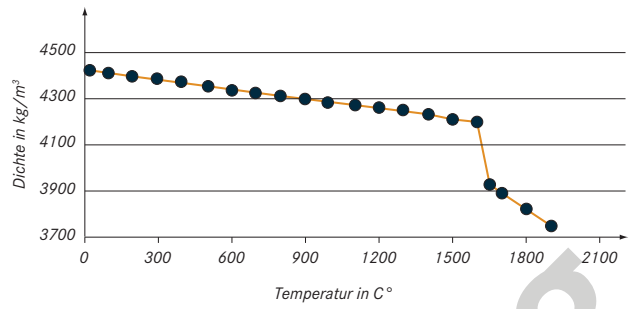
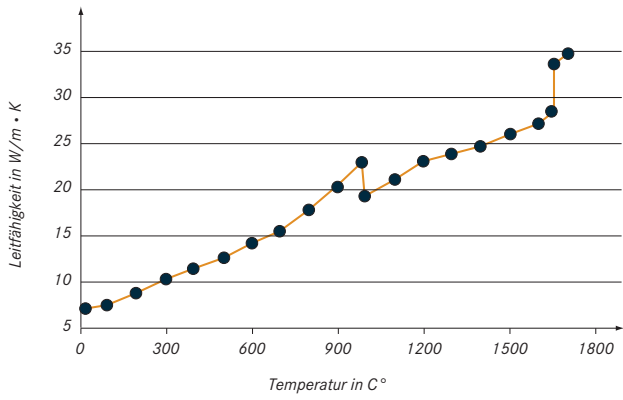


Bild 5: Materialeigenschaften von Ti-6Al-4V.

GRAFIK: ESI

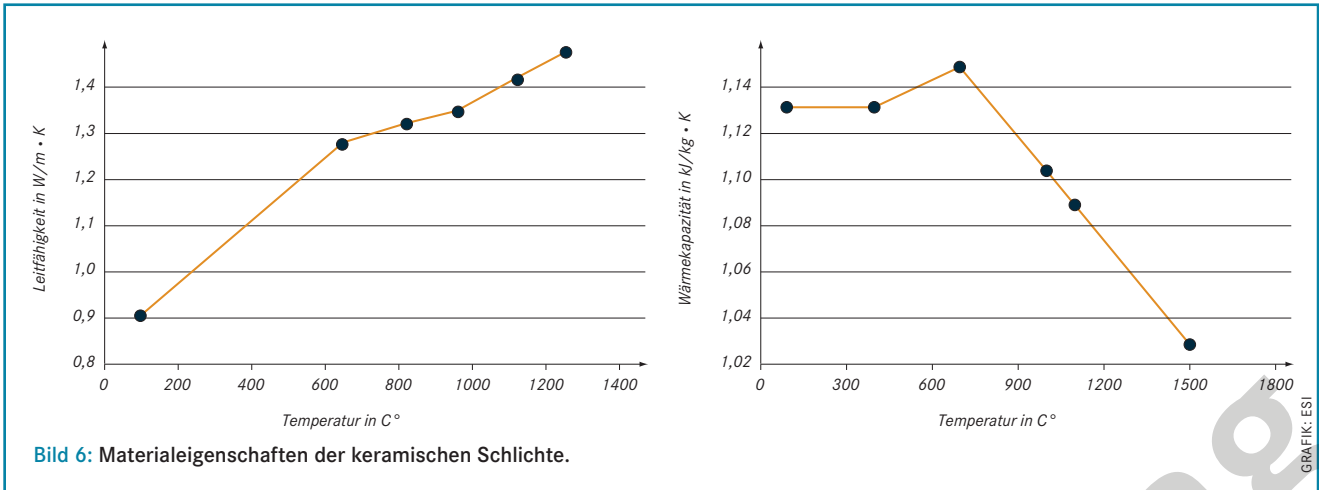


Bild 6: Materialeigenschaften der keramischen Schichte.



Bild 7: Ausgangsversion des Prozessdesigns.

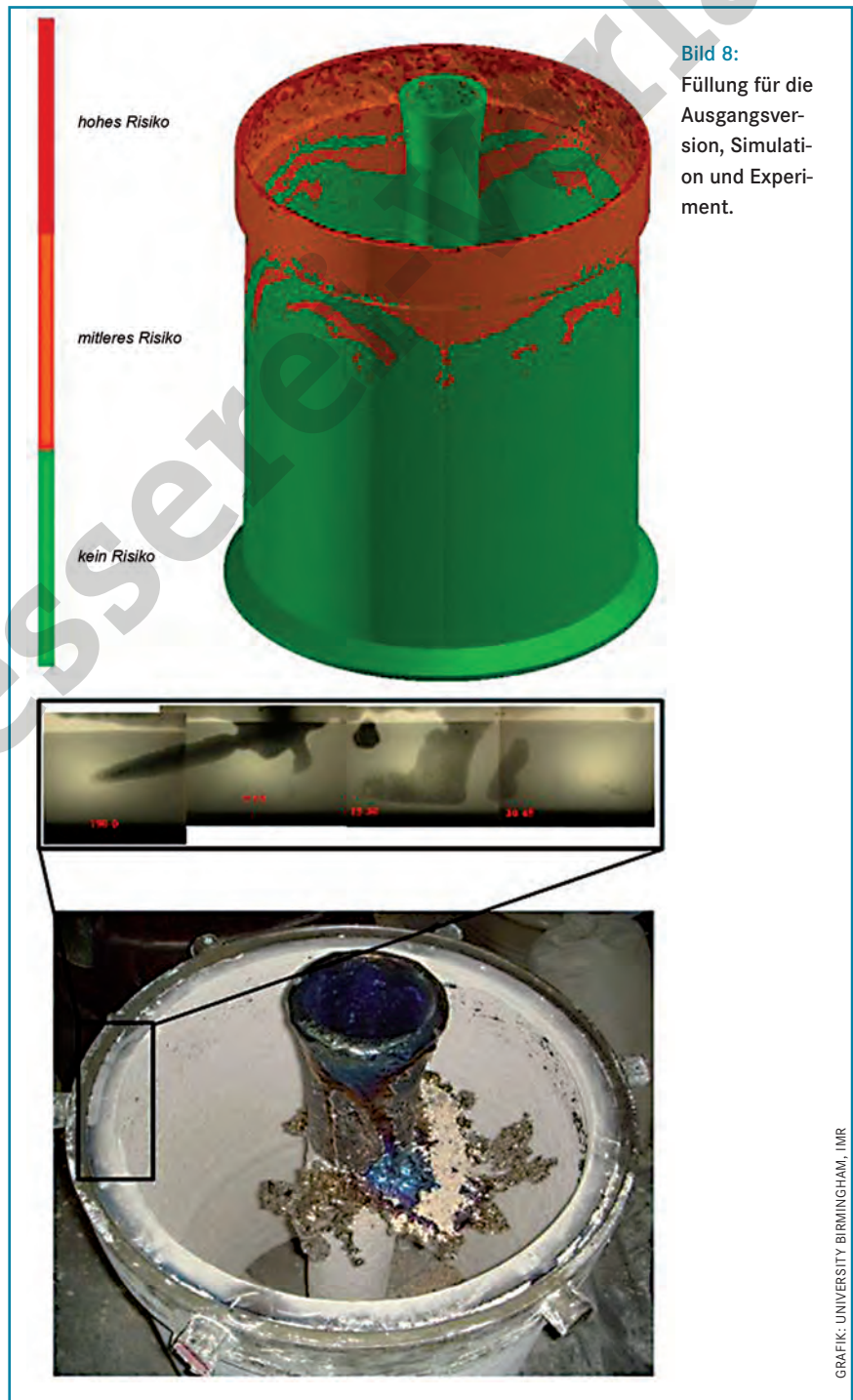


Bild 8: Füllung für die Ausgangsversion, Simulation und Experiment.

für Schleudergussanwendungen wurden mit der Software anschließend geeignete Design- und Prozessparameter für die betrachteten Gussteile ermittelt. Die Optimierung des Prozessdesigns wurde dabei exemplarisch für eine der vier verfügbaren Geometrien durchgeführt, wobei es sich um eine zylindrische Strukturkomponente der ESA handelt.

Zuerst werden dabei die für die Modelldefinition notwendigen Parameter beschrieben, um anschließend die unterschiedlichen Schritte im Prozessdesign näher zu erläutern.

### Prozessparameter und Setup für das Simulationsmodell

Im Folgenden sind die Prozessparameter und das Setup für das Simulationsmodell der ausgewählten zylindrischen Geometrie aufgeführt.

- > Temperatur: 1700 °C,
- > Massenflussrate von der Pfanne: 37,5 kg/s,
- > Rotationsfrequenz: 200 U/min.

Weitere temperaturabhängige Materialeigenschaften sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt.



Bild 9: Erste Modifikation des Simulationsmodells.

GRAFIKEN: ESA



Bild 10: Simulierte und gemessene Porositätsverteilung in der dünnwandigen Zylinderregion – Ausgangsdesign.

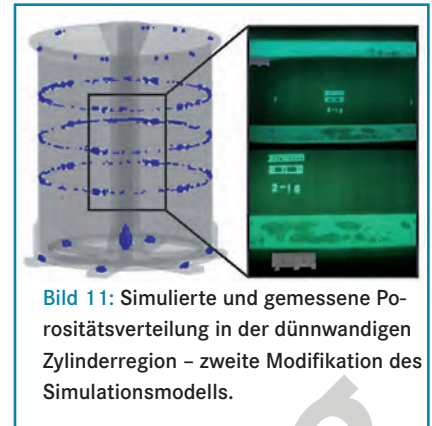


Bild 11: Simulierte und gemessene Porositätsverteilung in der dünnwandigen Zylinderregion – zweite Modifikation des Simulationsmodells.

Die elastischen Eigenschaften der keramischen Schichte wurden wie folgt festgelegt:

- > E-Modul: 20 000 MPa,
- > Poissonzahl: 0,3,
- > Wärmeausdehnungskoeffizient:  $6 \cdot 10^{-6}/K$ .

Der Wärmeübergangskoeffizient für den Übergang zwischen Metallschmelze und Keramik wurde mit  $400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angesetzt. Für die äußeren Randbedingungen wurden ein Emissionsgrad von 0,7 und eine Außentemperatur von  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  gewählt.

### Aufbau des Simulationsmodells für die Entwicklung von Gießprozessen – Anwendung und Ergebnisse

Der prinzipielle Geometrieaufbau lässt sich wie folgt beschreiben: die zylindrische Grundform besteht aus einem Hohlzylinder mit einer Wanddicke von 4 mm. Im oberen und unteren Teil befinden sich Bereiche mit größeren Wanddicken. Es wurde ein erstes Angussystem konstruiert, bei dem das Füllen durch die Mittelachse erfolgt und die Schmelze über vier Ängüsse in die zylindrische Kavität geleitet wird (Bild 7).

Die dickeren Bereiche im oberen und unteren Teil benötigen mehr Metall und höhere Temperaturen, um ein einwandfreies Füllen zu gewährleisten. Die großen Fließlängen in Kombination mit der Notwendigkeit, dünnwandige Bereiche zu durchströmen, bedeuten ein hohes Risiko für eine unterbrochene Füllung gegen Ende des Füllvorgangs, wenn die Metall-

temperaturen sich bereits im niedrigen Bereich befinden.

Bild 8 oben zeigt die Füllprobleme, die durch die Simulation bei dieser ersten Variante identifiziert wurden. Bild 8 unten zeigt die Validierung dieser Vorhersage durch ein reales Experiment, bei dem teilweise ungefüllte Bereiche festzustellen sind (s. auch Röntgenbildbereich rechts oben).

Zur Beseitigung dieser Füllprobleme wurden im Folgenden zwei Maßnahmen ergriffen (s. Bild 9). Zum einen wurde die Zahl der Ängüsse von vier auf sechs erhöht. Zum anderen wurde der Zylinder um  $180^\circ$  gedreht, um so die massiveren Teile zuerst zu füllen. Außerdem wurden Anguss und Gießtrichter an diese Modifikationen angepasst. Diese Maßnahmen eliminierten das Risiko einer unterbrochenen Füllung in der Gießkavität, was auch durch die realen Versuche bestätigt wurde. Die Simulationsergebnisse und die aktuelle Validierung sind in diesem Beitrag nicht aufgeführt.

Während das Füllverhalten des Systems durch das modifizierte Design deutlich verbessert wurde, konnte dank der Simulation gleichzeitig ein Problemfeld für die Bildung von Porosität identifiziert werden. Der dünnwandige Zylinderbereich mit konstanter Wanddicke erstarrt insgesamt in einer relativ kurzen Zeit. Dies führt zu einem geringen Temperaturgradienten, wodurch ein hohes Risiko für die Ausbildung von Porosität entsteht. In Bild 10 sind breit verteilte Mikroporositäten sichtbar, die sowohl in den Simulationsergebnissen als auch im Röntgenbild des realen Gusses beobachtet werden konnten. Dieses Problem wurde durch ei-

ne weitere Designänderung gelöst. Auf der Innenseite des Zylinders wurden drei horizontale Ringe hinzugefügt, um so lokale Temperaturgradienten zu erzeugen und die Porosität von den langen dünnen Zylinderbereichen in die dickeren Ringbereiche zu ziehen (Bild 11). Diese Ringe wurden später in einem zusätzlichen Arbeitsgang maschinell entfernt, um ein einwandfreies Gussteil zu erhalten.

### Fazit

Der Beitrag beschreibt die Einbindung zusätzlicher Funktionalitäten für die Simulation großer dünnwandiger Strukturkomponenten aus TiAl. Der Modellierungsansatz wurde anhand unterschiedlicher industrieller Anwendungsfälle validiert, wobei eine gute Übereinstimmung zwischen Testergebnissen und Simulation hinsichtlich der Vorhersage der Füllung, der Porosität und der Deformationen erreicht werden konnte. Die implementierten Erweiterungen ermöglichen den Einsatz von Simulationssoftware in der frühen Entwicklungsphase des Schleudergießprozesses für große dünnwandige Titan-Strukturen und unterstützt Ingenieure, potenzielle Probleme frühzeitig zu identifizieren und bessere Gussteile zu entwickeln.

*Diplom Physiker Ole Köser und Dipl.-Ing. Badarinath Kalkunte, Calcom ESI SA, Lausanne, Schweiz, Dr. Rui Yang, Institute of Metal Research (IMR), Shenyang, China, und Dr. Hai Nan, Beijing Institute of Aeronautic Materials (BIAM), Beijing, China*