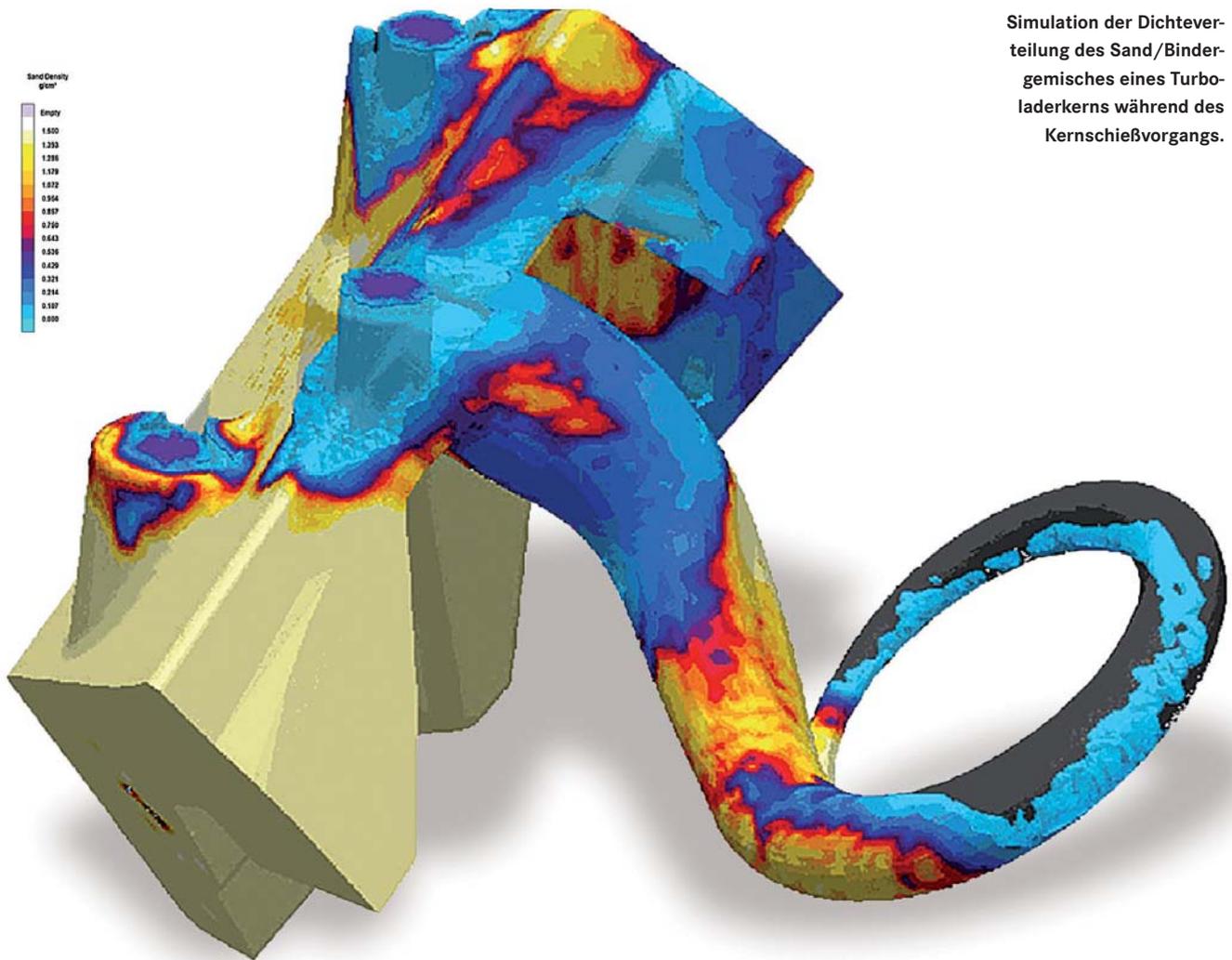


Simulation der Dichteverteilung des Sand/Binder-gemisches eines Turboladerkerns während des Kernschießvorgangs.



## Praktischer Einsatz der Kernsimulation zur Prozessoptimierung

JÖRG STURM UND INGO WAGNER, AACHEN

Die Herstellung von Kernen birgt sowohl für den Werkzeugbauer als auch den Kernmacher nach wie vor Überraschungen. Kernbedingte Gussfehler sind wegen der zusätzlichen Nacharbeit ein erheblicher Kostenfaktor bei der Gussteilproduktion. Die Auslegung von Kernwerkzeugen erfolgt mit Erfahrungswissen und durch Ausprobieren, bis eine ausreichende Kernqualität produziert 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 aufwendigen Veränderungen am Werkzeug, ohne dass der Gie-

### KURZFASSUNG:

Die Simulation der Herstellung von Sandkernen ist eine neue Methodik, um die Werkzeug- und Prozessauslegung durch den Einblick in den Kernschießverlauf und die Aushärtung grundlegend zu ändern. Wichtige Einflussgrößen auf die Qualität des Kerns können im Vorfeld der Werkzeugherstellung und der Serienfertigung transparent gemacht und quantifiziert werden. Durch die physikalisch fundierte und zielgerichtete Vorgehensweise werden damit die technische und die wirtschaftliche Machbarkeit von Sandkernen berechenbar. Dadurch wird nicht nur das Verständnis über die ablaufenden Vorgänge erweitert, es eröffnen sich auch Möglichkeiten, die Qualität von Gussteilen zu verbessern.

Bereifachmann wirklich sicher ist, dass die Maßnahmen zum gewünschten Erfolg führen. Er sieht nur das Ergebnis und kann seine Entscheidungen daher nicht aufgrund von klaren Ursache-Wirkungs-Prinzipien begründen, die über das Erklären von Effekten hinausgehen.

Die Simulation der Herstellung von Sandkernen ist mehr als 20 Jahre nach der Einführung der Gießprozesssimulation eine neue Methodik, um die Werkzeug- und Prozessauslegung durch den Einblick in den Kernschießverlauf und die Aushärtung grundlegend zu ändern. Die komplexen Zu-

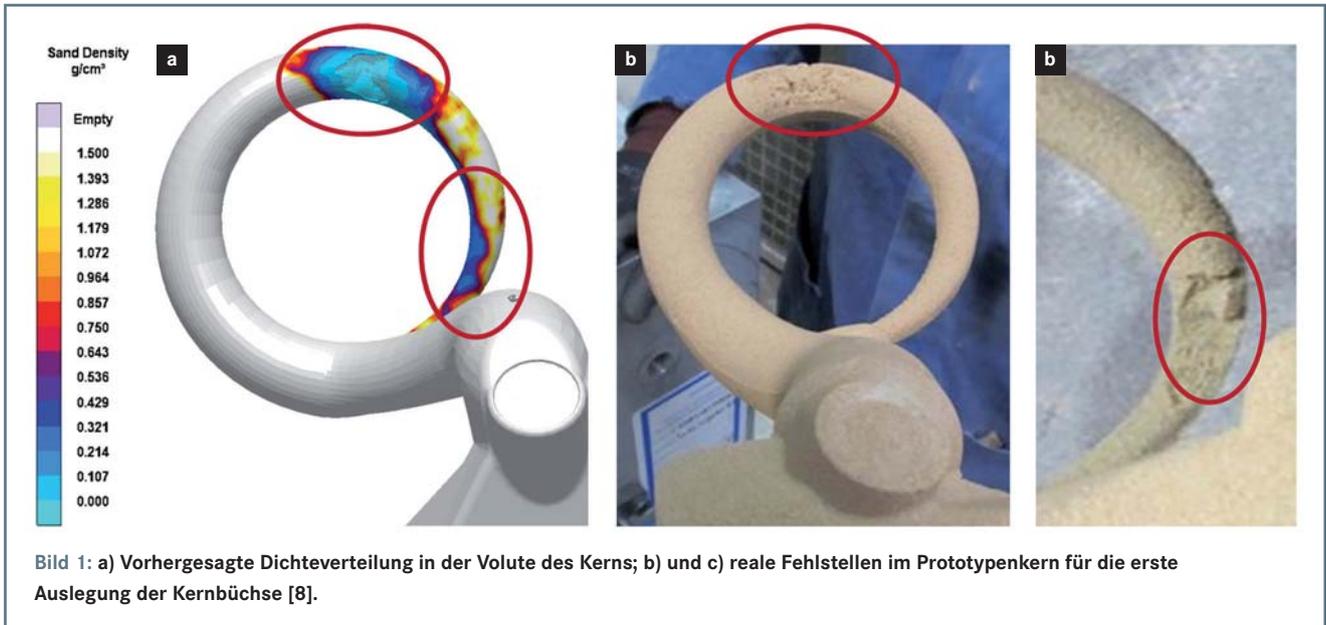


Bild 1: a) Vorhergesagte Dichteverteilung in der Volute des Kerns; b) und c) reale Fehlstellen im Prototypenkern für die erste Auslegung der Kernbüchse [8].

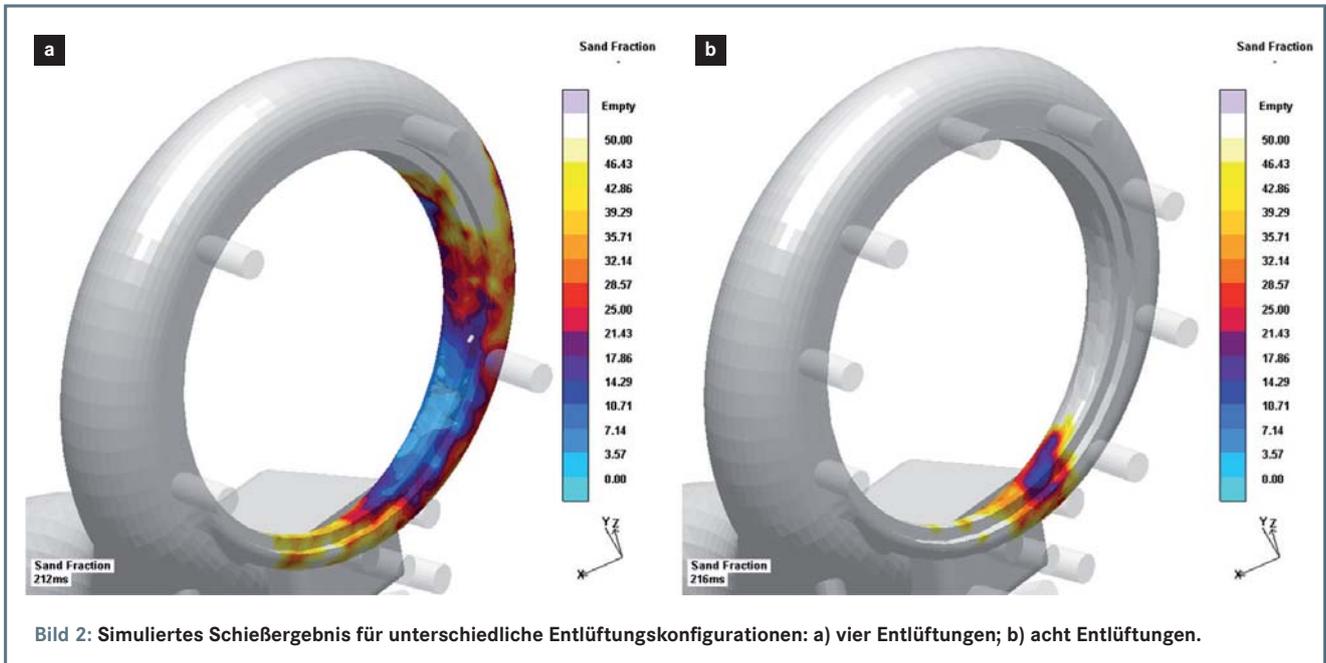


Bild 2: Simuliertes Schießergebnis für unterschiedliche Entlüftungskonfigurationen: a) vier Entlüftungen; b) acht Entlüftungen.

sammenhänge während der Fluidisierung, des Transports und der abschließenden Verdichtung eines Sand/Bindergemisches in einer Kernbüchse oder bei der Begasung, Aushärtung und Trocknung eines Kerns sind mit dem gewohnten „linearen“ Denken des Technikers nicht zu erfassen. Die Simulation des Kernherstellungsprozesses ermöglicht es, die wichtigen Einflussgrößen auf die Qualität des Kerns im Vorfeld der Werkzeugherstellung und der Serienfertigung zu quantifizieren. 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. Dies erlaubt eine zielgerichtete Vorgehensweise auf der Basis von physikalischen Zusammenhängen und klaren Fakten. Die technische und

die wirtschaftliche Machbarkeit von Sandkernen werden damit berechenbar. Dadurch wird 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 sich kontinuierlich ändernden Unterschiede bei der Strömung von Luft und Sand ein extrem anspruchsvoller Vorgang. Der Fließvorgang ist anders als beim Formfüllen mit Metallschmelzen, da sich

die lokalen Eigenschaften des „Fluids“ ständig ändern. 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 [1,2,3].

Bei der Auswahl der Modelle wurden im Rahmen der Programmentwicklung verschiedene Modellansätze gegeneinander abgewogen. So wurde von einem Entwicklungspartner unter anderem ein „Mischungsmodell“ im direkten Vergleich zu der jetzt realisierten Lösung erprobt, bei dem Sand und Luft als Mischphase berechnet werden [4]. Die charakteristische Dynamik des Kernschießens, bei der Sand und Luft typischerweise mit erheblich unterschiedlichen Geschwindigkeiten in un-

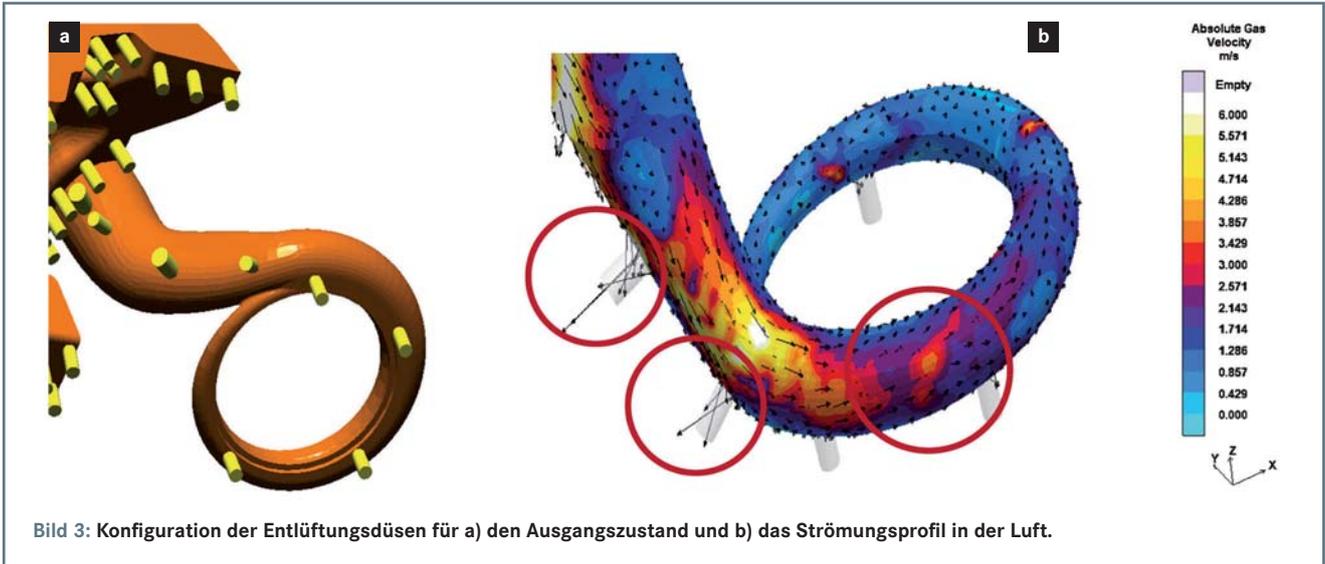


Bild 3: Konfiguration der Entlüftungsdüsen für a) den Ausgangszustand und b) das Strömungsprofil in der Luft.

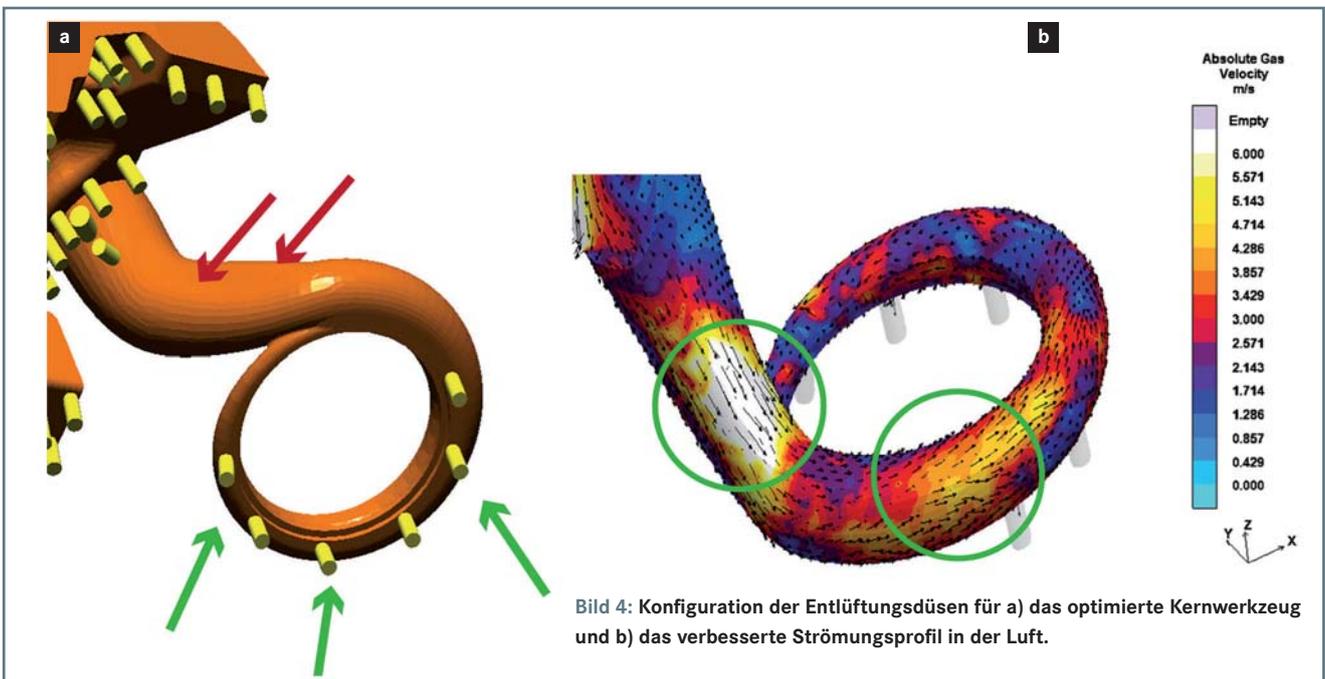


Bild 4: Konfiguration der Entlüftungsdüsen für a) das optimierte Kernwerkzeug und b) das verbesserte Strömungsprofil in der Luft.

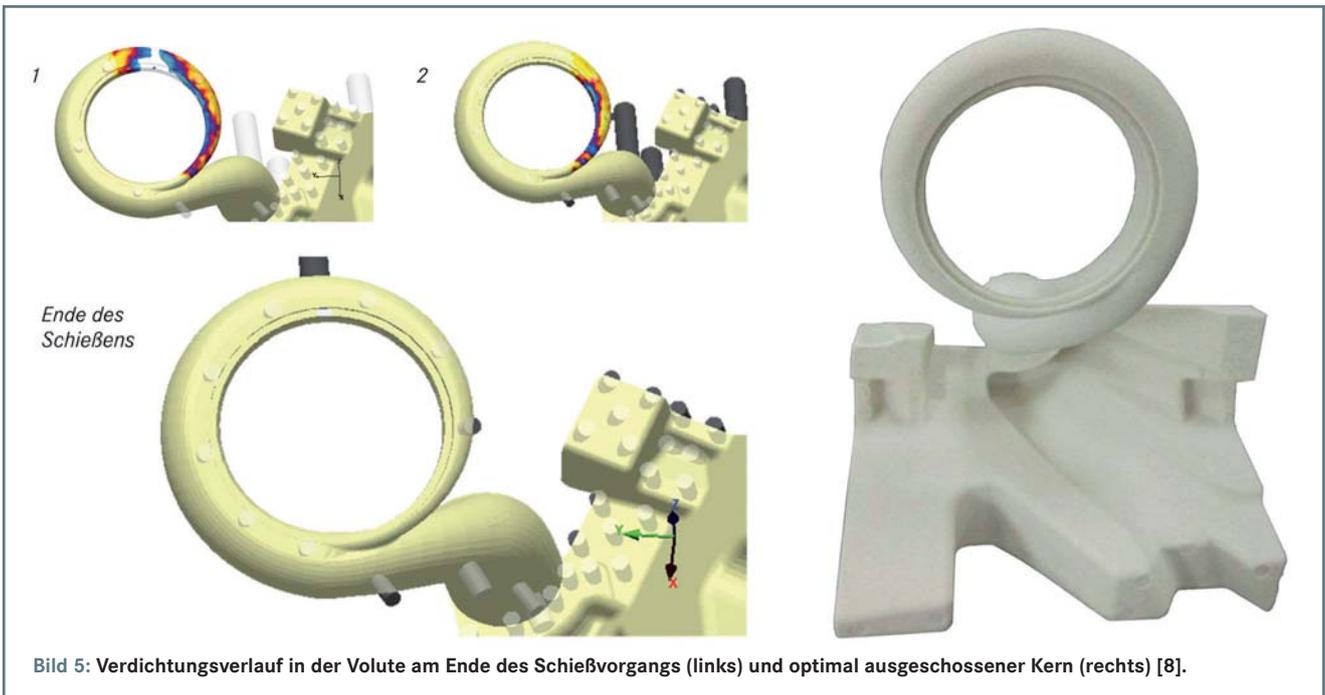


Bild 5: Verdichtungsverlauf in der Volute am Ende des Schießvorgangs (links) und optimal ausgeschossener Kern (rechts) [8].

terschiedliche Richtungen strömen, konnte mit diesem Ansatz physikalisch nicht für alle Anwendungsfälle zufriedenstellend abgebildet werden.

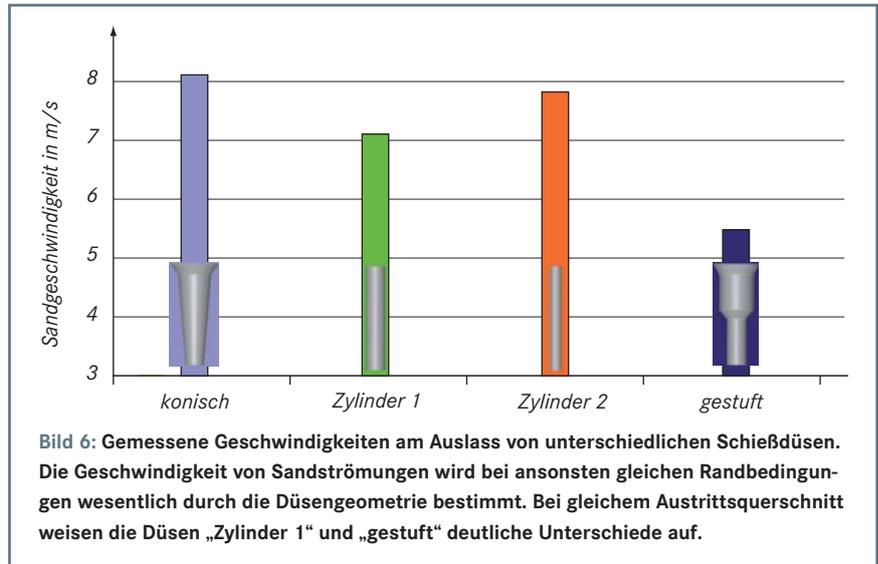
Daher wurde zur Beschreibung der Dynamik von Luft-Sand-Gemischen beim Kernschießen in dem Simulationsprogramm Magma C+M ein Ansatz gewählt, bei dem Luft und Sand bzw. Sand-Binder-Mischungen als zwei separate Phasen behandelt werden [5, 6, 7]. Neben der dominanten Impulsübertragung zwischen Luft und Sand wird dabei auch die Wechselwirkung der Sandkörner untereinander berücksichtigt.

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.

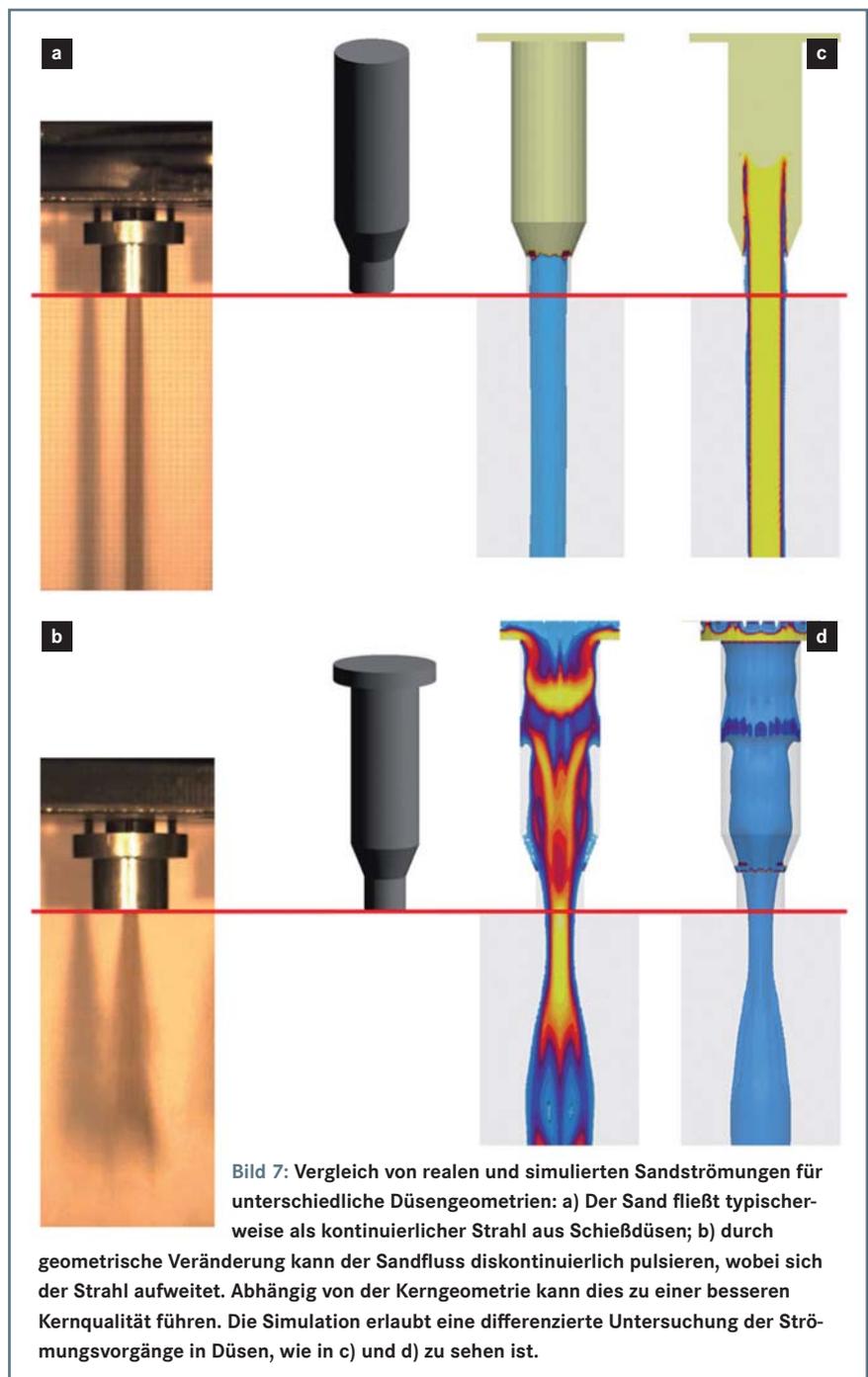
Bei der Simulation des Kernschießens ist je nach Zielsetzung zu entscheiden, ob der Prozess auch mit den relevanten Einheiten der Kernschießmaschine abgebildet werden muss oder ob es ausreicht, an den Schießdüsen geeignete Randbedingungen festzulegen. Die Berücksichtigung der Maschine ist mit einem höheren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

### Anwendung der Kernschießsimulation

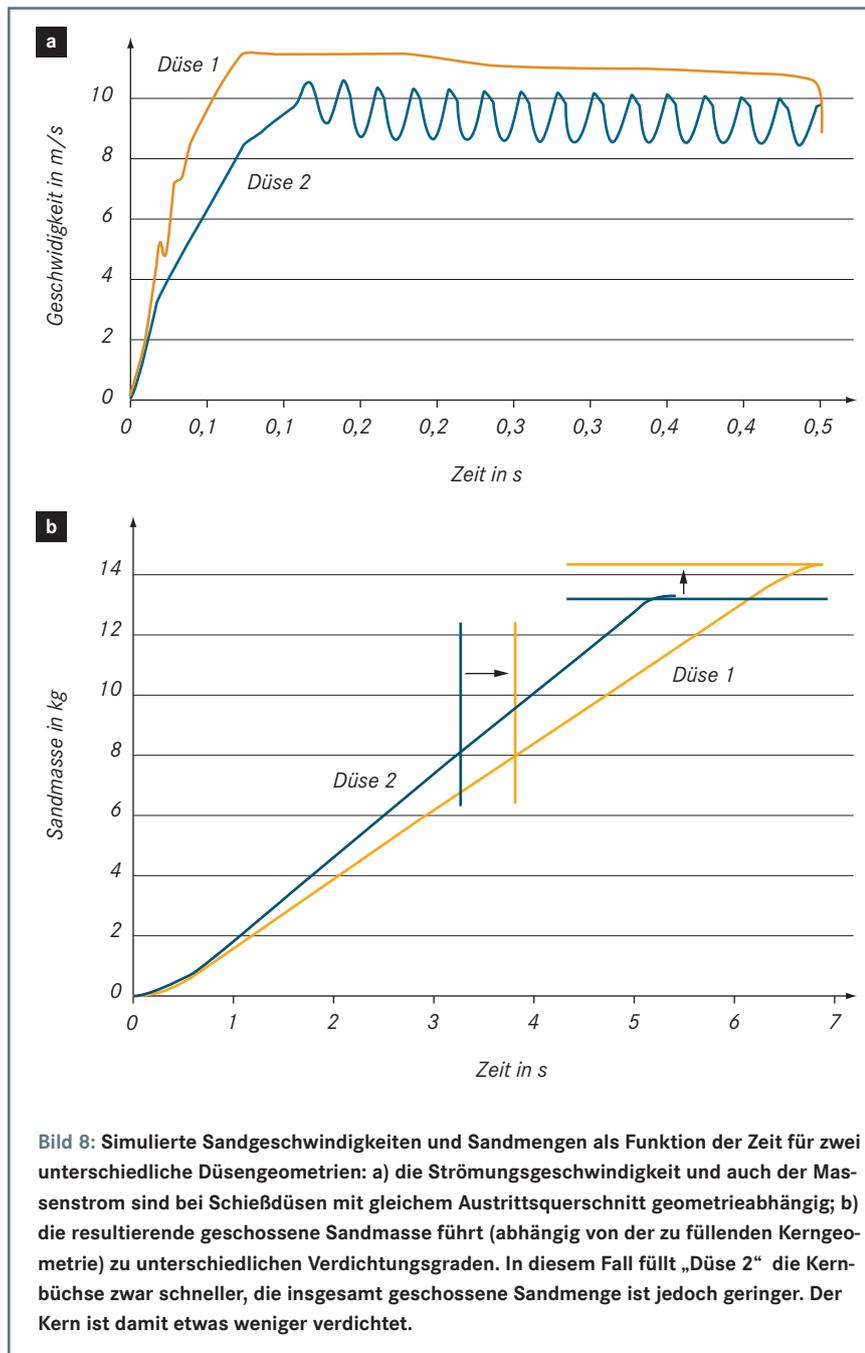
Die Simulation löst den realen Prozess räumlich und zeitlich detailliert auf. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt erhält man Ergebnisse und Kriterien. Bereits vor Fertigung einer Kernbüchse ist es sinnvoll, die Düsen bestmöglich zu positionieren. Effekte, die sich beispielsweise durch Variation von Schießdüsen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



**Bild 6:** Gemessene Geschwindigkeiten am Auslass von unterschiedlichen Schießdüsen. Die Geschwindigkeit von Sandströmungen wird bei ansonsten gleichen Randbedingungen wesentlich durch die Düsengeometrie bestimmt. Bei gleichem Austrittsquerschnitt weisen die Düsen „Zylinder 1“ und „gestuft“ deutliche Unterschiede auf.



**Bild 7:** Vergleich von realen und simulierten Sandströmungen für unterschiedliche Düsengeometrien: a) Der Sand fließt typischerweise als kontinuierlicher Strahl aus Schießdüsen; b) durch geometrische Veränderung kann der Sandfluss diskontinuierlich pulsieren, wobei sich der Strahl aufweitet. Abhängig von der Kerengeometrie kann dies zu einer besseren Kernqualität führen. Die Simulation erlaubt eine differenzierte Untersuchung der Strömungsvorgänge in Düsen, wie in c) und d) zu sehen ist.



objektiviert ausgewertet und bewertet werden.

Die visuelle Analyse des Füllvorgangs ermöglicht bereits eine effiziente vergleichende Bewertung verschiedener Konfigurationen. Kleine Veränderungen von Düsenpositionen können entscheidenden Einfluss auf die Dynamik des Füllvorgangs und die zu erwartende Kernqualität haben.

Um klare Hilfestellungen für eine Optimierung zu erhalten, ist nicht nur bei komplizierteren Kernen eine genauere Analyse erforderlich, die über die Bewertung des finalen Ergebnisses hinausgeht. Hierzu stehen weitere Ergebnisse wie lokale Geschwindigkeiten von Luft und Sand, Verteilung des Sandes im Kern aus den Schießdüsen sowie aussagekräftige Kurvendaten für Sand und Luftmengen, Geschwindigkei-

ten oder Drücke im Kern oder in den Schieß- und Entlüftungsdüsen zur Verfügung.

### Optimierung eines Cold-Box-Kerns für ein Turboladergehäuse

Turbolader stellen aufgrund der notwendigen Effizienz an das Strömungsverhalten im Einsatz höchste Anforderungen an die Qualität der inneren Oberflächen. Fehler in der Oberflächenqualität des Kerns führen damit zum sofortigen Ausschuss des Gussteils. Dies bedeutet, dass bei der Herstellung der Kerne spezielle Anforderungen an die Qualität gelten. Die Auslegung der Werkzeuge wird vom Kunden häufig durch Einschränkungen in der Lage von Schieß- und Entlüftungsdüsen behindert.

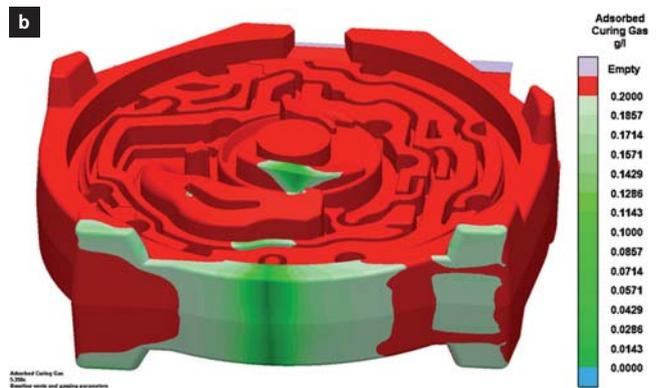
Prototypenkerne der ersten Werkzeugauslegung zeigten für einen Turboladerkern aus Polyurethan (PUR)-Cold-Box reproduzierbar Fehlstellen [8], insbesondere in der strömungstechnisch kritischen Volute. Die aufgrund dieser Ergebnisse durchgeführte erste Kernschießsimulation konnte das Ergebnis gut bestätigen (Bild 1).

Nach den positiven Erfahrungen mit den Ergebnissen von Magma C+M wurde die Kernschießsimulation von der Gießerei als Vorhersagewerkzeug akzeptiert und für die weitere Optimierung der Kernbüchse konsequent eingesetzt. Die Vorschläge zur Optimierung des Kerns wurden von den Fachleuten der Gießerei mit der Kernschießsimulation überprüft.

Aufgrund der nicht vollständig ausgeschossenen Stellen in der Volute wurde zunächst von einem Entlüftungsproblem ausgegangen. Daher wurden als erste Optimierung zusätzliche Entlüftungen im Bereich der Volute angebracht und simulationstechnisch überprüft. Der Vergleich der Ausgangssituation mit vier und der Version mit acht Entlüftungen zeigte jedoch entgegen der Expertenerfahrung in der Simulation keine entscheidende Verbesserung des Schießergebnisses (Bild 2).

Die detaillierte Analyse des Schießverlaufes in der Simulation zeigte den wahren Grund für die Verdichtungsprobleme. Durch die am Zugang zur Volute angebrachten Entlüftungsdüsen wurde die Luft als Trägermedium des Sandes zu früh abgeführt. Dadurch reduzierten sich die Strömungsgeschwindigkeit der Luft und des Sandes, bevor der Sand den Kern vollständig füllen konnte (Bild 3). Die Beurteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Luft zeigt, dass die beiden markierten Entlüftungsdüsen zu einer substantziellen Reduzierung der Geschwindigkeiten führen (von mehr als 5 m/s auf ca. 2 m/s). Dies resultiert in einem Verlust an Trägerluft, für den Sand in einer verminderten kinetischen Energie und damit zu einer nicht ausreichenden Verdichtbarkeit.

Als Schlussfolgerung wurde eine Kombination von verbesserter Entlüftung in der Volute und des Schließens der beiden kritischen Entlüftungsdüsen mit Magma C+M überprüft (Bild 4). Das Ergebnis der Strömungsgeschwindigkeiten der Luft zeigt deutlich, dass die Geschwindigkeiten im Zugang zur Volute aufgrund der geringeren Entlüftung höher sind und gleichzeitig innerhalb der Volute schnell abnehmen, was zu einem lokal großem Druckabfall führt. Ein großer Druckabfall ist dabei für die zuletzt zu füllenden Bereiche ein guter Indikator für eine gute Verdichtbarkeit des Sandes. Der schnell fließende Sand reduziert seine Geschwindigkeit sehr schnell und kann dadurch aufgrund seiner Kinetik gut verdichtet



**Bild 9:** Fehlerhafter Kern nach der Aushärtung: a) Die markierten Bereiche zeigen die Stellen an, die mit den angewendeten Begasungsparametern nicht vollständig ausgehärtet wurden; b) Simulation der Aminbegasung. Das Bild zeigt den Konzentrationsverlauf von Amin, das vom Bindersystem aufgenommen wurde und so aktiv zur Aushärtung beiträgt. Dargestellt werden ausgehärtete (rot) und nicht ausgehärtete Kernbereiche (grün).



FOTO: USIMINAS

**Bild 10:** Erster Kernschießversuch für einen PUR-Cold-Box-Kern (Länge 920 mm, Schießvolumen 68 kg). Der untere Kernbereich fällt aufgrund mangelnder Festigkeit vollständig in sich zusammen [10].

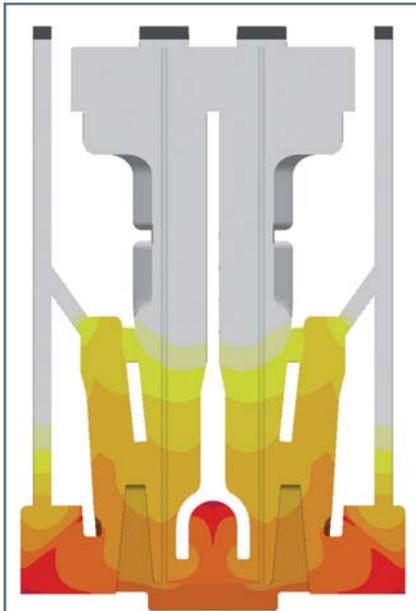
werden. Gleichzeitig zeigen die schnell reduzierten Luftgeschwindigkeiten, dass die Luft über die Entlüftungsdüsen gut abgeführt wird.

Der Ablauf der Kernschießsimulation zeigt anhand der Dichteverteilung diesen Ablauf klar auf (Bild 5). Die optimierte Version führte in der Praxis zu reproduzierbar fehlerfreien Kernen.

### Geometrieabhängige Funktionalität von Schießdüsen

In Kernmachereien werden unterschiedlichste Schießdüsengeometrien verwendet. In der einfachsten Form dienen Bohrungen in der Schießkopfplatte als Schießdüsen. Die Variation des Bohrungsdurchmessers ist dann die einzige Möglichkeit, „düsenseitig“ Einfluss auf das Schießverhalten zu nehmen. Für einfache Kerngeometrien ist das oft eine technisch und wirtschaftlich günstige Lösung. Im Normalfall werden allerdings richtige Düsen eingesetzt, die den Schießkopf mit der Kernbüchse verbinden. Dabei werden in den Kernmachereien typischerweise entweder zylindrische, konische oder gestufte Schießdüsen verwendet.

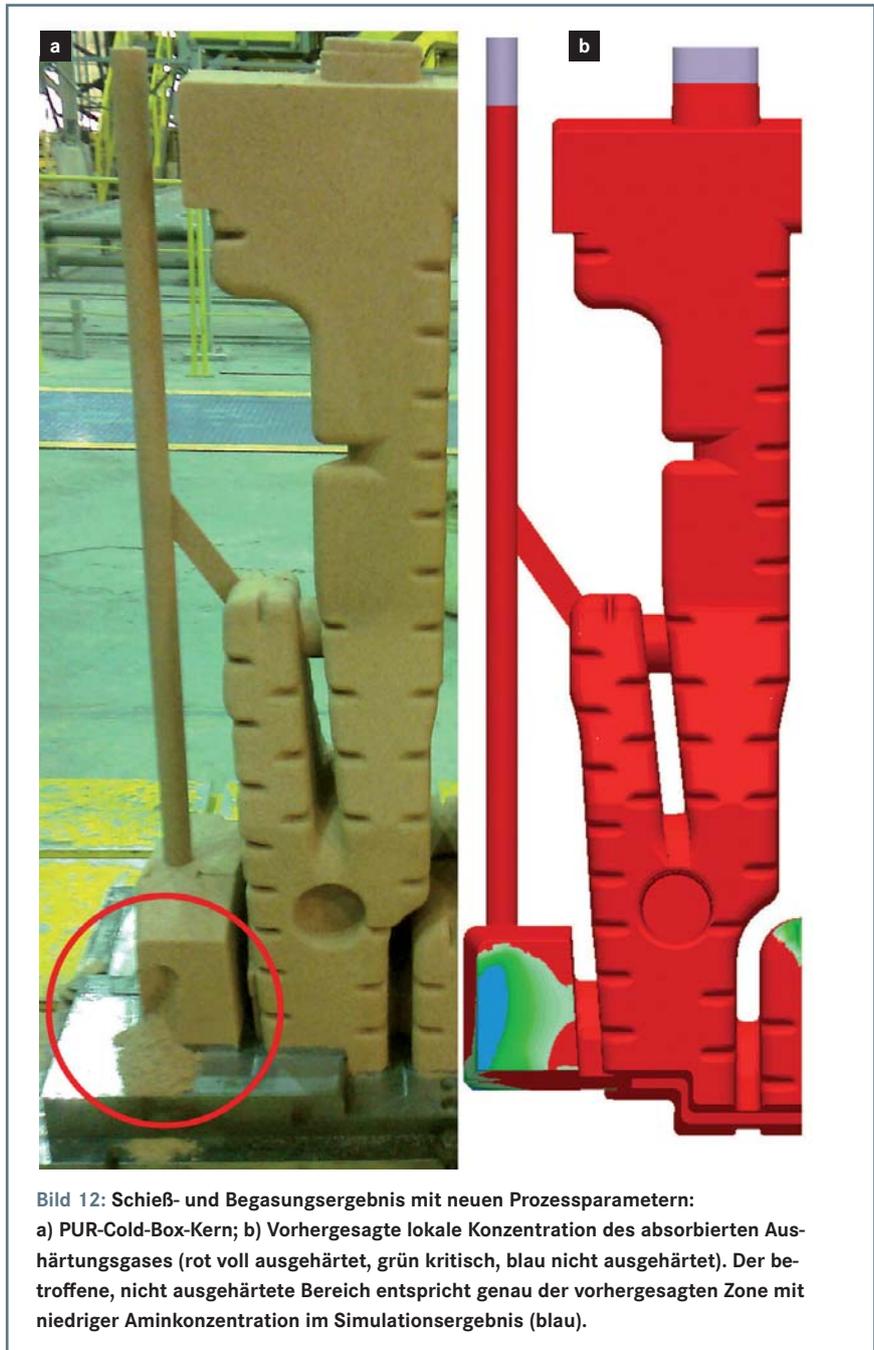
Unterschiedliche Schießdüsengeometrien führen zu sehr unterschiedlichen Strömungen. Die aus der Fluidmechanik bekannten Gesetzmäßigkeiten können für die speziellen Luft-Sand-Strömungen beim Kernschießen nicht angewendet werden. Die Verwendung einer gestuften anstatt einer zylindrischen Düse führt beispielsweise bei Flüssigkeiten (bei gleicher Druckrandbedingung) aufgrund der Kontinuität zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit. Beim Kernschießen hingegen wird der Sand an der Verjüngung aufgestaut und die Sandgeschwindigkeit wird geringer (Bild 6). Neben der Sandgeschwindigkeit ändern sich auch die Massenströme in Abhängigkeit von der Düsengeometrie.



**Bild 11:** Maximale lokale Konzentration des Amins. Das Aushärtungsgas dringt sehr ungleichmäßig in den Kern ein.

Mit der Komplexität von Kernen steigen auch die Anforderungen an die Auswahl der Schießdüsen. Bisher werden auch in schwierigen Fällen Düsengeometrien mit Erfahrungswissen und durch Ausprobieren variiert. Die in den Düsen ablaufenden Strömungsvorgänge sind dabei bislang weitgehend unbekannt. Experimentelle Untersuchungen zum Ausfließverhalten von Sand aus Schießdüsen zeigen, dass sich z. B. allein durch geometrische Veränderungen an Düsen kontinuierliche Sandströmungen mit annähernd konstanter Geschwindigkeit und nahezu gleichbleibenden Massenströmen genauso einstellen lassen, wie diskontinuierlich pulsierende Sandströme (Bild 7). Die Strömungsvorgänge in den Düsen, die zu diesen charakteristischen Fließvorgängen führen, entziehen sich bislang der experimentellen Beobachtung und einer detaillierten Untersuchung. Die Simulation erlaubt jetzt einen differenzierten Einblick in die Strömungsvorgänge innerhalb der Düsen. Die dabei ablaufenden physikalischen Phänomene können grundlegend verstanden und quantitativ ausgewertet werden. Für den Kernmacher ist die Kenntnis der Auswirkung geometriebedingter Effekte auf das Schießergebnis wichtig. Je nach Düsenkonfiguration können Sandgeschwindigkeiten und die effektiv geschossenen Sandmassen sehr unterschiedlich sein. Dies hat abhängig von der Kerngeometrie auch Auswirkungen auf die lokale Verdichtung des Kerns (Bild 8).

Mit dem durch Simulation gewonnenen Einblick können so zukünftig Düsengeometrien gezielt ausgewählt werden, um



**Bild 12:** Schieß- und Begasungsergebnis mit neuen Prozessparametern: a) PUR-Cold-Box-Kern; b) Vorhergesagte lokale Konzentration des absorbierten Aushärtungsgases (rot voll ausgehärtet, grün kritisch, blau nicht ausgehärtet). Der betroffene, nicht ausgehärtete Bereich entspricht genau der vorhergesagten Zone mit niedriger Aminkonzentration im Simulationsergebnis (blau).

verschiedenartige Bereiche in der Kernbüchse zeitgleich und gleichmäßig füllen zu können. Anhand der quantitativen Simulationsuntersuchungen können dann systematisch Regeln erstellt werden, welche Düsengeometrien für welche Kerntypen am effektivsten sind.

### Modellierung der Kernaushärtung mit Gas

Bei der Gasaushärtung wird ein temperiertes Gasgemisch in den geschossenen Kern eingeleitet. Die gängigen Härtungsmechanismen über Gashärtung wie z. B. PUR-Cold-Box (gilt analog für die Trocknungshärtung anorganischer Binder mit heißer Luft in temperiertem Werkzeug) können durch Anwendung geeigneter Modelle si-

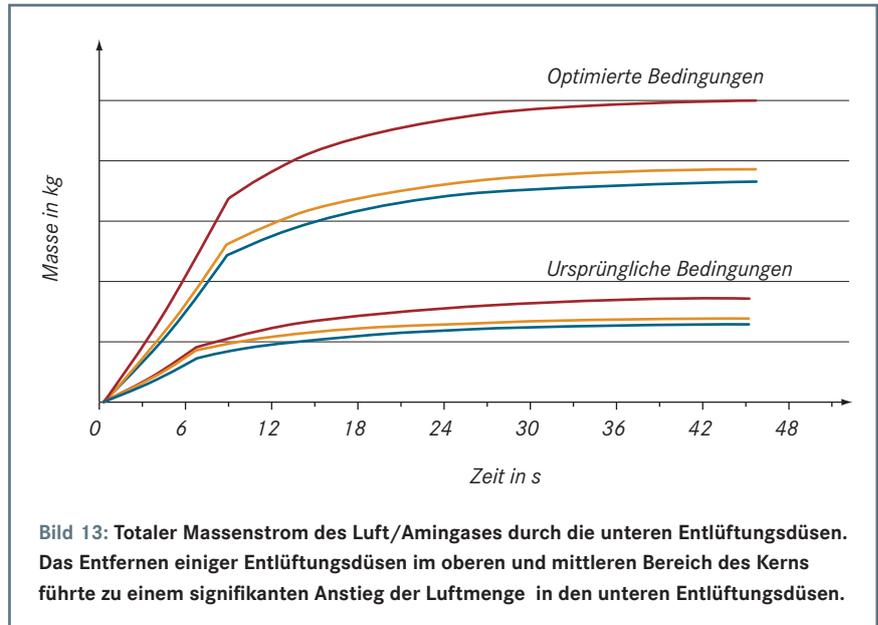
muliert werden [6]. Der Transport von Gas durch den offenen Porenraum von Sandkernen charakterisiert den Strömungsvorgang bei der Kernaushärtung. Für eine PUR-Cold-Box-Aushärtung bedeutet dies, ein katalytisch wirkendes tertiäres Amin in alle Kernbereiche zu transportieren. Die Aushärtung selbst hängt von vielen Faktoren ab, wie z. B. Binder (Zusammensetzung und Menge), Lösungsmittel (Art und Menge), Benetzung der Sandkörner durch einen Binderfilm, Amintyp, sowie Sand- und Gastemperatur [9]. Die Gasströmung durch den Kernsand hängt primär von der Kerngeometrie, von der Düsenkonfiguration, vom Gasdruck sowie von der Gasdurchlässigkeit der Sandmischung ab.

Im Normalfall ist eine für das Kernschießen günstige Düsenanordnung nicht opti-

mal für die Begasung. Beispielsweise geht viel Amin nutzlos verloren, wenn die Gasströmung nur kurze Wege von den Begasungsdüsen zu den Entlüftungen zurücklegt, während andererseits andere Bereiche des Kerns nur mit höherem Druck durchströmt werden und damit zusätzlich höhere Aminmengen erforderlich sind.

Ziel der Simulation ist es, zunächst den zeitlichen Verlauf der Amingasströmung richtig abzubilden. Bereits bei der Auslegung von Kernwerkzeugen kann überprüft werden, ob und wie alle Kernbereiche ausreichend von Aushärtegas durchströmt werden. Die Simulation bildet realitätsnah sowohl das aktive Begasen als auch den nachfolgenden Spülvorgang mit Luft ab. Damit werden Fehlerursachen frühzeitig erkannt und Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung können zielgerichtet ergriffen werden.

Eine wesentliche Aufgabenstellung für den Kernmacher ist es, den Kern innerhalb möglichst kurzer Zykluszeit möglichst effizient auszuhärten. Probleme bei der Aushärtung werden oft erst bemerkt, wenn bereits gute Kerne geschossen werden und die Düsenkonfiguration für das Schießen festgelegt ist (Bild 9a). Die Simulation der Aminbegasung für einen fehlerhaft ausgehärteten Kern zeigt sehr schnell, dass kritische Bereiche nur unzureichend durch-

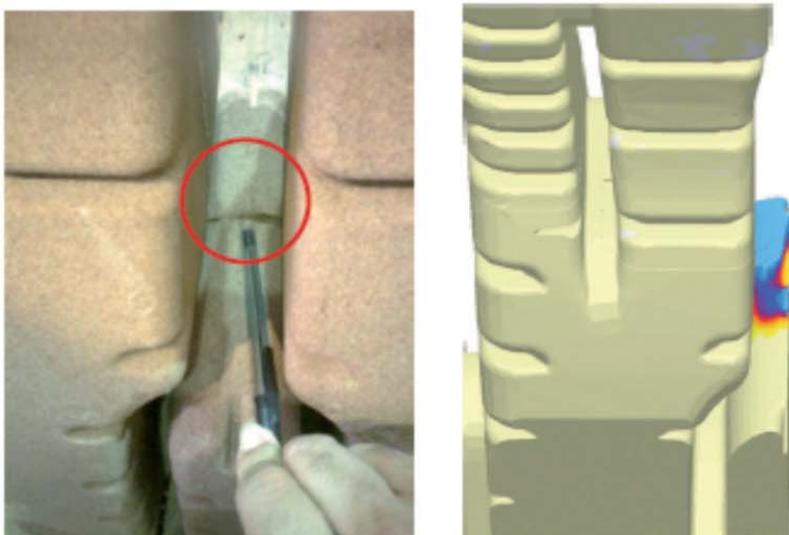
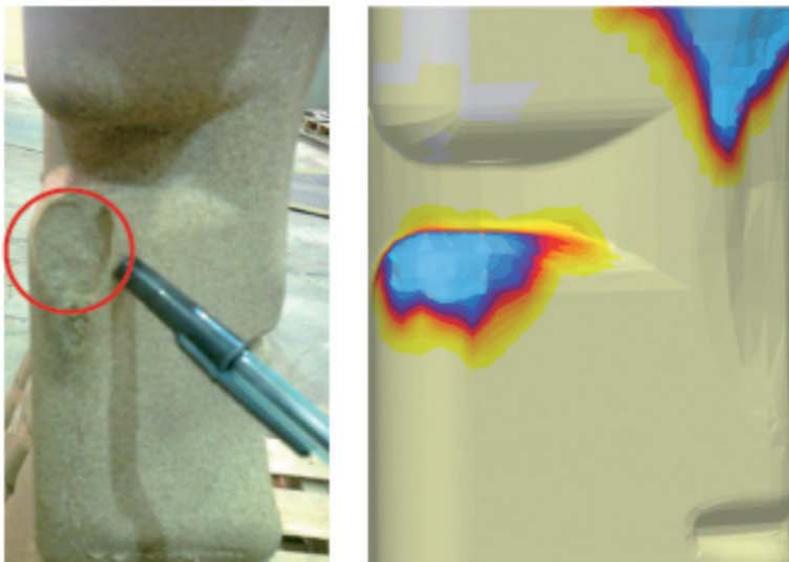
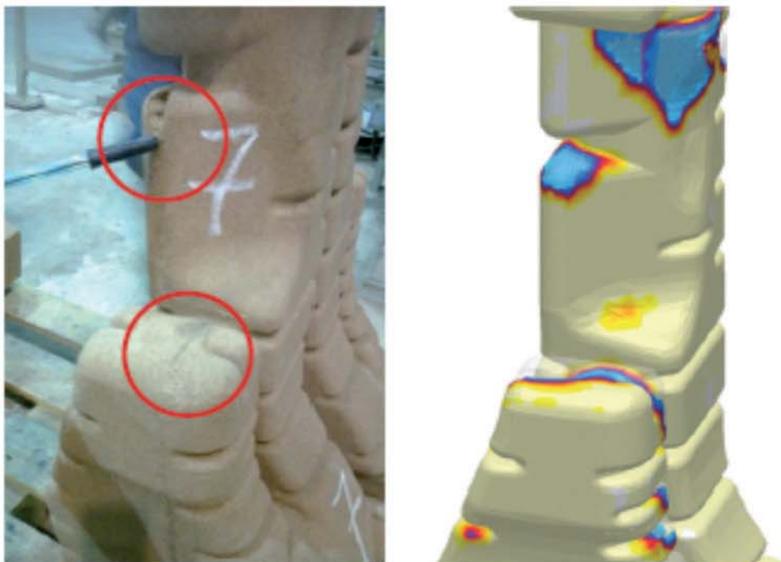


**Bild 13: Totaler Massenstrom des Luft/Amingases durch die unteren Entlüftungsdüsen. Das Entfernen einiger Entlüftungsdüsen im oberen und mittleren Bereich des Kerns führte zu einem signifikanten Anstieg der Luftmenge in den unteren Entlüftungsdüsen.**

strömt werden und das Amin nicht alle Bereiche des Kerns innerhalb des Produktionszyklus erreicht (Bild 9b).

Praktische Maßnahmen zur Beseitigung von aushärtungsbedingten Kernfehlern sind meistens die Erhöhung der Aminmenge, des Begasungsdrucks, der Gastemperatur oder zusätzlich der Begasungszeit. Die Variation dieser Prozessparameter ist al-

lerdings nur in begrenztem Umfang möglich und wird durch den Zwang zur wirtschaftlichen Kernfertigung limitiert. Da der Kernmacher die Fehlerursachen (die ja schon aus dem Werkzeugkonzept resultieren können) nicht kennt, dienen die genannten Maßnahmen häufig nur zur Bekämpfung von Symptomen und nicht zur Beseitigung der Ursache. Meistens resultiert die



**Bild 14:** Vergleich von Kernschießfehlern in der Simulation mit realen Versuchen. Die fehlerhaften Bereiche gehören zu denen, die als letztes gefüllt werden. Dies resultiert aus einem gegen die Hauptschießrichtung gerichteten Füllverlauf, der eine ausreichende Verdichtung verhindert. Da die Fehler nahe der Formteilung auftraten, wurde angenommen, dass der Kernkasten nicht ausreichend abgedichtet war.

eigentliche Ursache von aushärtungsbedingten Kernfehlern aus einem „Strömungsproblem“ aufgrund ungünstiger Düsenkonfiguration. Bereits kleine Veränderungen der Positionen von Entlüftungsdüsen können große Auswirkungen auf eine erfolgreiche Kernfertigung haben. Bei komplexen Kerngeometrien und Düsenanordnungen ist der Strömungsverlauf auch für die Begasung kaum vorhersagbar. Die Simulation liefert dafür eine detaillierte und objektive Strömungsanalyse. Druckverlauf im Kern, lokale Strömungsgeschwindigkeiten und die Darstellung der zeitlich instationären Aminströmung sind wichtige Ergebnisse zur Bewertung der Begasungseffizienz.

Die Simulation ermöglicht damit bereits in der Konstruktionsphase eine frühzeitige Abstimmung der Düsenpositionierung sowohl für das Schießen als auch die Aushärtung. Das Ausprobieren im Betrieb durch Verändern von Werkzeugen und Prozessparametern kann auf ein Minimum reduziert werden.

**Optimierung der Begasung eines Cold-Box-Kerns für eine Traverse**

Für die Herstellung einer Traverse für Eisenbahndrehgestelle wird ein Kernpaket aus massiven PUR-Cold-Box-Kernen verwendet [10]. Bei den ersten Versuchen für einen der Kerne, für den die Kernbüchse konventionell ausgelegt worden war, zeigten sich Probleme bei der Herstellung, die zum völligen Kollaps des unteren Kernbereichs führten (**Bild 10**). Daraufhin wurden die Kernschieß- und Aushärtungsschritte in Magma C+M im Detail analysiert, sodass Rückschlüsse hinsichtlich des bestehenden Fehlers gezogen werden konnten.

Schon die erste Simulation (**Bild 11**) zeigte, dass die Problemzonen während des Begasens nur eine sehr geringe Konzentration an Amin aufwiesen, was die Grundursache für den Fehler war. Der Mangel an Kernfestigkeit konnte aufgrund der Ergebnisse mit einer schlechten Aushärtung in Verbindung gebracht werden.

Unterschiedliche Prozessbedingungen wie Begasungs- und Spülzeiten sowie der Begasungsdruck wurden zunächst virtuell variiert. Die weitere Untersuchung mithilfe von Magma C+M richtete sich auf die Auswertung der lokalen Konzentration des adsorbiertenamins, da hierdurch Bereiche angezeigt werden, in denen das katalysierende Gas die chemische Reaktion nicht aktivieren kann. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass lokal nur sehr geringe Konzentrationen des Katalysators zur Verfügung standen, um die Aushärtung in den fehlerbehafteten Bereichen zu beschleunigen. Die optimierten Prozessparameter lieferten so

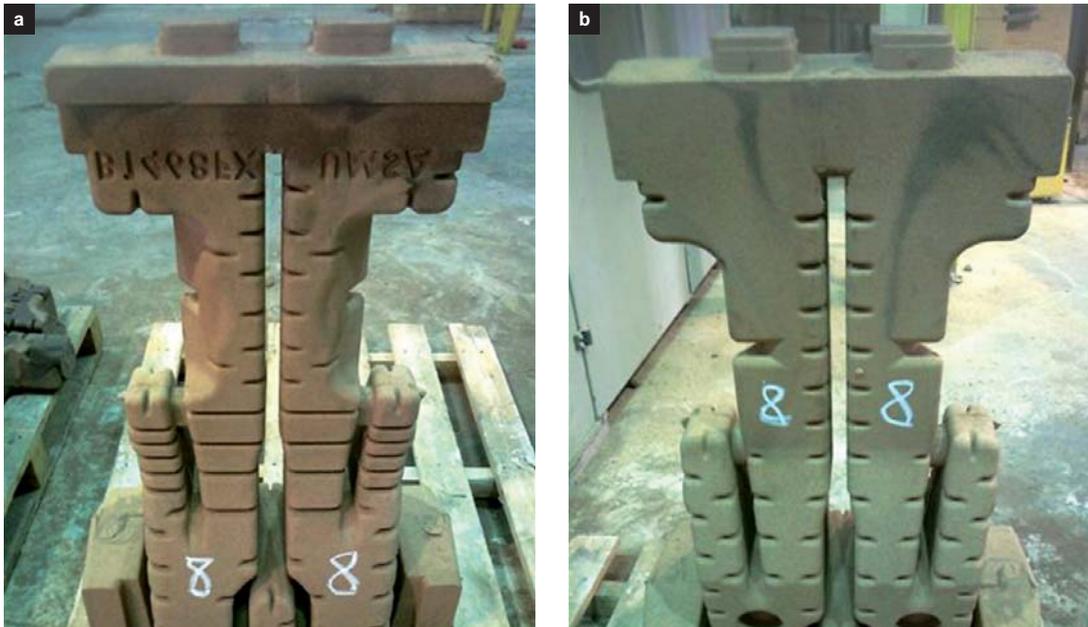


Bild 15:  
Fehlerfrei  
produzierter  
Kern:  
a) Vorder-  
und  
b) Rückseite.

wohl in der Simulation als auch in der Realität bessere Ergebnisse (Bild 12).

Die Auswertung der simulierten Kurven für den Massenstrom des Amin/Luftgemisches durch die Entlüftungsdüsen verdeutlichte, dass das Katalysatorgas die betroffenen Bereiche nicht erreichte. Der offene Entlüftungsquerschnitt der oberen und mittig gelegenen Entlüftungsdüsen erlaubte ein frühzeitiges Entweichen des Gases, bevor es den Boden erreichte.

Anstatt kostenintensive Änderungen am Kernkasten durchzuführen, entschieden sich die Fachleute für eine einfache Lösung: einige Entlüftungsdüsen in den oberen und mittig gelegenen Bereichen wurden geschlossen, um so die Gaskonzentration im unteren Bereich zu erhöhen.

Die Optimierung führte zu einem beträchtlichen Konzentrationsanstieg des gasförmigenamins (~ 36 %) in den unteren Bereichen des Kerns (Bild 13). Im Vergleich zum ursprünglichen Projekt stieg außerdem die Menge an kondensiertem Amin im Binder an.

Mit den gewählten Anpassungen produzierte der brasilianische Stahlhersteller Usiminas, Belo Horizonte, einen Kern ohne jeden Aushärtungsfehler. Da die Entlüftung reduziert wurde, traten jedoch die erwarteten schießbedingten Fehler auf.

Allerdings war es den Fachleuten klar, dass diese Änderungen wohl auch das Kernschießen selbst beeinflussen würden. Daher wurde mit Magma C+M parallel eine weitere Untersuchung des Kernschießverlaufs durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den realen Defekten und den Bereichen geringer Verdichtung. Die Animation des Fließverhaltens zeigte außerdem, dass die Probleme in den kritischen Bereichen durch einen gegen die

Hauptfließrichtung gerichteten Gegenstrom des Sandes bedingt waren (Bild 14).

Alle noch vorhandenen Fehler im Kern lagen in der Nähe zur Formteilung des Kernkastens. Dabei wiesen einige Fehlstellen eine glatte Oberfläche auf, was darauf hinwies, dass der Sand noch während des Schießens an diesen Stellen durch einen starken Luftstrom entfernt worden war. Die Ergebnisse der Kernschießsimulation unterstützen die Überlegung, dass ein unzureichendes Abdichten des Formkastens der Grund für den Fehler war: Luft konnte mit hoher Geschwindigkeit durch die Formteilung entweichen.

Diese Hypothese wurde überprüft, indem im Werkzeug eine Silikondichtung zur verbesserten Abdichtung der relevanten Bereiche des Kernkastens eingesetzt wurde. Nach dieser Anpassung konnte reproduzierbar und prozesssicher ein völlig fehlerfreier Kern produziert werden (Bild 15).

### Zusammenfassung und Ausblick

Mit Magma C+M steht ein virtuelles Werkzeug zur Simulation der Kernherstellung zur Verfügung, das auf die Bedürfnisse der betrieblichen Praxis ausgerichtet ist. Die Simulation der Kernherstellung ist ein technologisch nützliches Werkzeug zur Analyse der gesamten Fertigungskette Schießen und Aushärten auf einer fundierten wissenschaftlichen Basis. Der Kernhersteller wird damit in allen relevanten Prozessschritten der Serienfertigung von der Werkzeugkonstruktion bis zur Qualitätskontrolle effizient unterstützt.

Simulation macht die komplizierten physikalischen Abläufe transparent und verständlicher. Voraussetzung für die erfolgreiche Nutzung ist eine veränderte Methodik in der Werkzeugauslegung und Pro-

zessoptimierung. „Versuch und Irrtum“ im Betrieb muss durch Verstehen und vorbeugendes Vermeiden ersetzt werden. Nur so können Fehlertendenzen ursächlich bewertet und Abhilfemaßnahmen effektiv umgesetzt werden. Simulation ermöglicht dann die Bewertung von Werkzeugänderungen, ohne aufwendige praktische Versuche durchzuführen. Die frühzeitige Optimierung von Werkzeugen wird zeitlich verkürzt und bietet damit ein erhebliches Potential für Kosteneinsparungen.

Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Leiter Vertrieb, Engineering und Support, und Dr.-Ing. Ingo Wagner, Gießerei-Ingenieur Entwicklung, Magma GmbH, Aachen

### Literatur:

- [1] *Giesserei* 96 (2009) [Nr. 6], S. 62-71.
- [2] 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.
- [3] *Giessereiforschung* 57 (2005) [Nr. 2], S. 14-22.
- [4] Latz, A.; Schmidt, S.: Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow. *Granular Matter* 12 (2010), [Nr. 4], S. 387-397.
- [5] 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.
- [6] *Giesserei* 96 (2009) [Nr. 12], S. 16-29.
- [7] *Giesserei-Rundschau* 58 (2011), Heft 9/10 2011.
- [8] Bilder mit freundlicher Genehmigung von Bocar, Mexiko.
- [9] *Giesserei* 98 (2011), [Nr. 1], S. 30-39.
- [10] Bilder mit freundlicher Genehmigung von Usiminas, Brasilien.