

Kernsimulation

Effiziente Prozessoptimierung in der Gießerei

Core Simulation – Effective Process Optimization in the Foundry



Dr.-Ing. Ingo Wagner,
Gießerei-Ingenieur im Bereich Entwicklung bei der MAGMA Gießertechnologie GmbH in Aachen, D



Dr. Marc Schneider,
Leiter Entwicklung bei der MAGMA Gießertechnologie GmbH in Aachen, D

Schlüsselwörter: Simulation, Gießprozess-Simulation, Kernsimulation, Kernschießsimulation, Prozessoptimierung, Kernschießen, Kernaushärtung, Kernherstellung, Sandkern, Modellierung

Sandkerne bilden die Hohlräume von Gussteilen ab und sind just in time in erforderlicher Qualität und kostengünstig verfügbar – diesen Zustand wünscht sich jeder Gießer. Die Realität in der Gießerei sieht häufig anders aus. Die Kernherstellung birgt nach wie vor Überraschungen, und kernbedingte Gussfehler sind wegen der zusätzlichen Nacharbeit ein erheblicher Kostenfaktor bei der Gussteilproduktion. Mit zunehmender Komplexität der Gussteile steigen auch die Anforderungen an die Kerne.

Heute besteht bei der Konstruktion eines geometrisch komplizierten Gussteils eine erhebliche Unsicherheit dahingehend, ob die notwendigen Sandkerne technisch und wirtschaftlich gefertigt werden können. Diese Unsicherheit erschwert schon in der Planungsphase die bedarfsgerechte Auslegung des Gussteils. Die Auslegung von Kernwerkzeugen erfolgt mit Erfahrungswissen und durch Ausprobieren, bis eine ausreichende Kernqualität erreicht wird. Das Einfahren eines neuen Werkzeugs bis zur Serienreife erfordert regelmäßig mehrere zeit- und kostenintensive Optimierungszyklen, einschließlich der praktischen Erprobung unter Serienbedingungen. Jeder Erprobungsschritt führt zu mehr oder weniger aufwändigen Veränderungen am Werkzeug, ohne dass der Gießereifachmann wirklich sicher sein kann, dass die Maßnahmen zum gewünschten Erfolg führen. Eine wissenschaftliche Durchdringung der Vorgänge ist bisher nicht im notwendigen Umfang erfolgt. Eindeutige Ursache-Wirkungs-Prinzipien, die über das Erklären von Phänomenen hinausgehen, gibt es nicht.

Wichtige variable Parameter beim Kernschießen sind:

- die Position, Art und Dimensionierung der Schieß- und Entlüftungsdüsen,
- der Schießdruck und
- das Sand-Binder-Gemisch (Sandart, Bindervariante und Bindergehalt).

Das Einfahren des Werkzeugs bis zu einem wirklich zufriedenstellenden Zustand kann mehrere Wochen dauern. Zeit- und Kostenaufwand werden selten produktbezogen erfasst, erhöhen aber die Gemeinkosten nicht unerheblich.

Zukünftig erweitert die Simulation der Herstellung von Sandkernen die Planbarkeit der Gussfertigung um einen entscheidenden Schritt. Die technische und die wirtschaftliche Mach-

barkeit von Sandkernen werden berechenbar. Bereits bei der Planung eines Gussteils können die Kernfertigung und die Prozessabläufe virtuell abgebildet werden. Der gesamte Prozessablauf und die relevanten physikalischen Größen werden transparent. Dadurch werden außerdem das Verständnis der ablaufenden Vorgänge erweitert und die praktische Umsetzung qualitätsverbessernder Maßnahmen erleichtert. Auch der Modellbauer erhält einen dreidimensionalen Einblick in die Kernherstellung und kann die Konstruktion des Kernwerkzeugs effizienter auf die Anforderungen der Serienfertigung ausrichten.

Modellierung des Kernschießens

Die Modellierung des Kernschießens ist wegen der notwendigerweise zu berücksichtigenden Unterschiede bei der Strömung von Luft und Sand ein extrem anspruchsvoller Vorgang. Der Fließvorgang ist anders als beim Formfüllen mit Metallschmelzen. Die physikalisch-mathematische Modellbildung ist an die tatsächlich ablaufenden Vorgänge anzupassen. Die Wechselwirkungen von Luft und Sand untereinander und mit ihrer Umgebung (Schießzylinder, Düsen, Werkzeug) erfordern zusätzlich die Berücksichtigung technologischer Randbedingungen und die Integration von Fachwissen. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus den Projektarbeiten im Rahmen eines vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF geförderten Vorhabens [1] wurde das Simulationsmodell an die praktischen Ergebnisse angepasst und anschließend erfolgreich verifiziert.

Zur Beschreibung der Dynamik von Luft-Sand-Gemischen beim Kernschießen wurde nach Analyse der bekannten Modelle, z. B. [2 bis 4], ein Ansatz gewählt, bei dem Luft und Sand bzw. Sand-Binder-Mischungen als separate Phasen behandelt werden [5]. Neben der dominanten Impulsübertragung zwischen Luft und Sand wird die Wechselwirkung der Sandkörner untereinander berücksichtigt (Bild 1).

Zur Prozessmodellierung gehört auch die Berücksichtigung maschinentechnischer Größen, wie die Art und Weise des Druckaufbaus im Schießzylinder. Schießdüsen verbinden gewissermaßen die Kernschießmaschine mit dem Kernwerkzeug. In der Praxis der Kernfertigung gibt es eine große Zahl individuell gestalteter Schießdüsengeometrien. Deren Eigenschaften werden über Druckabfallgesetze modelliert. Zur Entlüftung von Kernbüchsen werden Düsen verschiedener Bauarten und Größen verwendet. Die schmalen Düsenöffnungen halten den Kernsand im Werkzeug zurück und lassen die Schießluft entweichen. Experimentell kalibrierte Strömungsgesetze gewährleisten die realistische Modellierung des Druckabfalls an den Entlüftungsdüsen.

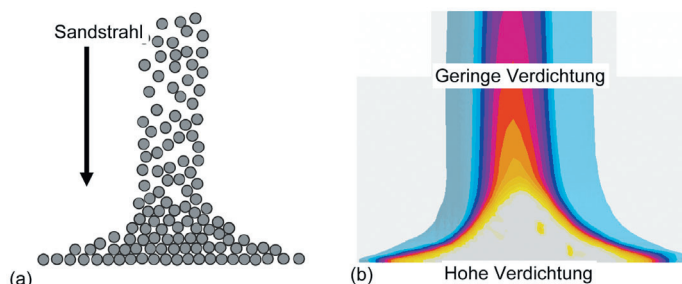


Bild 1: Anschauliches Kugelmodell (a) und 3D Simulation (b) einer Sandverdichtung. Bei geringem Verdichtungsgrad stoßen Sandkörner im Luftstrom zufällig zusammen und tauschen Energie aus. Bei höherem Verdichtungsgrad ist die Reibung zwischen Sandkörnern der bestimmende Mechanismus zum Austausch von Energie und der resultierenden Sandbewegung.

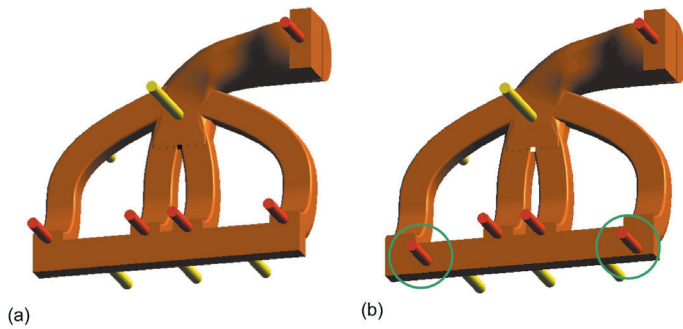


Bild 2: Geometrieansicht eines Krümmerkerns mit unterschiedlichen Schießdüsenpositionen (rot).

Experimentelle Validierung der Kernschießsimulation

Um das Kernschießen realitätsnah simulieren zu können, war es notwendig, die ablaufenden Vorgänge simulationsrelevant zu erfassen und die erforderlichen Daten für die Berechnung zur Verfügung zu haben. Im oben genannten Forschungsprojekt mit Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen wurden diese Fragestellungen angegangen [1, 6]. In grundlegenden Experimenten wurden die Eigenschaften von Kernsanden untersucht. Kernschießexperimente dienen dem Verständnis der hoch dynamischen Vorgänge und dem Vergleich der Simulation mit der Realität. Die Experimente erfolgten an instrumentierten Maschinen und Versuchseinrichtungen.

Das Fließverhalten eines Kernsandes in ein Werkzeug wird wesentlich von seiner Fließfähigkeit bestimmt. Die granularen Sandmischungen weisen keine physikalisch messbare Viskosi-

tät auf, wie sie von Flüssigkeiten bekannt ist. Über den Vergleich des realen Fließverhaltens mit der Simulation wurden solche nicht direkt messbaren Eigenschaften bewertet und kalibriert. Die systematische Variation von Sanden und Bindern erlaubte es, die Kernsande zu kategorisieren. Für die Simulation wurde eine Datenbank aufgebaut, in die Messwerte und bewertete Erfahrungswerte gleichermaßen eingeflossen sind.

Anwendung der Kernschießsimulation

Die Simulation löst den realen Prozess räumlich und zeitlich detailliert auf. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt erhält man Ergebnisse und Kriterien. Bereits vor Fertigung einer Kernbüchse ist es sinnvoll, die Düsen bestmöglich zu positionieren. Effekte, die sich beispielsweise durch Variation von Schießdüsen ergeben (Bild 2), können objektiviert ausgewertet und bewertet werden.

Die visuelle Analyse des Füllvorgangs ermöglicht bereits eine effiziente vergleichende Bewertung verschiedener Konfigurationen (Bild 3). Kleine Veränderungen von Düsenpositionen können entscheidenden Einfluss auf die Dynamik des Füllvorgangs und die zu erwartende Kernqualität haben. Für jede Schießdüse wird ein andersfarbiger Sand verwendet. Es wird dargestellt, welche Düse welches Volumen füllt. Das Zusammenfließen von Sandfronten ist oft eine Ursache von Kernfehlern, wenn an diesen Stellen nicht richtig entlüftet wird. Die Grenzflächen, an denen Sandfronten zusammentreffen und sich teilweise vermischen, können mit Hilfe der Simulation an der Oberfläche und im Volumen analysiert werden. Kompliziertere Kerne, wie z.B. Wassermantelkerne, erfordern eine differenziertere Analyse. Hierzu stehen weitere Ergebnisse, wie lokale Geschwindigkeiten von Luft und Sand sowie aussagekräftige Kurvendaten zur Verfügung.

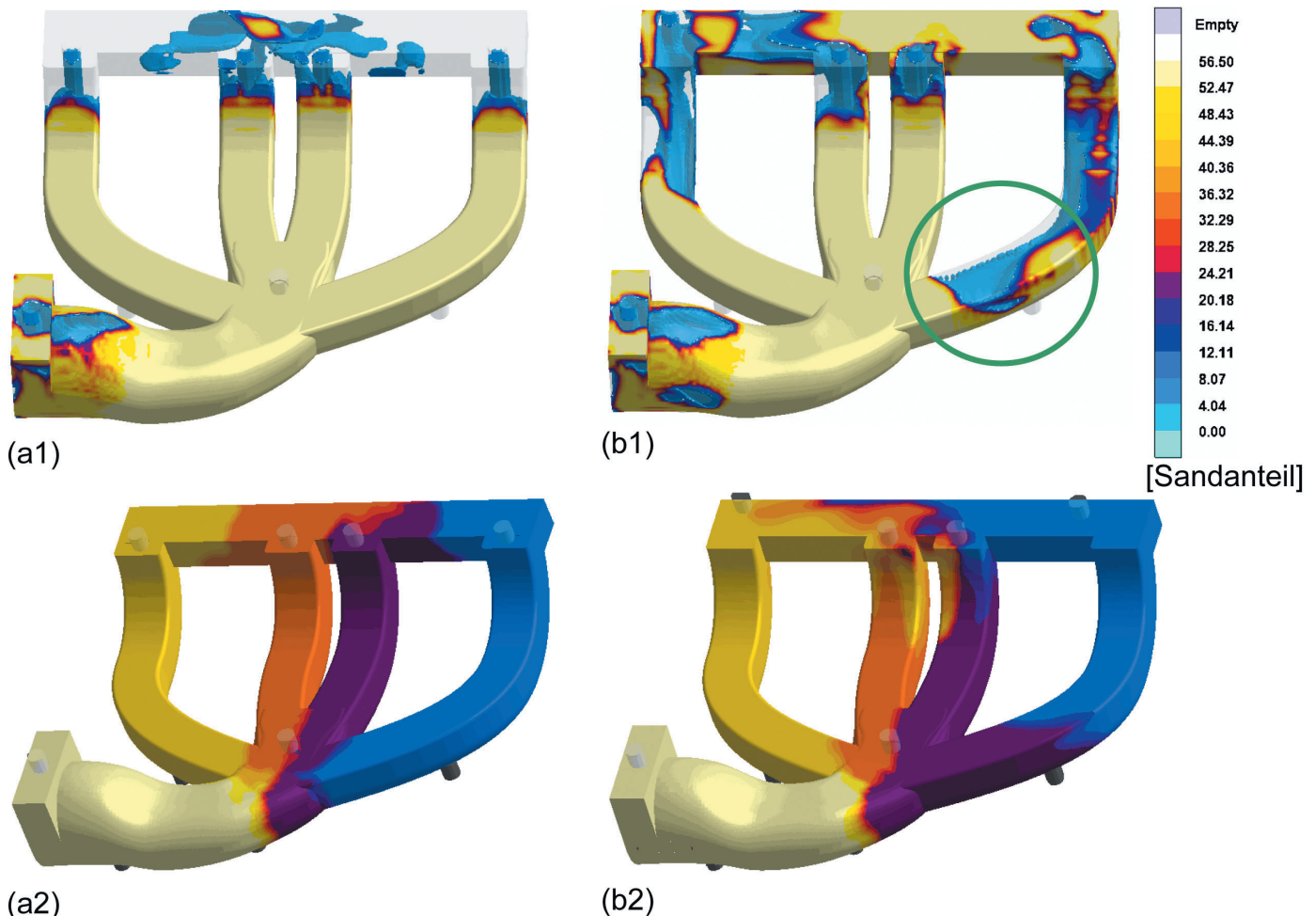


Bild 3: Analyse der Füllsequenz eines Kerns für unterschiedliche Schießdüsenpositionen. Während die Kernbüchse bei (a) gleichmäßig gefüllt wird, ist bei Situation (b) sofort erkennbar, dass hier Problemzonen (z.B. grüne Markierung) zu erwarten sind. Durch Verwendung farbiger Sande (unten) wird die Effizienz einzelner Düsen bewertbar.

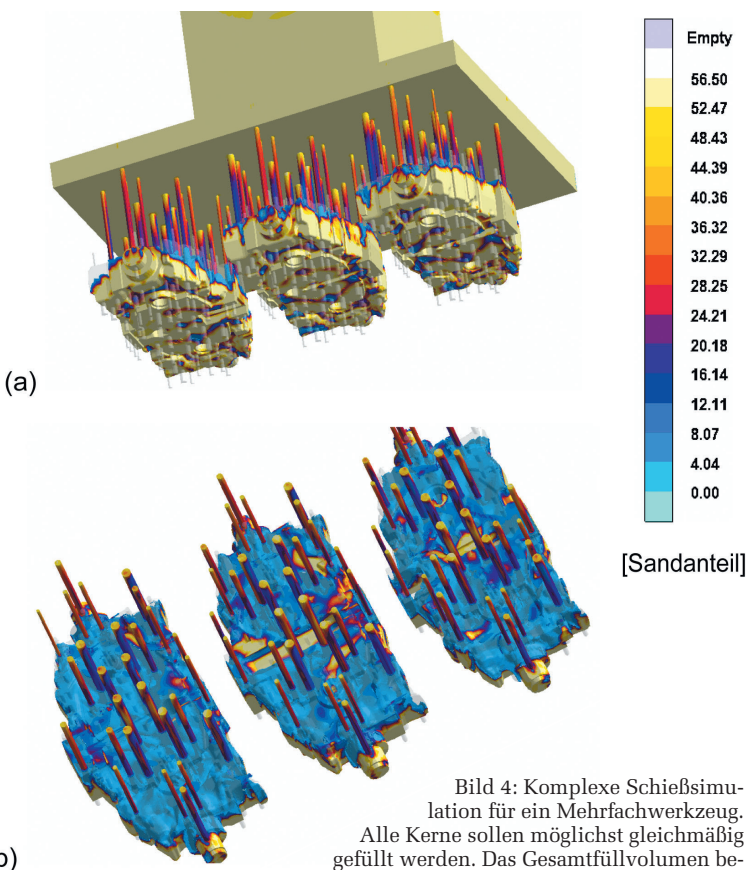


Bild 4: Komplexe Schießsimulation für ein Mehrfachwerkzeug. Alle Kerne sollen möglichst gleichmäßig gefüllt werden. Das Gesamtvolumen beträgt etwa 53 Liter. 85 Schießdüsen und etwa 400 Entlüftungsdüsen waren zu positionieren. Ansicht der Kerne von unten mit Schießkopf (a) und von oben mit ausgeblendetem Schießkopf (b)

Bei der Simulation des Kernschießens ist je nach Zielsetzung zu entscheiden, ob der Prozess auch mit den relevanten Einheiten der Kernschießmaschine abgebildet werden muss oder ob es ausreicht, an den Schießdüsen geeignete Randbedingungen festzulegen. Die Berücksichtigung der Maschine ist mit einem höheren Aufwand verbunden, aber nur so können Füllprobleme von Kernwerkzeugen berücksichtigt werden, die maschinenseitig verursacht werden. Insbesondere bei Verwendung von Mehrfachwerkzeugen liegen komplexe Füllsituationen vor. Hier ist beispielsweise zu prüfen, ob alle Kerne gleichmäßig gefüllt werden können (Bild 4). Wichtig wird die Berücksichtigung des Schießkopfes, wenn dessen Sandfüllstand während des Schießens so niedrig wird, dass Durchschüsse an einzelnen Düsen den Schießvorgang verändern.

Modellierung der Kernaushärtung mit Gas

Der Transport von Gas durch den offenen Porenraum von Sandkernen charakterisiert den Strömungsvorgang bei der Kernaushärtung. Die

Gasgeschwindigkeit ist dabei eine Funktion des Druckgradienten und wird durch ein Darcy-Gesetz beschrieben. Die gängigen Härtungsmechanismen, wie Gashärtung (z. B. PUR-Cold-Box) oder Trocknungshärtung (anorganische Binder), können durch Anwendung geeigneter Modelle simuliert werden [6].

Bei der Gasaushärtung wird ein Gasgemisch aus Luft und aushärteaktiver Komponente in den geschossenen Kern eingeleitet. Denkbare Mechanismen für den Gastransport sind hier z. B., dass die aushärtende Komponente, wie Amin, den Porenraum durchströmt. Dabei kann mit hinreichender Genauigkeit angenommen werden, dass alle von Amin erreichten Positionen spontan aushärten. Eine andere Möglichkeit ist der zeitlich verzögerte Transport der Aushärtekomponente, wo Amin zunächst lokal adsorbiert und nach zeitlicher Verzögerung zumindest teilweise wieder desorbiert wird.

Bei der Auslegung von Kernwerkzeugen muss beachtet werden, dass alle Kernbereiche ausreichend vom Aushärtegas durchströmt werden. Eine für das Kernschießen günstige Entlüftung, mit vergleichsweise viel Entlüftungsfläche, kann bei der Begasung dazu führen, dass Kernbereiche nicht vom Aushärtegas durchströmt werden und nicht innerhalb der Zykluszeit aushärten. Bei der Aushärtung ist es günstiger, wenn eine geringere Entlüftungsfläche vorhanden ist und das Aushärtegas möglichst viel Kernsand durchströmen muss, bevor es über Entlüftungsdüsen entweichen kann. Eine lange Verweilzeit von Aushärtegas im Kern führt auch zu einem diffusionsgesteuerten Transport von Aushärtegas in schlecht durchströmte Bereiche.

Angewendet auf eine reale Kernproduktion ergibt sich für Gasaushärtung und Spülprozess eine dreidimensional räumlich und zeitlich komplexe Strömungssituation (Bild 5). Am Ende der aktiven Aminzufuhr hat Amin regelmäßig noch nicht den gesamten Kern erreicht. Diese Bereiche härten dennoch aus, wenn die Spülluft im weiteren Verlauf noch aminhaltige Luft in diese Bereiche treibt. Aus den Simulationsergebnissen ist am Ende des Spülvorgangs klar erkennbar, ob es im Kern Bereiche gibt, die nie mit aminhaltigem Gas in Berührung waren. Im vergleichenden Experiment wurden nach Abblasen des Kerns mit Druckluft Bereiche gefunden, die nicht ausgehärtet waren (Bild 6).

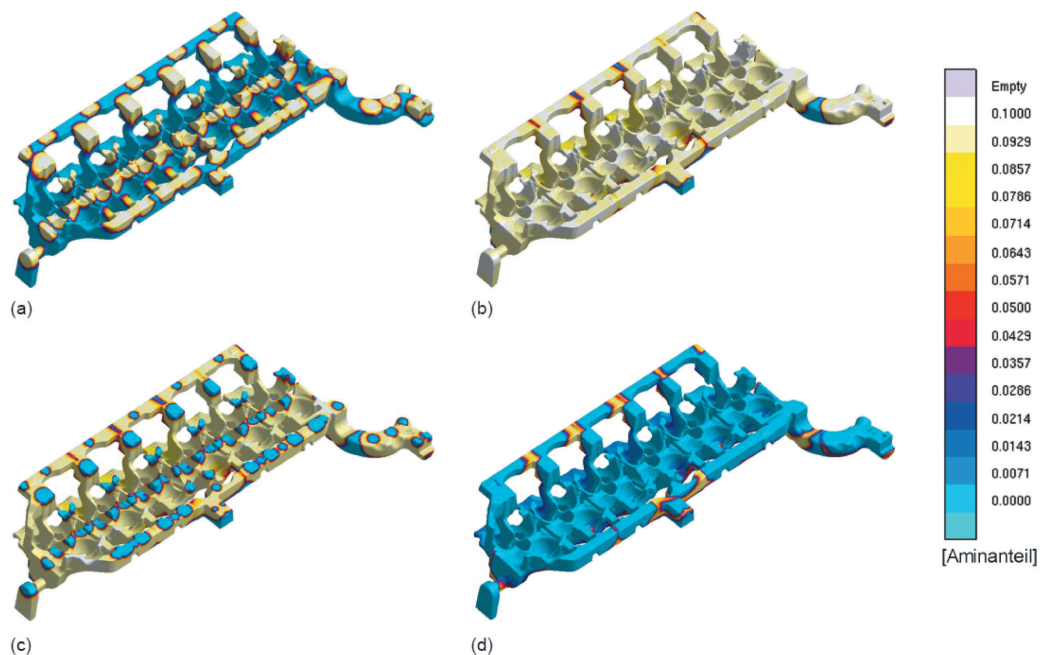


Bild 5: Simulation der zweistufigen Begasungsaushärtung für das PUR Cold-Box Verfahren. Zunächst ist im Luft-Zustrom eine zweite Gaskomponente (Amin) zur Aushärtung enthalten und die Luft im Porenraum wird verdrängt (a, b). Anschließend wird das aminhaltige Gas von der nachströmenden Luft "ausgespült", (c, d). Die Farbskala definiert den Aminanteil im Gesamtgasgehalt im Porenraum. Ein Anteil von 0,1 entspricht 10%.

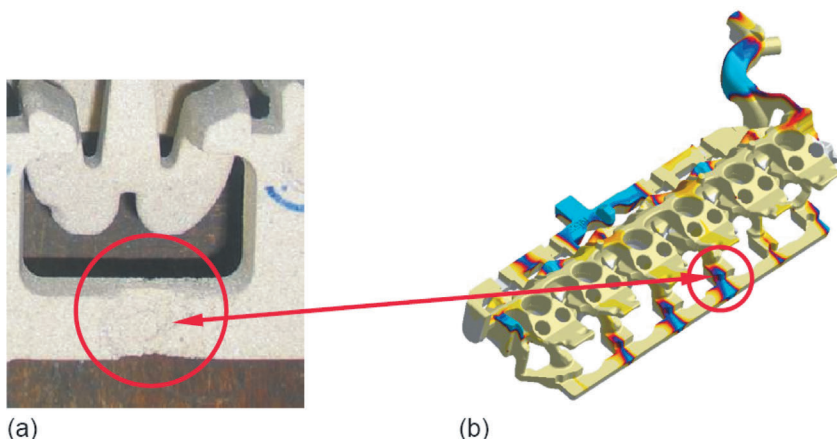


Bild 6: Fehlstelle beim Aushärten eines Wassermantelkerns (a) und in der Simulation identifizierte Bereiche (b), die nicht aushärteten.

Die Simulation ist ein effektives Werkzeug, kritische Bereiche für die Aushärtung differenziert zu analysieren und Optimierungsmaßnahmen mit geringstem Aufwand zu realisieren. Für den dargestellten Kern konnte unter Produktionsbedingungen die verwendete Aminmenge ohne Qualitätseinbuße auf nur noch 10 % drastisch reduziert werden. Kosten können eingespart sowie Arbeitsplatz- und Umweltbelastung reduziert werden.

Simulation der Trocknungshärtung von anorganisch gebundenen Kernen

Anorganische Binder werden zunehmend industriell angewendet und werden zukünftig einen erheblich steigenden Anwendungsgrad erreichen [7]. Die Kernfestigkeit entsteht über eine überwiegend reversible Trocknungshärtung in beheizten Kernbüchsen. Modelliert werden der Wärmefluss im Kernsand und die damit verbundene Verdunstung von Binderwasser. Damit verbunden sind die gleichzeitige Aufnahme von Wasserdampf

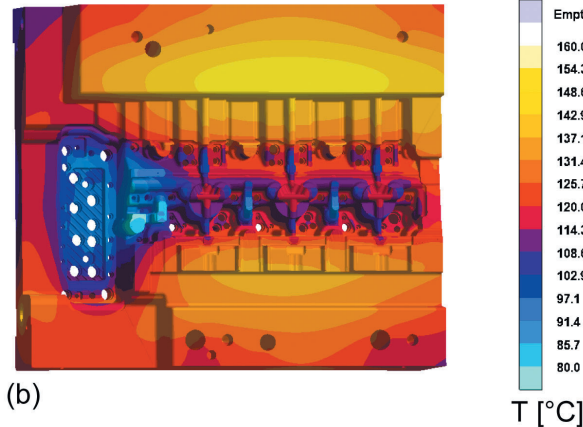
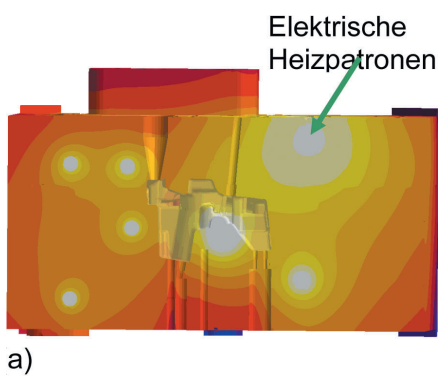


Bild 7: Elektrisch beheiztes Werkzeug im Querschnitt (a) und geöffnetes Werkzeug (b) mit ungleichmäßigem Temperaturfeld. Im stationären Betrieb ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung erwünscht. Die Simulation ermöglicht eine Optimierung, bevor das Werkzeug gebaut wird.

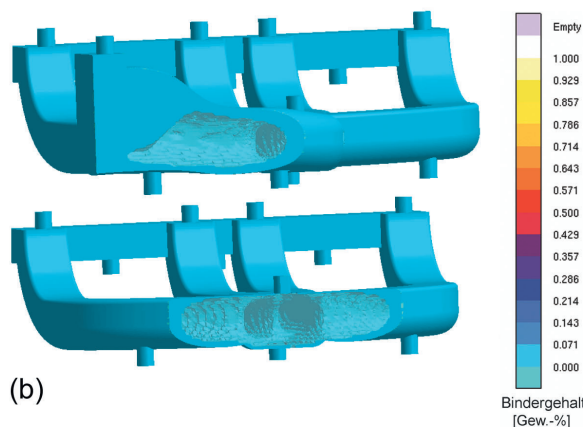


Bild 8: Ausgehärtete Randschale des realen Kerns (a) und Randschalenquerschnitte an verschiedenen Positionen des simulierten Vergleichskerns, (b). Wenn der Binderwassergehalt einen definierten Wert unterschreitet, ist der Kern ausgehärtet. Die Randschale kann für jede Position des Kerns bewertet werden.

(a)

(b)

durch Trocknungsluft sowie der Transport des Wasserdampfes aus dem Porenraum durch den Heißluftstrom. Die Modelle berücksichtigen ebenfalls Kondensationseffekte. An der heißen Werkzeugwand verdampftes Binderwasser kann in kälteren Regionen im Kerninneren wieder kondensieren.

Die Aushärtung anorganisch gebundener Sande ist physikalisch komplex. Ziel der Simulation ist es, die in temperierten Werkzeugen ablaufenden Vorgänge quantitativ richtig abzubilden. Die bestmögliche Temperierung der Werkzeuge ist in hohem Maße mitentscheidend für die erfolgreiche Kernproduktion mit wirtschaftlich vertretbaren Zykluszeiten. Eine gleichmäßige Temperierung fördert auch eine gleichmäßige Randschalenbildung. Eine ausreichende Randschale ist erforderlich, um den Kern aus dem Werkzeug entnehmen zu können (Bild 7). Ist die Werkzeugtemperatur lokal zu niedrig, dauert der Trocknungsvorgang zu lange.

Ist die Werkzeugtemperatur lokal zu hoch, kann der Kern dort bereits thermisch geschädigt werden und weist an der Oberfläche nicht mehr die erforderliche Festigkeit auf. Für die Simulation ist es wichtig, das Aufheizen des Werkzeugs aus dem kalten Zustand und die thermische Situation im zyklischen Betrieb richtig vorherzusagen. Die Auslegung der Temperierung von Werkzeugen wird mit Hilfe der Simulation qualifiziert unterstützt. Bereits vor der Konstruktion der Werkzeuge können die Positionen und die Leistungen z. B. von elektrischen Heizpatronen erprobt werden. Ebenso kann die Steuerung der Heizer differenziert und effizient analysiert werden.

Der Trocknungsvorgang ist ein sehr dynamischer Prozess. Nach Einschleusen des Sandes in das Werkzeug wird die Sandmischung im heißen Werkzeug von außen nach innen erhitzt. Binderwasser verdampft an der Kernoberfläche. Dadurch wird der Kern lokal ausgehärtet. Durch chemisch reagierende Additive werden dabei gewünschte Effekte gezielt unterstützt. Es entsteht eine harte Randschale (Bild 8).

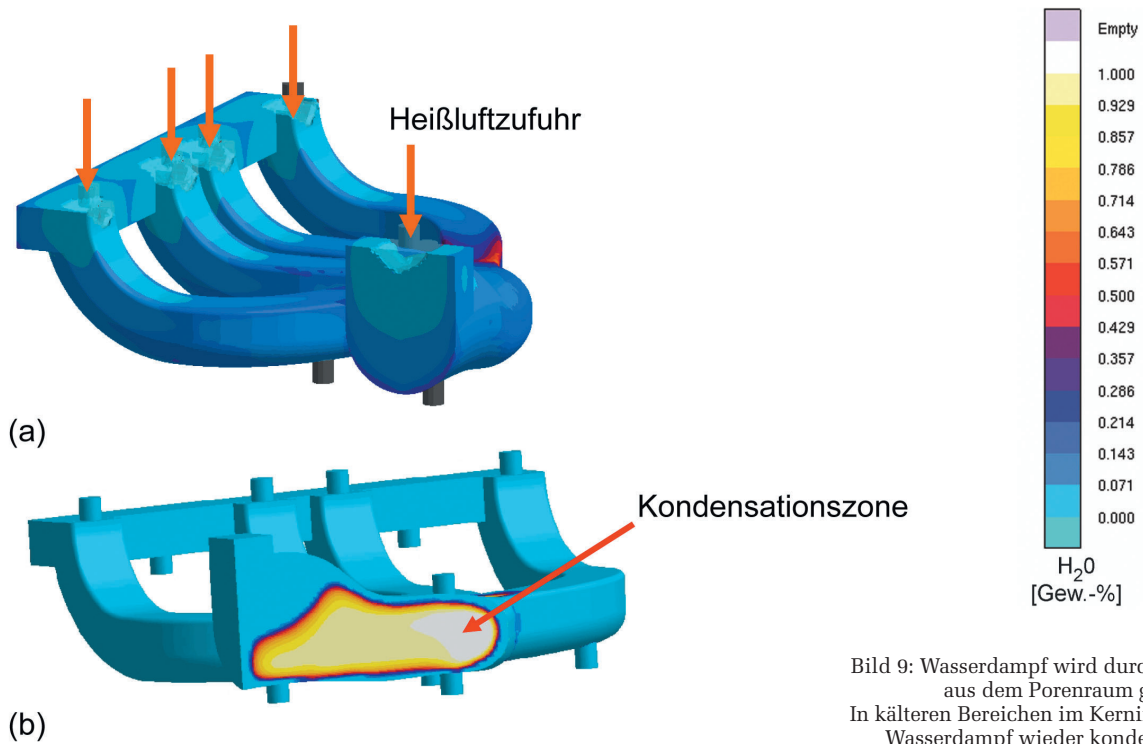


Bild 9: Wasserdampf wird durch heiße Luft aus dem Porenraum getrieben (a). In kälteren Bereichen im Kerninneren kann Wasserdampf wieder kondensieren und den Wassergehalt lokal drastisch erhöhen (b).

Um das Binderwasser zu entfernen, durchströmt heiße Luft während der Aushärtung das Werkzeug. Die Luft nimmt Feuchtigkeit auf und transportiert diese aus dem Werkzeug. Das verdampfte Binderwasser kann allerdings im Kerninneren kondensieren und sich dort anreichern (Bild 9). Würde der Kern in diesem Zustand aus dem Werkzeug entnommen und gelagert werden, wäre ein Erweichen bereits ausgehärteter Bereiche die Folge, sofern die Trocknungshärtung in Abhängigkeit von reaktiven Binderzusätzen reversibel ist. Bei ungünstiger Entlüftungssituation kann es auch hier passieren, dass zuviel Wasserdampf aufgrund unzureichender Luftströmung im Kern verbleibt.

Bonn, mit Haushaltsmitteln des BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), Berlin, im Rahmen des Verbundvorhabens „VIGI“ unter dem Kennzeichen 01RI05008 gefördert. Dafür wird herzlich gedankt. Ein besonderer Dank gilt den Verbundpartnern, der BMW AG (Gießerei Landshut), der Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH, Düsseldorf, dem IfG Institut für Gießereitechnik gGmbH, Düsseldorf, und dem ITWM Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern, für die offene und wertvolle Zusammenarbeit und den beteiligten Mitarbeitern für den engagierten konstruktiven fachlichen Erfahrungsaustausch.

Zusammenfassung und Ausblick

Ein virtuelles Werkzeug zur Simulation der Kernherstellung wird vorgestellt, das auf die Bedürfnisse der betrieblichen Praxis ausgerichtet ist. Die Simulation der Kernherstellung ist auf dieser Basis ein technologisch nützliches Werkzeug zur Analyse der Prozesskette auf einer fundierten wissenschaftlichen Basis. Der Kernhersteller soll von der Werkzeugkonstruktion bis zur Qualitätskontrolle in allen relevanten Prozessschritten der Serienfertigung effizient unterstützt werden.

Die komplizierten physikalischen Abläufe werden transparent und können somit besser verstanden werden. Fehlertendenzen können ursächlich bewertet und Abhilfemaßnahmen effektiv umgesetzt werden. Effekte, die bei der Änderung von Werkzeugen auftreten, können bewertet werden, ohne aufwändige praktische Versuche mit dem Werkzeug durchführen zu müssen. Eine Optimierung von Werkzeugen für die Serienproduktion wird zeitlich verkürzt und Kosten werden eingespart.

Dank

Die grundlagenorientierten Forschungsarbeiten wurden über das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.),

Literatur

- [1] Giesserei 96 (2009) Nr. 6, S. 62–71.
- [2] Ristow, G. H.: Granular dynamics: a review about recent molecular dynamics simulations of granular materials. Annual reviews of Computations Physics, 1, 1994. S. 275–308.
- [3] Gidaspow, D.: Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. Academic Press, 1994.
- [4] Int. J. Multiphase Flow 22 (1996), S. 379–402.
- [5] Rogers, C.: A virtual tool for the manufacture and use of foundry cores and molds. In: Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes XI. TMS 2006. S. 1123–1130.
- [6] Schneider, M.; Heisser, C.; Serghini, A., u. a.: Experimental investigation, physical modeling and simulation of core production processes. AFS Transactions 2008, Paper 08-058(04). S. 1–14.
- [7] Giesserei 95 (2008) Nr. 6, S. 32–35.
- [8] Giessereiforschung 57 (2005) Nr. 2, S. 14–22.

Kontaktadresse:

MAGMA Gießereitechnologie GmbH
 D - 52072 Aachen, Kackertstr. 11,
 Tel. : +49 (0)241 88901 74
 Fax: +49 (0)241 88901 62
 E-Mail: i.wagner@magmasoft.de
 www.magmasoft.de