

Die Simulation der Kernherstellung ist ein technologisch nützliches Werkzeug zur Analyse der Prozesskette auf einer fundierten wissenschaftlichen Basis. Komplizierte physikalische Abläufe werden transparent und können besser verstanden werden.

Kernsimulation

– mit Kernkompetenz in die Zukunft

VON INGO WAGNER UND MARC SCHNEIDER, AACHEN

Sandkerne bilden die Hohlräume von Gussteilen ab und sind just in time in erforderlicher Qualität und kostengünstig verfügbar – diesen Zustand wünscht sich der 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.

Neue Verbrennungsmotoren sind thermodynamisch bis zur höchsten Belastbarkeit ausgelegt und garantieren bestmögliche Leistung bei geringstem Gewicht. Filigrane Sandkerne sind erforderlich, um die Kühlkanäle sauber abbilden zu können. Es dürfen keine Rückstände oder Un-

ebenheiten im Gussteil vorhanden sein, die den Wirkungsgrad des Kühlkreislaufs reduzieren. Die Kernherstellung wird außerdem zunehmend mit der Forderung nach ökologischerer Fertigung konfrontiert, um Arbeitsplatz- und Umweltbelastung durch schädliche Emissionen zu reduzieren.

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 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 Gießereifachmann wirklich sicher ist, 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).

Die Spezifikation des Gussteils z. B. für eine hohe Oberflächengüte sowie der Gießprozess bestimmen maßgeblich den zu verwendenden Kernsand, so dass Grundsand und Binder oft nicht hinsichtlich besserer

Tabelle 1: Mathematische Grundgleichungen für das Kernschießen. Das unterschiedliche Fließverhalten von Sand-Luft-Gemischen bei hohen Luftanteilen und bei hohen Sandverdichtungsgraden wird über die Verwendung der verschiedenen Modelle berücksichtigt.

| | | |
|---|--|---|
| Massenerhaltung | $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0$ | $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0$ |
| Impulserhaltung | $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla P_g - \nabla P_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s)$ | |
| | $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_g + \beta(\vec{v}_s - \vec{v}_g)$ | |
| | $\bar{\bar{\tau}}_k = 2\varepsilon_k \mu_k \bar{\bar{D}}_k + \varepsilon_k \left(\xi_k - \frac{2}{3} \mu_k \right) \text{tr}(\bar{\bar{D}}_k) \bar{\bar{I}} \quad (\text{mit Index „k“ = „s“ oder „g“ !})$ | |
| Partikeldruck bei geringen Sandanteilen | $P_{s1} = \rho_s \varepsilon_s [1 + 2(1+e)\varepsilon_s g_0] \Theta$ | Granulare „Bulk & Shear“-Viskositäten $\xi_s = \frac{5}{3} \mu_{s1} \quad \mu_{s1} = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^{1/2}$ |
| Partikeldruck bei hohen Sandanteilen | $P_{s2} = P_{s1} + P_Y$ | Viskosität bei hohen Sandanteilen $\mu_{s2} = \mu_{s1} \left(1 + \frac{P_Y}{P_{s1}} \right)$ |
| Granulare Temperatur | $\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \Theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \Theta \vec{v}_s) \right] = \left(-P_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_\Theta \nabla \Theta) - \gamma_\Theta - 3\beta \Theta$ | |

Bezeichnung der Größen:

ε Volumenanteil ρ Dichte \vec{v} Geschwindigkeitsvektor P Druck \vec{g} Gravitationsbeschleunigung
 $\bar{\bar{\tau}}$ „viskoser“ Spannungstensor β Reibkoeffizient μ Scherviskosität $\bar{\bar{D}}$ Deformationsratentensor
 ξ volumetrische Viskosität $\bar{\bar{I}}$ Einheitstensor e Inelastizitätsfaktor oder Stoßfaktor g_0 Radiale Verteilungsfunktion
 Θ granulare Temperatur d_p Partikeldurchmesser k_Θ granulare Energieleitfähigkeit γ_Θ Energieverlustterm
 P_Y Gleitreibungsdruck

Indizes: g Gasphase s Sandphase k Phase (jeweils Gas oder Sand)

Schießbarkeit variiert werden können. Position und Typ von Schieß- und Entlüftungsdüsen haben einen erheblichen Einfluss auf die Kernqualität. Nach ersten Schießversuchen mit einem neuen Werkzeug werden in der Regel die Positionen und die Anzahl der Entlüftungsdüsen variiert, um Kerne mit der geforderten Qualität herstellen zu können. Eine für das Kernschießen gute Entlüftungssituation ist oft nicht optimal für die anschließende Aushärtung. Dadurch steigen der Umfang und die Komplexität des Optimierungprozesses. 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 wirt-

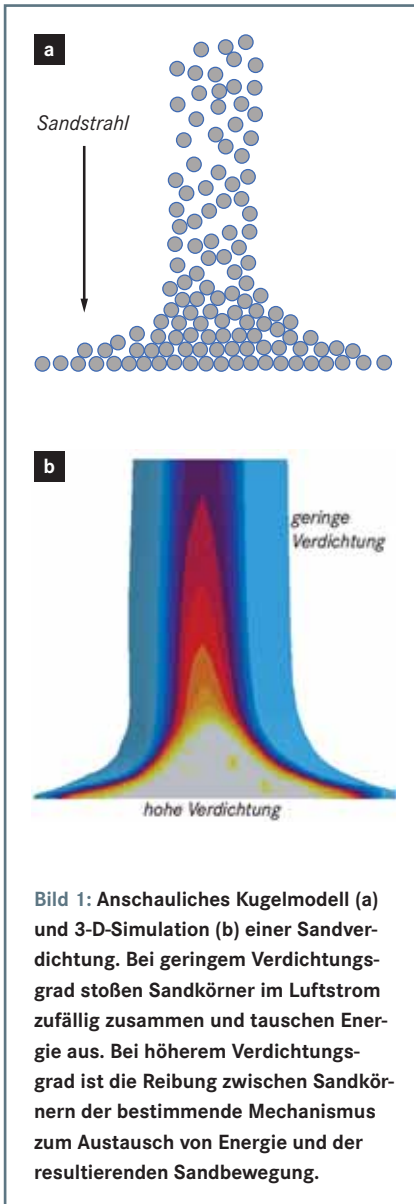
schaftliche Machbarkeit von Sandkernen werden berechenbar. Bereits bei der Planung eines Gussteils können die Kernfertigung und die Prozessabläufe virtuell abgebildet werden. Der gesamte Prozessablauf und die relevanten physikalischen Größen werden transparent. Dadurch werden außerdem das Verständnis 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 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. [2-4], ein Ansatz gewählt, bei dem Luft und Sand bzw. Sand-Binder-Mischungen als separate Phasen behandelt werden [5], **Tabelle 1.** Das Zweiphasenmodell benötigt



Massen- und Impulserhaltungsgleichungen für beide Stoffe. Der Luftstrom ist die treibende Kraft für das Füllen der Kernbüchse mit Sand. Bei höheren Luftanteilen in diesem Gemisch werden kinetische Modelle angewendet. Neben der dominanten Impulsübertragung zwischen Luft und Sand wird die Wechselwirkung der Sandkörner untereinander über die Kinetik der Zusammenstöße berücksichtigt (Bild 1). Bei zunehmender Verdichtung des Sandes wächst der Reibungsanteil zwischen den binderumhüllten Sandkörnern. Dieser Übergang vom kinetischen zum reibungsbedingten Energieaustausch erfordert verschiedene Modelle. Besondere Beachtung findet dabei auch der Übergang vom kinetisch dominierten zum plastischen Fließen. Die Modellierung berücksichtigt darüber hinaus komplexere Zusammenhänge wie Energieverluste des binderumhüllten Sandes z. B. durch inelastische Stöße oder (zufällige) Fluktuation [5].

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 rea-

listische Modellierung des Druckabfalls an den Entlüftungsdüsen.

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 zuvor 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 hochdynamischen Vorgänge und dem Vergleich der Simulation mit der Realität. Die Experimente erfolgten an instrumentierten Maschinen und Versuchseinrichtungen.

Aus der täglichen Praxis ist nicht bekannt, mit welchen Geschwindigkeiten und auf welche Weise Kernsand in die Kernbüchse fließt und dort verdichtet. Mit einem Kernwerkzeug, das auf der Vorderseite aus einer optisch transparenten Kunststoffscheibe besteht, kann das Fließverhalten in Abhängigkeit von den Prozessparametern analysiert werden (Bild 2). Für den vergleichsweise groben Sand H31 führte eine Druckerhöhung von 2 bar auf 4 bar zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit um etwa 50 %, von 6,56 m/s auf 9,18 m/s. Bei der Verwendung eines feineren Grundsandes blieb der Füllgrad bei gleicher Druckvariation gleich. Verschiedene Kernsande verhalten sich so unterschiedlich, dass eine differenzierte Bewertung notwendig ist.

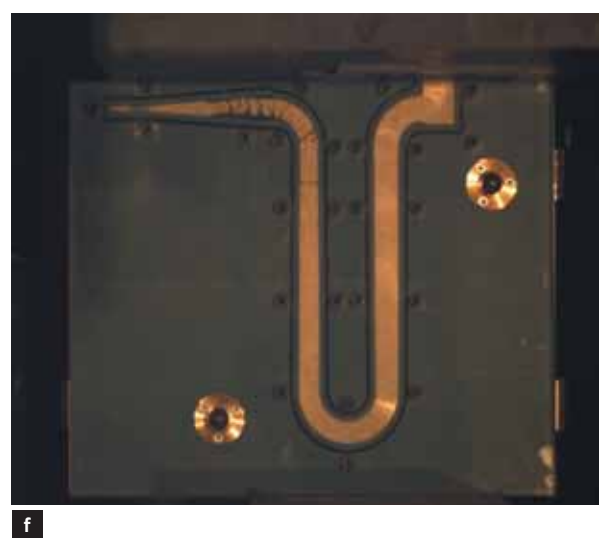
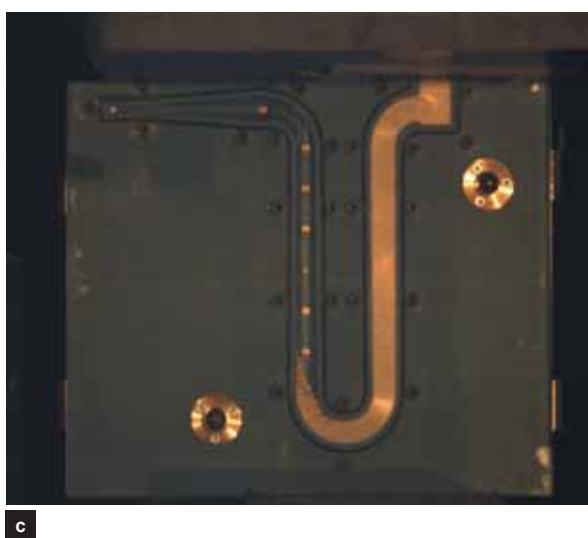
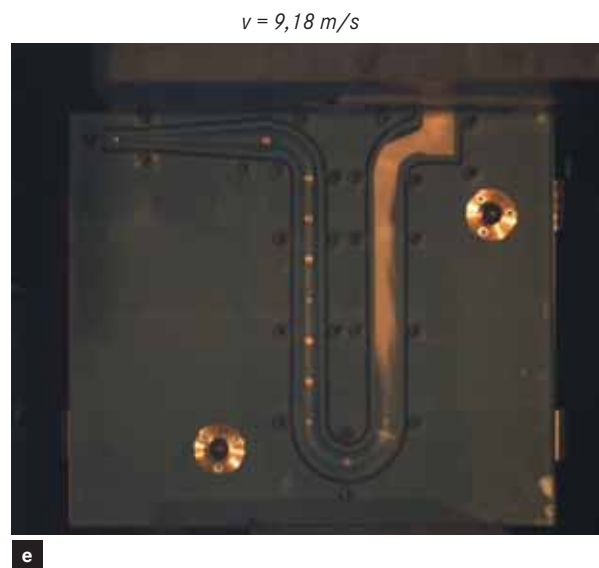
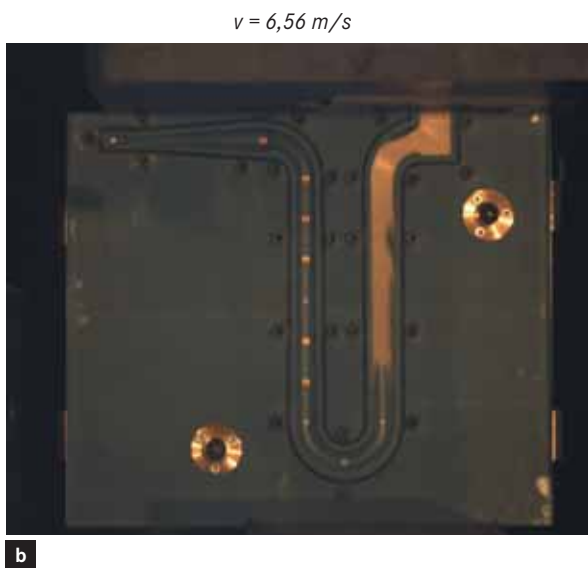
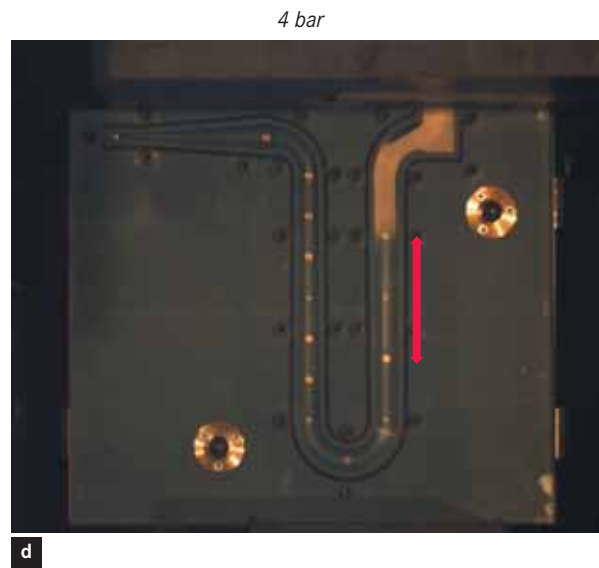
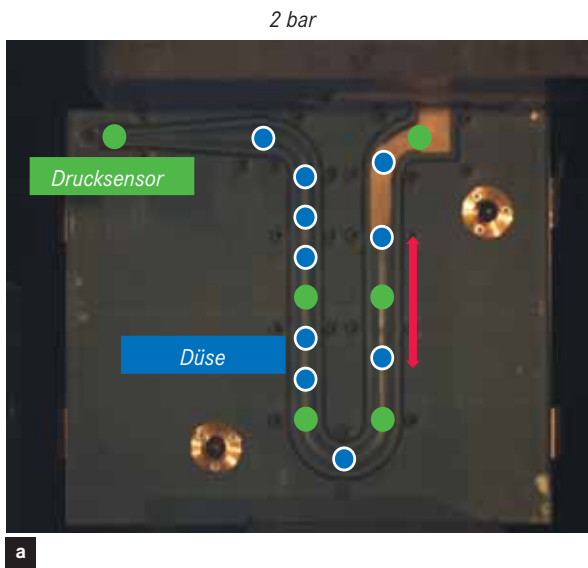
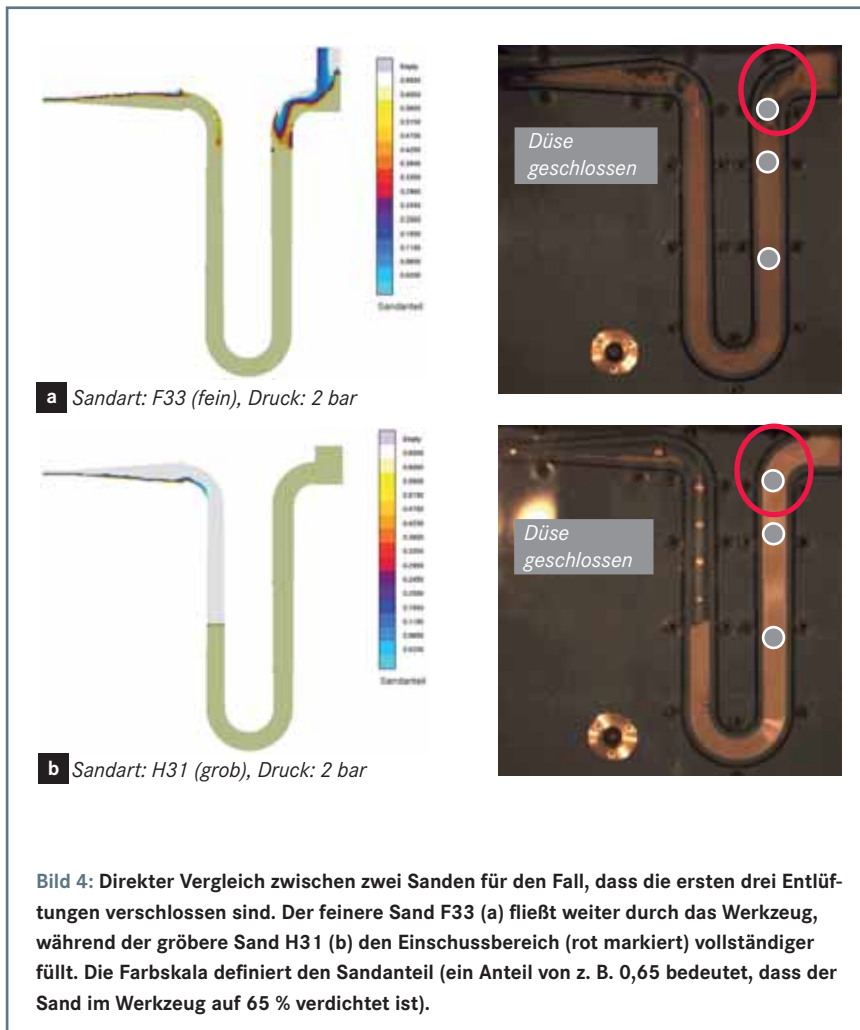
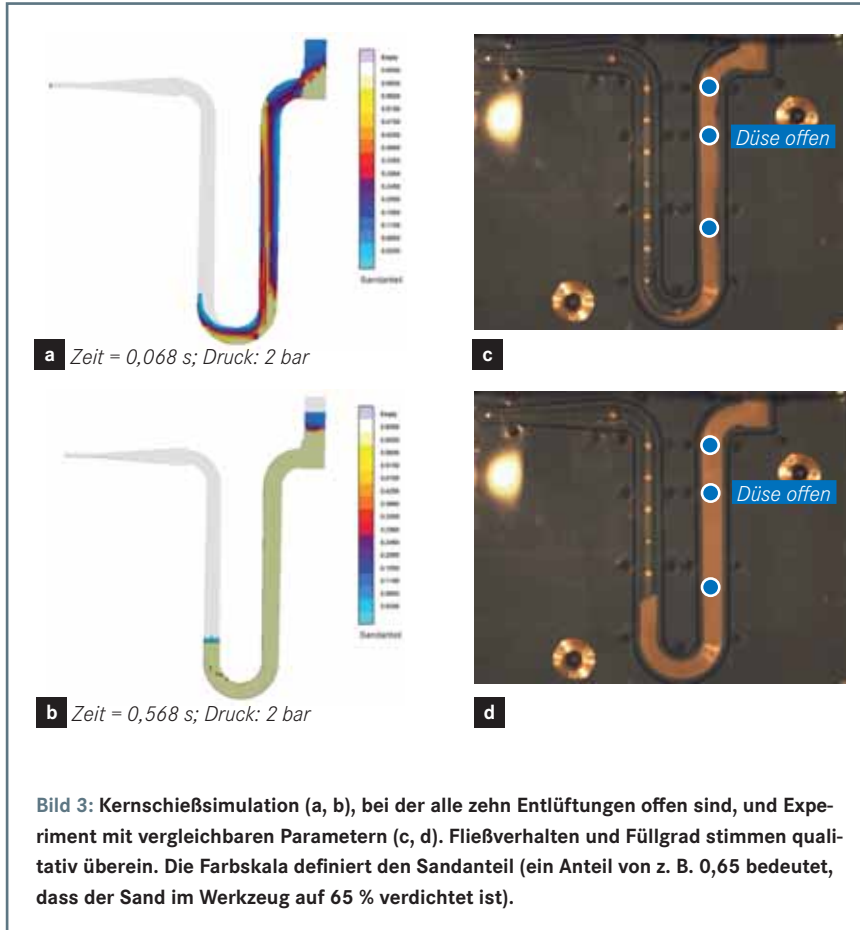


Bild 2: Versuchskernkasten mit zehn Entlüftungsdüsen und sechs Drucksensoren. Aus den Bildfolgen einer Hochgeschwindigkeitskamera mit 500 Bildern je Sekunde wurden die Sandgeschwindigkeiten berechnet (a-b, d-e). Für den grobkörnigen Sand H31 wird bei Druckerhöhung von 2 bar (linke Abbildungen) auf 4 bar (rechte Abbildungen) ein markant höherer Füllgrad erreicht (c und f).



Die Art der Experimente ist ausgezeichnet dazu geeignet, das Fließverhalten des realen Sandes mit Simulationsergebnissen zu vergleichen (Bild 3). Fließdynamik, Sandgeschwindigkeiten und Füllgrad können mit guter Genauigkeit validiert werden. Die Variation der Entlüftungssituation für geometrisch einfache Kerne ermöglicht die Analyse des Wechselspiels zwischen Schieß- und Entlüftungsdüsen. Im gezeigten Beispiel wird der Sand durch den Luftstrom nur teilweise durch die Mäanderwindung des Werkzeugs getrieben. Für diesen geometrisch relativ einfachen Fall kann anschaulich abgeleitet werden, wie sich eine Veränderung der Entlüftungssituation auswirkt. Wenn ein Großteil der Schießluft frühzeitig aus den ersten drei Entlüftungen entweichen kann, fehlt die treibende Kraft für den Sandtransport. Druckmessungen in diesen Bereichen belegen, dass der Schießdruck bereits im Bereich der vierten Entlüftungsdüse vollständig abgebaut ist [1].

Sind die ersten drei Entlüftungsdüsen geschlossen, fließt der Sand weiter durch das Werkzeug (Bild 4). Ein feinerer Sand hat ein höheres Fließvermögen als ein gröberer und fließt weiter in das Werkzeug hinein. Der Einschussbereich wird im Verlauf des Schusses nicht vollständig gefüllt. Die Luft kann durch den schon verdichteten Sand nicht ausreichend fließen, und im Einschussbereich wird durch die gestaute Luft ein Gegenruck aufgebaut. Ein Nachfließen von Sand ist bei einem gröberen Sand eher gegeben. Die Luft durchfließt aufgrund der höheren Gasdurchlässigkeit den bereits verdichteten Sand besser. Es wird kein Staudruck im Einschussbereich aufgebaut und der Einschussbereich wird weiter gefüllt.

Das Fließverhalten eines Kernsandens in ein Werkzeug wird wesentlich von seiner Fließfähigkeit bestimmt. Die granularen Sandmischungen weisen keine physikalisch messbare Viskosität 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. Experimentell ist das zeitliche Fließverhalten in ein Produktionswerkzeug nicht zu visualisieren. Wird ein Schießvorgang z. B. durch Schließen des Schießventils vorzeitig abgebrochen, erhält man zwar ein nur teilgefülltes Werkzeug, aber der Sand fließt aufgrund seiner kinetischen Energie



Bild 5: Teilgefülltes Kernwerkzeug nach Abbruch des Schießprozesses (a) und Simulation des Kernschießens für einen Bremscheibenkern (b). Die Simulation erlaubt beliebige Momentaufnahmen und die Beobachtung von Fließvorgängen, die experimentell nicht zugänglich sind. Die Bewertung des „angehaltenen“ Experiments ist nicht unproblematisch und mit erheblichem Aufwand verbunden.

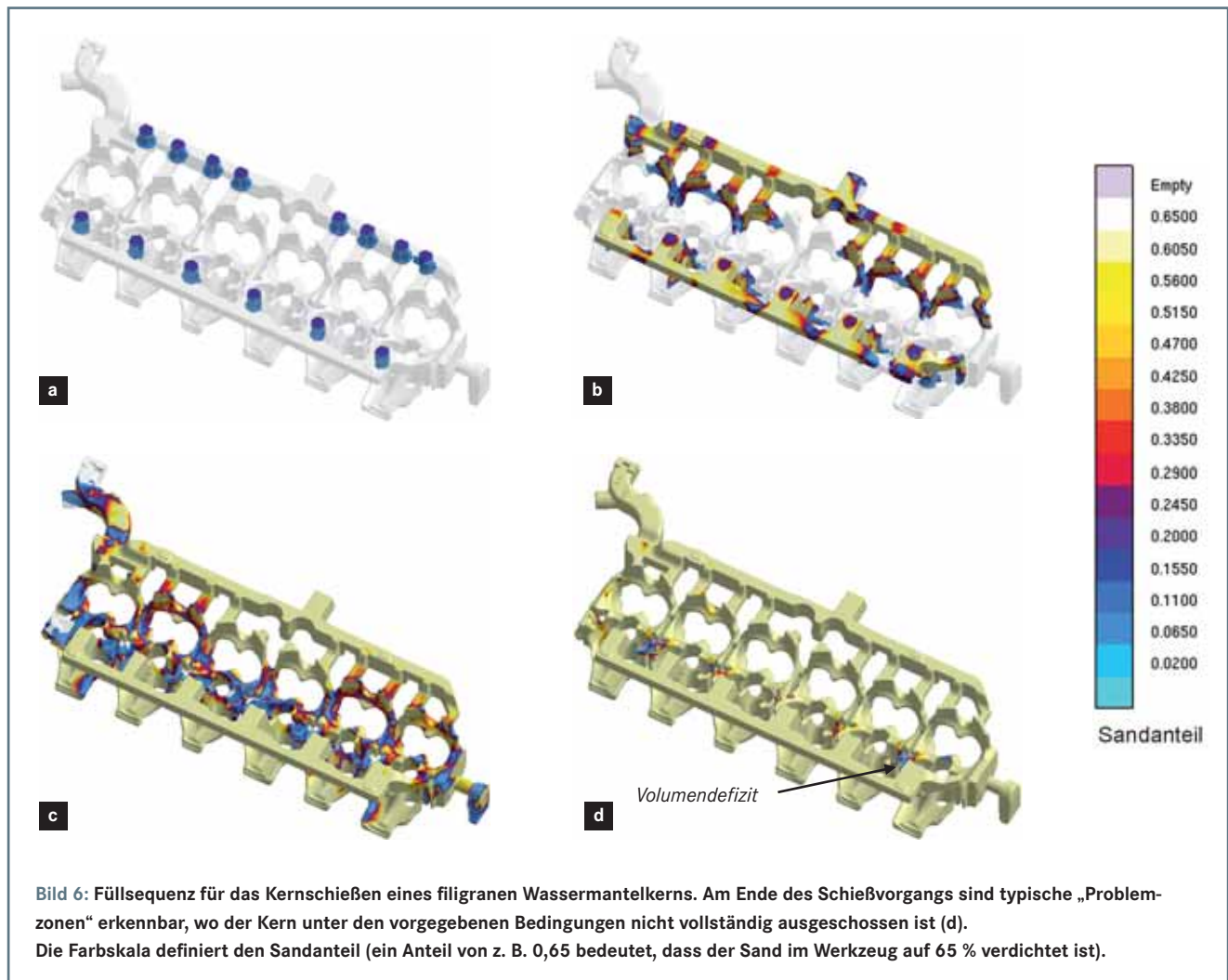
trotzdem noch weiter (Bild 5). Das Kerngewicht kann in erster Näherung Aufschluss darüber geben, ob der Kern im Inneren Volumendefizite aufweist. In der Fertigung braucht man natürlich das gleichmäßig mit guter Dichte gefüllte Kernwerkzeug, um

nach der Aushärtung gute mechanische Eigenschaften des Kerns zu erhalten.

Anwendung der Kernschießsimulation

Die Simulation löst den realen Prozess räumlich und zeitlich detailliert auf. Zu

jedem beliebigen Zeitpunkt erhält man Ergebnisse und Kriterien (Bild 6). Die Bewertung des Kerns nach oberflächlich erkennbaren Fehlern ist ein standardmäßig angewandter Prüfschritt. Experimentelle Ergebnisse und Simulation zeigen eine er-



staunlich gute Übereinstimmung (Bild 7). Auch wenn die Kernqualität stark variiert, ist die Simulation ein ausgezeichnetes Werkzeug, Fehlerursachen zu analysieren und dann den realen Prozess systematisch zu optimieren.

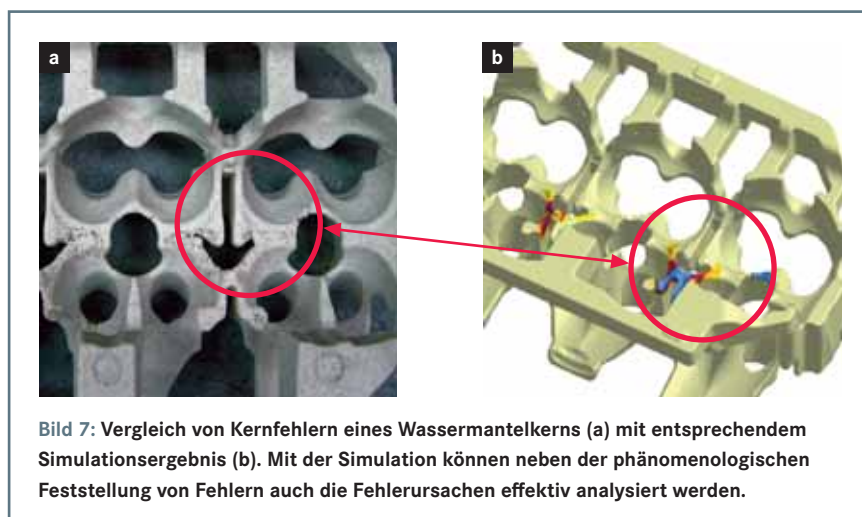
Bei der Simulation des Kernschießens ist je nach Zielsetzung zu entscheiden, ob der Prozess auch mit den relevanten Einheiten der Kernschießmaschine abgebildet

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. Hierzu gehören z. B. die Sandbrückenbildung im Schießkopf oder die Entstehung von Luftkanälen (Bild 8). Wichtig wird die

Berücksichtigung des Schießkopfes, wenn dessen Sandfüllstand während des Schießens so niedrig wird, dass Durchschüsse an einzelnen Düsen den Schießvorgang verändern.

Um die Platzierung der Schießdüsen zu optimieren, kann für jede Schießdüse ein andersfarbiger Sand verwendet werden (Bilder 9 und 10). Es wird dargestellt, welche Schießdüse welches Volumen füllt. Das Zusammenfließen von Sandfronten ist oft eine Ursache von Kernfehlern, wenn an diesen Stellen nicht richtig entlüftet wird. Dann wird Schießluft gestaut und die lokale Sanddichte ist mangelhaft. Die Grenzflächen, an denen Sandfronten zusammentreffen und sich teilweise vermischen, können mit Hilfe der Simulation an der Oberfläche und im Inneren analysiert werden.

Im Rahmen der experimentellen Arbeiten wurde auch die innere Qualität von Kernen mittels CT-Analyse (Computer Tomographie) bewertet. Bei dieser Prüfmethode werden Verdichtungsunterschiede als Grauwertspektrum dargestellt. Die Anwendung auf geometrisch komplexe Kerne verlangt eine höhere Auflösung, die Kalibrierung ist schwieriger und der Prüfauf-



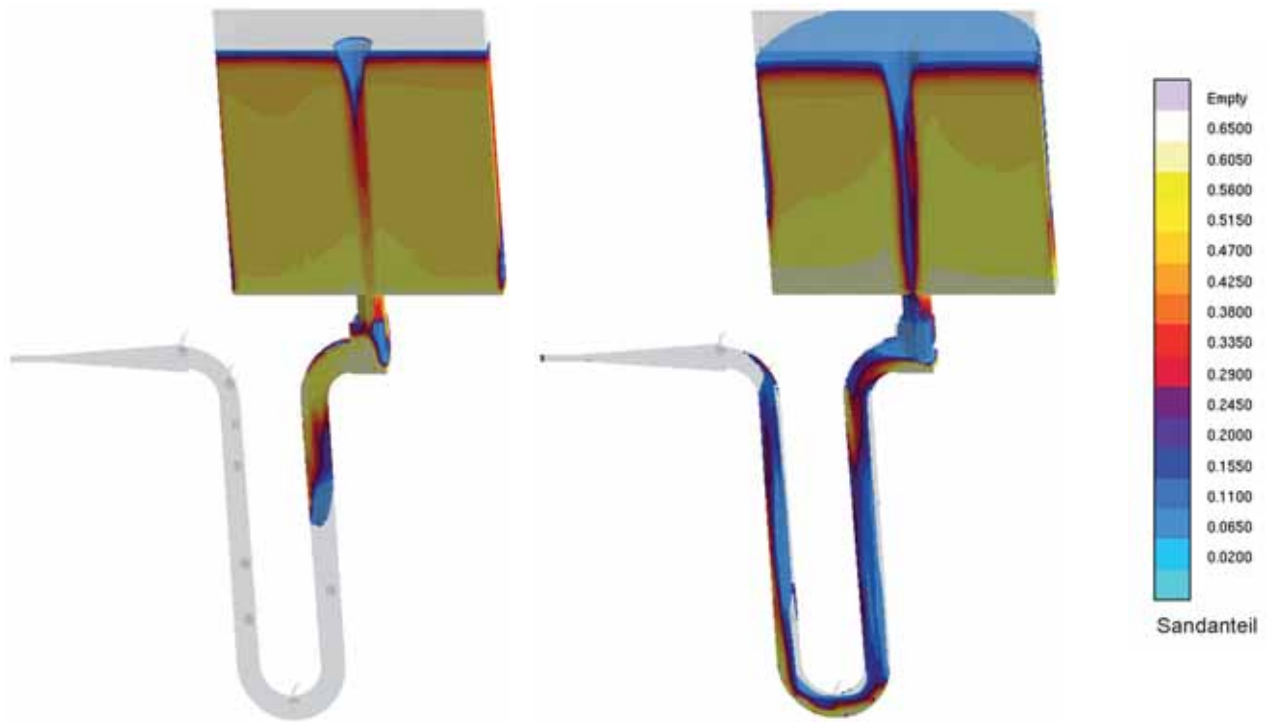


Bild 8: Kernschießsimulation mit geometrisch einfachem Schießkopf zu verschiedenen Zeitpunkten. In Abhängigkeit von Sandart, Schießkopfgeometrie und Füllhöhe können Luftkanäle entstehen. An den betreffenden Schießdüsen fließt dann nicht genügend Sand in das Kernwerkzeug. Die Farbskala definiert den Sandanteil (ein Anteil von z. B. 0,65 bedeutet, dass der Sand im Werkzeug auf 65 % verdichtet ist).

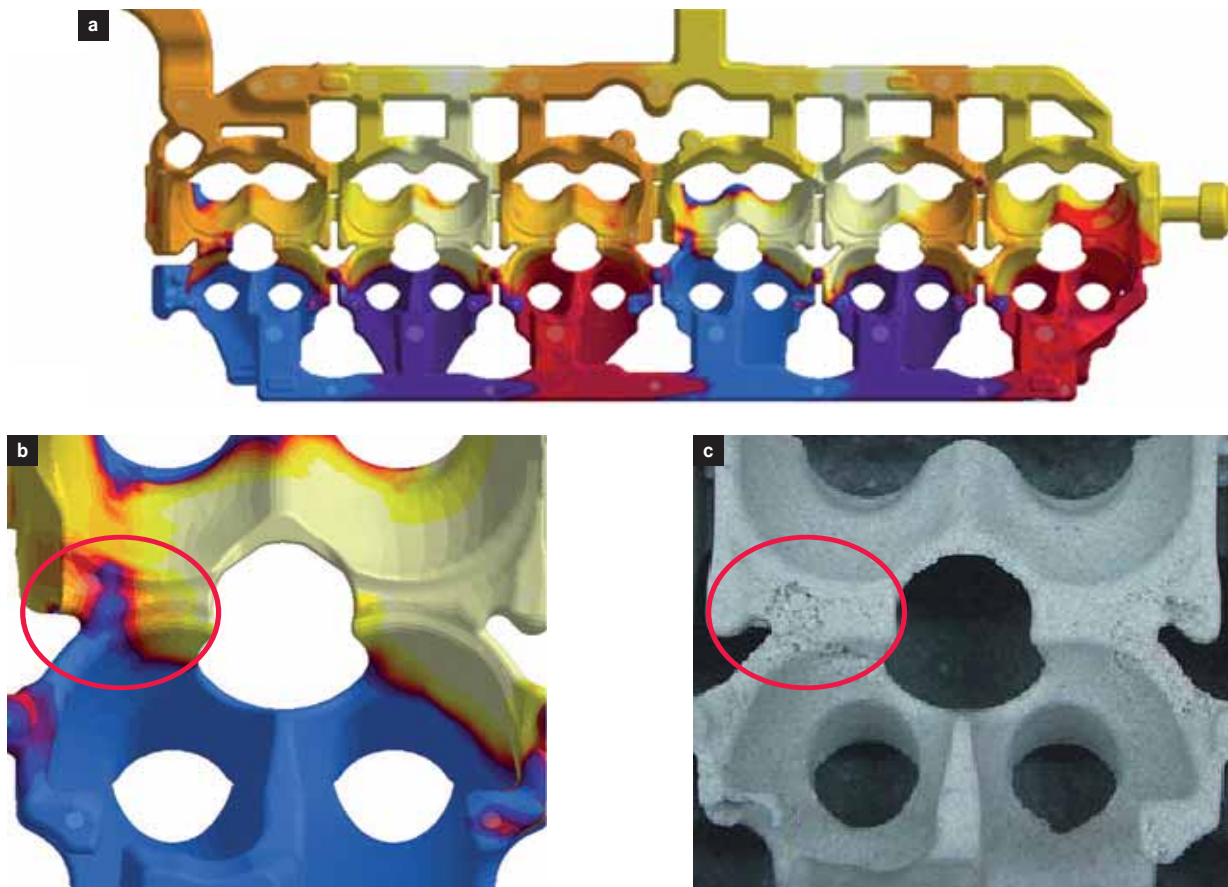


Bild 9: Schießsimulation für einen Wassermantelkern mit Farbindikation der Sande aus verschiedenen Schießdüsen (a-b) und experimentelles Ergebnis (c). Zusammentreffende Sandfronten können eine Fehlerursache sein. Die Verwendung „farbiger Sande“ erleichtert die Analyse der Fehlerursachen.



Bild 10: Serienkern (a) und experimenteller Kern mit eingefärbtem Sand (b), im Vergleich mit dem Simulationsergebnis mit virtuell eingefärbtem Sand (c). Ein in der Praxis auftretender Fehler wurde in gleicher Weise in der Simulation gefunden.

wand erheblich. Die Simulation der Kernaushärtung ermöglicht eine differenzierte Analyse des Kerninneren. Volumendefizite können erkannt und bewertet werden (Bild 11). Eine reduzierte Dichte im Kerninneren führt in der Praxis nicht automatisch zum Kernausschuss. Kerne werden bei der Entnahme aus dem Werkzeug, beim weiteren Handling und während des Gießprozesses mechanisch bzw. thermomechanisch belastet. Aus dieser Belastung ergeben sich kritische und unkritische Bereiche für Kernfehlstellen, die entsprechend bewertet werden müssen.

Modellierung der Kernaushärtung und der Binderzersetzung

Prozesstechnisch sind Kernaushärtung, also Begasen und Spülen sowie die Binderzersetzung während des Gießprozesses grundverschiedene Vorgänge. Die zur Beschreibung der Vorgänge notwendigen mathematischen Modelle sind jedoch sehr ähnlich (Tabelle 2). Charakteristisch ist für beide Prozesse der Transport von Gas durch den offenen Porenraum von Sandkernen. Die Gasgeschwindigkeit ist dabei eine Funktion des Druckgradienten und wird durch ein Darcy-Gesetz beschrieben.

Ein wesentlicher Unterschied ist, dass bei der Kernaushärtung dem Kernwerkzeug von außen Gas zugeführt wird, das über die Entlüftungen entweichen kann. Bei der Binderzersetzung während des Gießprozesses entstehen heiße Gase aufgrund der Bindererhitzung im Kern. Der sich aufbauende Gasdruck führt zu einer Gasströmung durch den Kern. Die Zersetzungsgase können z. B. über Kernmarken entweichen, aber bei frühzeitiger Emission kurz nach dem Eingießen der Schmelze sowie bei unzureichender Entlüftung unter Umständen in das Gussteil gedrückt werden. Besonders kritisch ist ein plötzlicher Gasstoß.

Die Modelle für die Kernaushärtung sind so allgemein formuliert, dass die gängigen Härtungsmechanismen wie Gashärtung (z. B. PUR-Cold-Box) oder Trocknungshärtung (anorganische Binder) simuliert werden können [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.

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 durch Trocknungsluft sowie der Transport des Wasser-

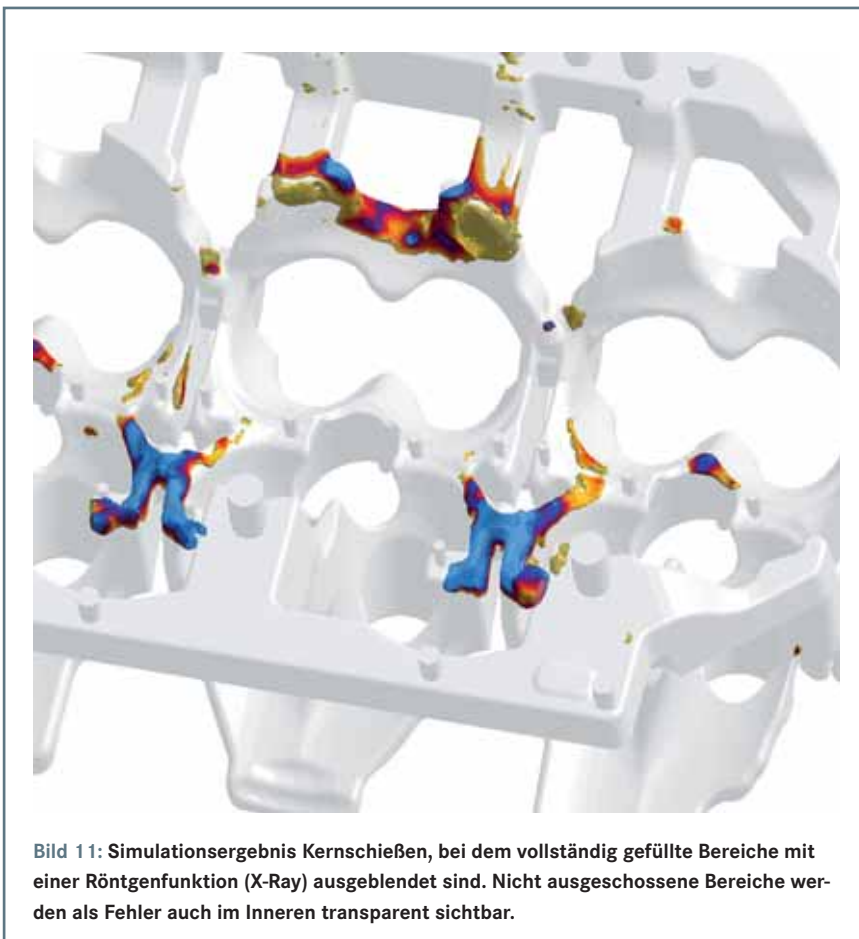


Bild 11: Simulationsergebnis Kernschießen, bei dem vollständig gefüllte Bereiche mit einer Röntgenfunktion (X-Ray) ausgeblendet sind. Nicht ausgeschossene Bereiche werden als Fehler auch im Inneren transparent sichtbar.

dampfes 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.

Simulation der Gasaushärtung

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

Angewendet auf eine reale Kernproduktion ergibt sich für Gasaushärtung und Spülprozess eine dreidimensional räumlich und zeitlich komplexe Strömungssituation (Bild 12). Am Ende der aktiven Aminzufuhr hat Amin regelmäßig noch nicht den gesamten Kern erreicht. Diese

Tabelle 2: Mathematische Grundgleichungen für die Modellierung der Kernaushärtung und der Binderzersetzung beim Gießprozess

Erhaltungsgleichung für die verschiedenen Stoffe

Gasphase

$$\frac{\partial}{\partial t} C_k + \nabla \cdot (\rho_k \bar{U} \hat{C}_k) = \nabla \cdot [(1 - \varepsilon_s) \rho_k D_k \nabla \hat{C}_k] + R_k$$

Kondensate

$$\frac{\partial}{\partial t} C_{k'} = R_{k'}$$

Verdampfung/Kondensation

$$R_k = S_p \omega_k = S_p k_c \rho_k \left[\frac{P_k^{sat}(T)}{P_g} - \hat{C}_k \right]$$

Darcy-Gesetz

$$\bar{U} = -\frac{K}{\mu_g} \nabla P_g$$

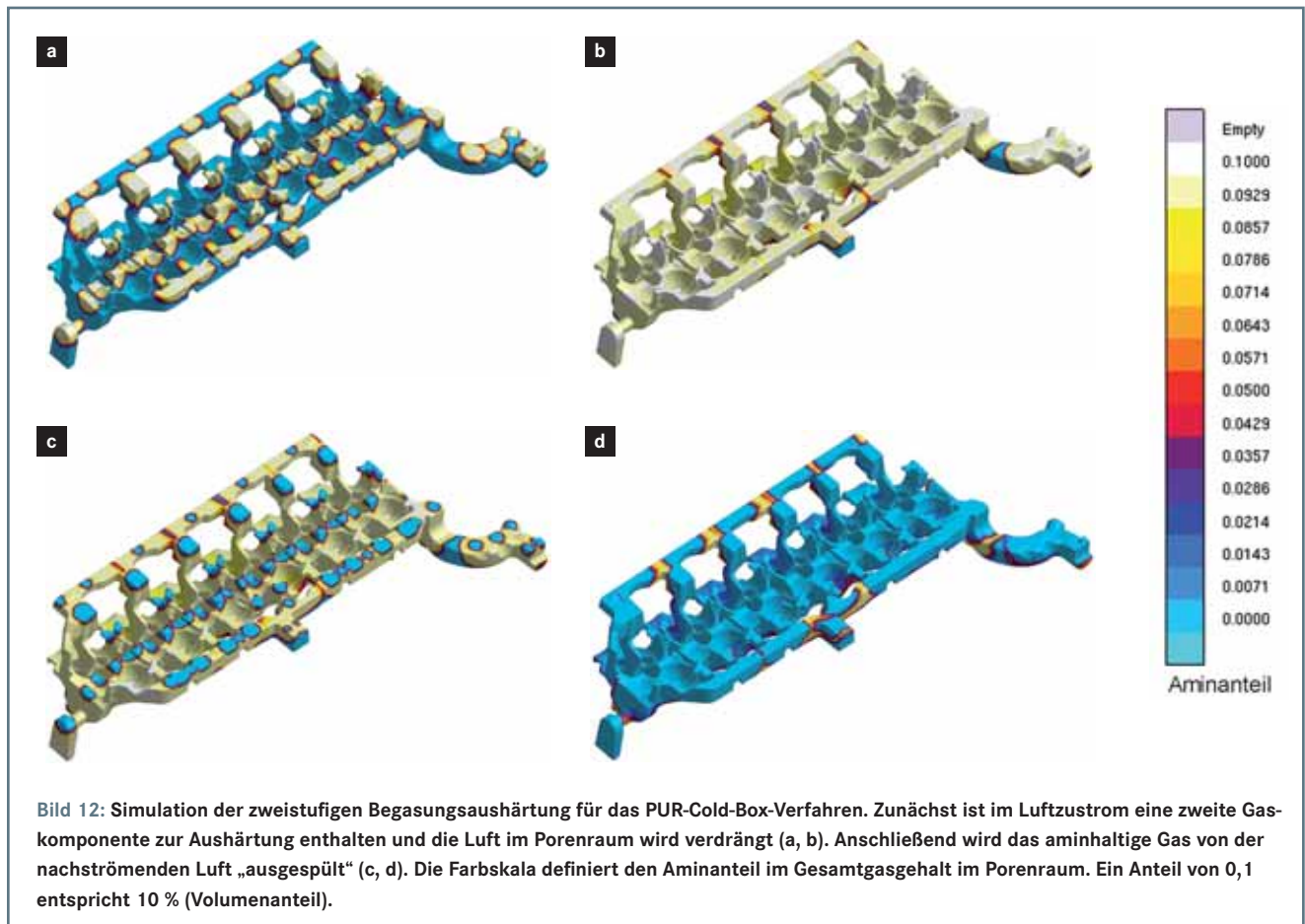
Binderzersetzung

$$R_k = \frac{dM_k}{dt} = M_B r_k(T) = M_B f_k \exp\left\{ \frac{-E_k}{RT} \right\}$$

Bezeichnung der Größen:

C_k Massenkonzentration der Gaskomponente \bar{U} Geschwindigkeitsvektor
 \hat{C}_k Volumenanteil der Gaskomponente im Porenraum D_k molekularer Diffusionskoeffizient der Gaskomponente R_k Entstehungsrate S_p spezifische Oberfläche
 ω_k Entstehungsrate pro Flächeneinheit k_c Massenumsetzungskoeffizient
 $P_k^{sat}(T)$ Sättigungsdampfdruck der Komponente k K Permeabilität
 μ_g Gasviskosität P_g Gasdruck M_k Konzentration der Zersetzungsprodukte
 M_B Bindergehalt f_k Reaktionsrate r_k Reaktionsgeschwindigkeit
 E_k Aktivierungsenergie R allg. Gaskonstante T Temperatur

Indizes: k gasförmige Komponente k' flüssige Komponente (Kondensat)



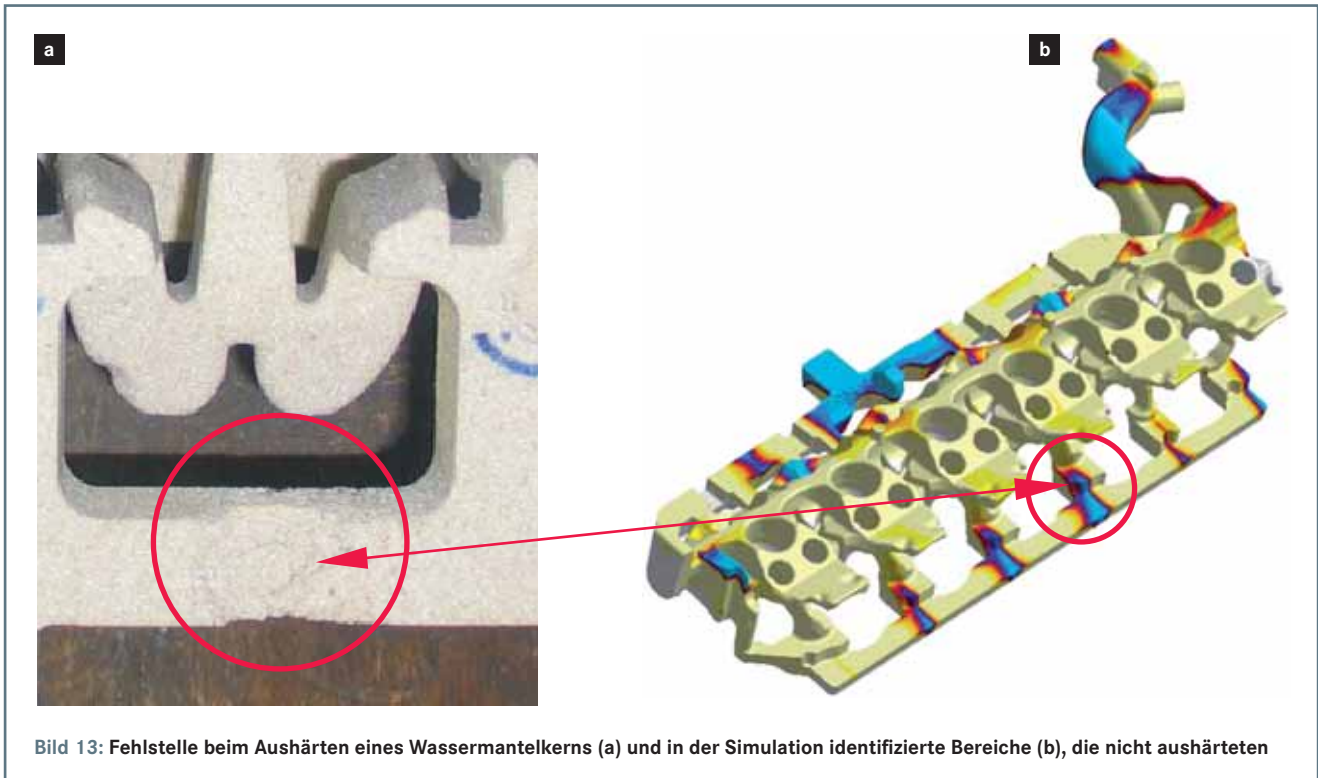


Bild 13: Fehlstelle beim Aushärten eines Wassermantelkerns (a) und in der Simulation identifizierte Bereiche (b), die nicht aushärteten

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 ver-

gleichenden Experiment wurden nach Abblasen des Kerns mit Druckluft Bereiche gefunden, die nicht ausgehärtet waren (Bild 13). 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 Qualitätseinbußen auf nur noch 10 % drastisch reduziert werden. Kosten können eingespart sowie Arbeitsplatz- und Umweltbelastung reduziert werden.

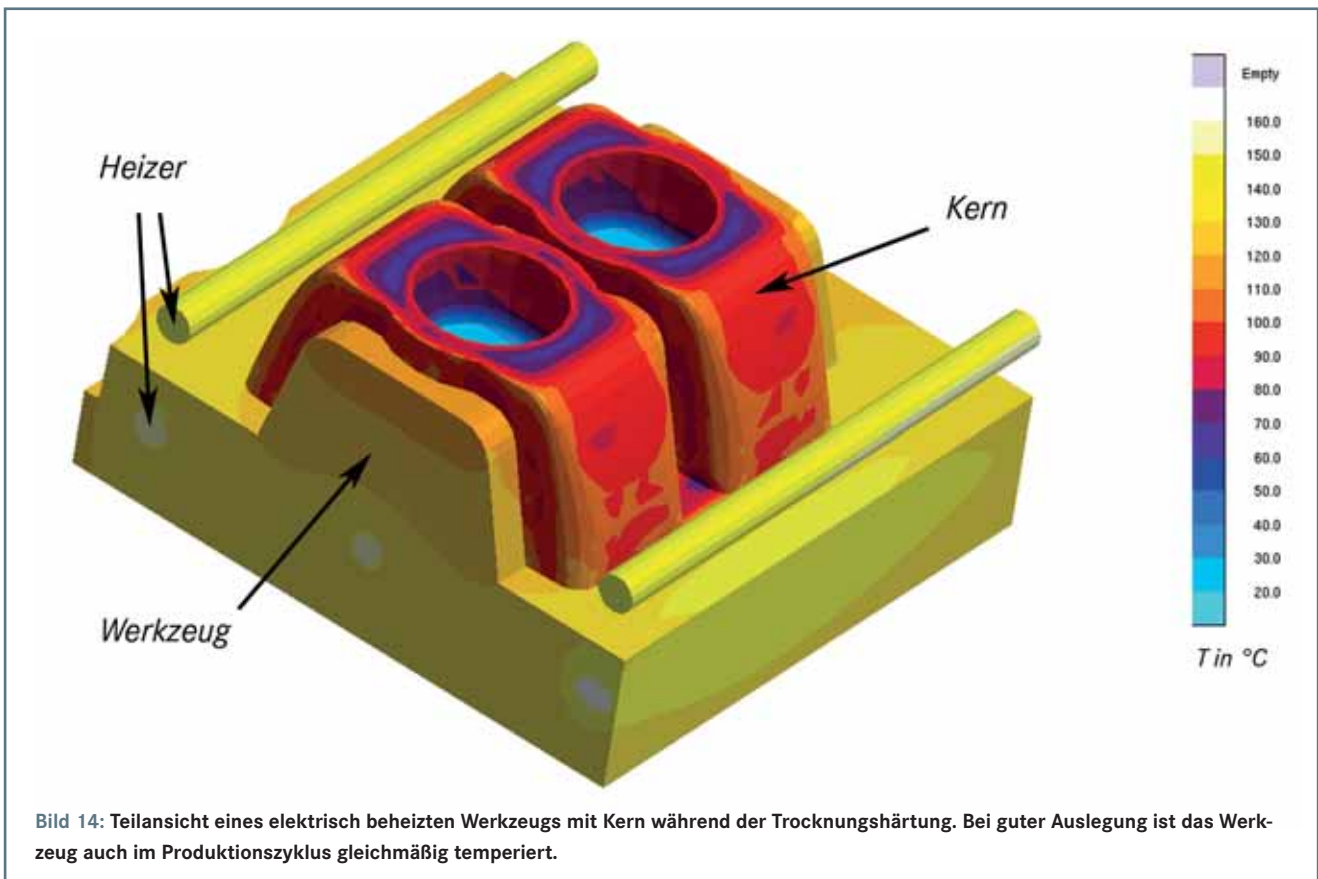
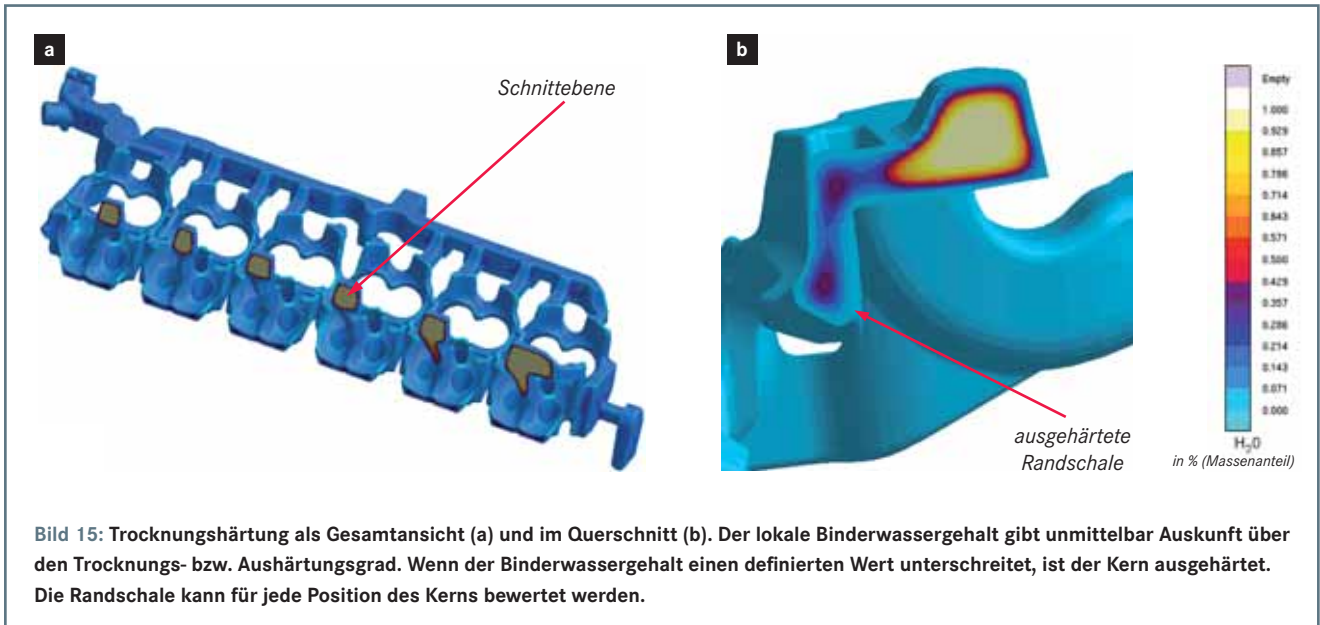


Bild 14: Teilansicht eines elektrisch beheizten Werkzeugs mit Kern während der Trocknungshärtung. Bei guter Auslegung ist das Werkzeug auch im Produktionszyklus gleichmäßig temperiert.



Simulation der Trocknungshärtung

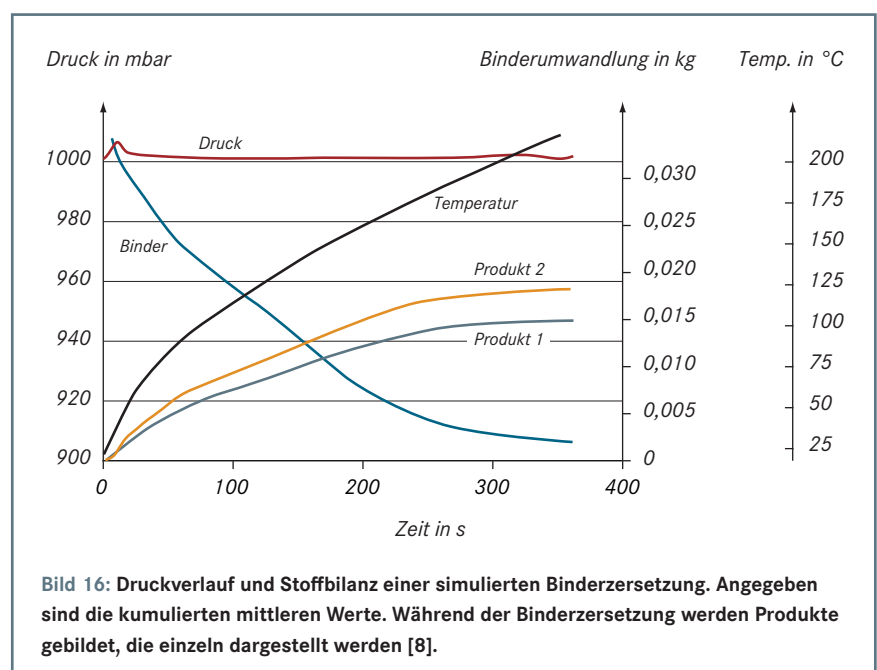
Die Aushärtung anorganisch gebundener Sande ist physikalisch komplex. Ziel der Simulation ist es, die in temperierten Werkzeugen ablaufenden Vorgänge quantitativ richtig abzubilden. Die bestmögliche Temperierung der Werkzeuge ist in hohem Maße mitentscheidend für die erfolgreiche Kernproduktion mit wirtschaftlich vertretbaren Zykluszeiten. Eine gleichmäßige Temperierung fördert auch eine gleichmäßige Randschalenbildung. Eine ausreichende Randschale ist erforderlich, um den Kern aus dem Werkzeug entnehmen zu können. 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 (Bild 14). 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.

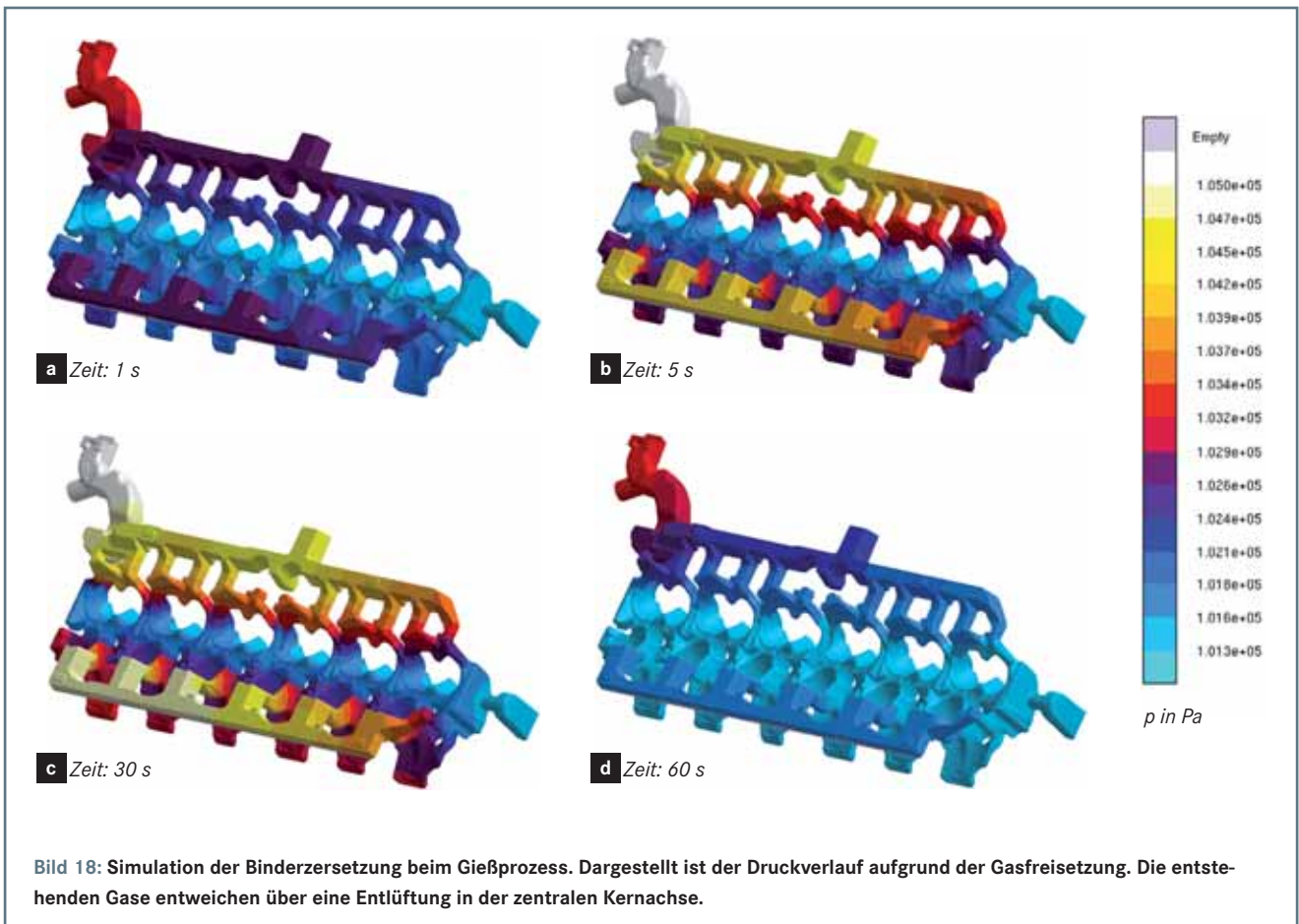
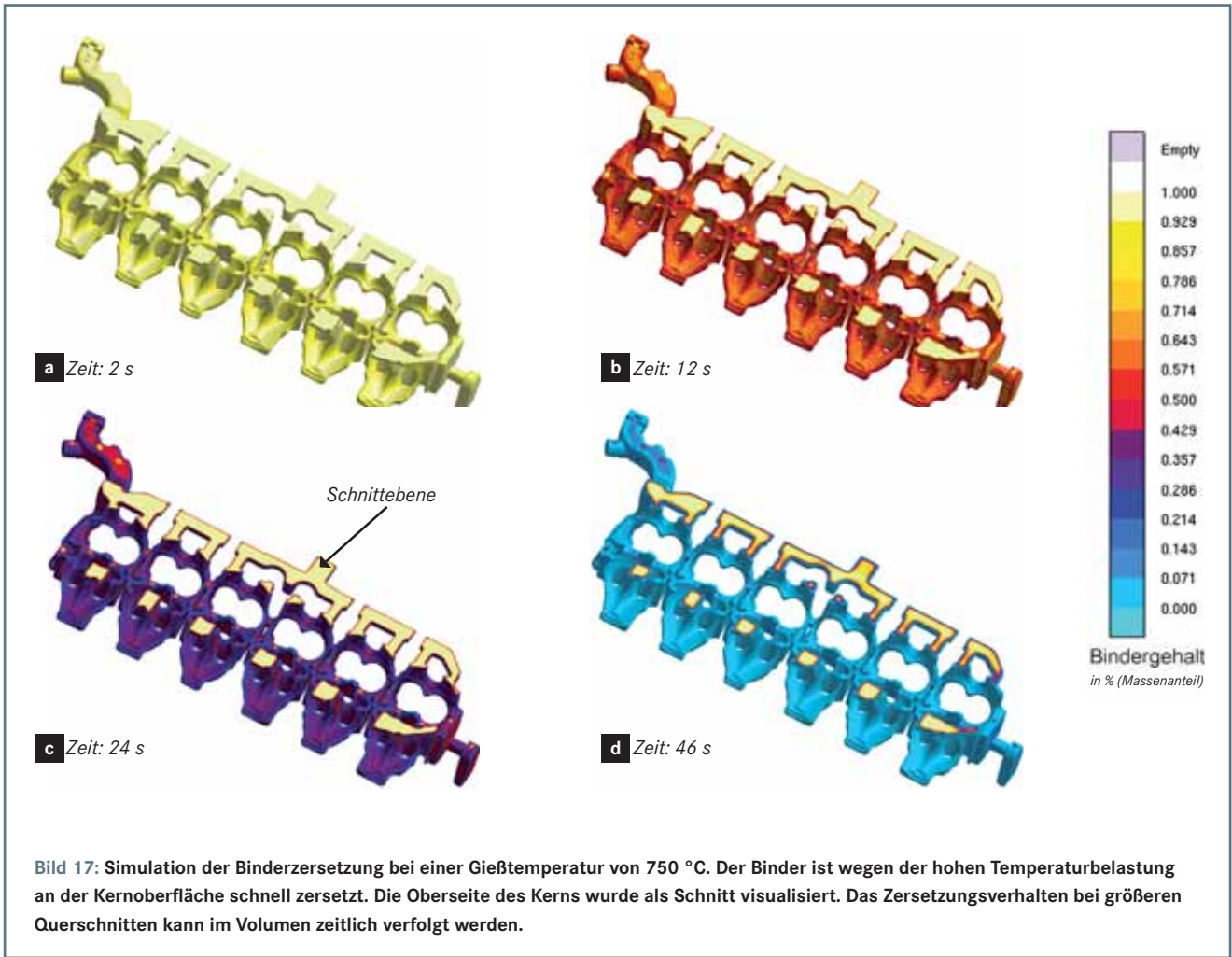
Der Trocknungsvorgang ist ein sehr dynamischer Prozess. Nach Einschleusen des Sandes in das Werkzeug wird die Sandmischung im heißen Werkzeug von außen nach innen erhitzt (Bild 15). Binderwasser verdampft an der Kernoberfläche. Dadurch wird der Kern lokal ausgehärtet. Durch chemisch reagierende Additive werden dabei gewünsch-

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

Simulation der Binderzersetzung beim Gießprozess

Der Gießprozess ist der letzte Prozessschritt im Lebenszyklus eines Sandkerns. Während des Formfüllens und der Erstarrung wird der Kern mechanisch und thermisch belastet. Mit Erhitzung des Kerns durch das Gießmetall wird Kernbinder zerersetzt (Bild 16). Mit Verfügbarkeit experimenteller Daten zur Binderzersetzung [1, 6] ist auch eine zeitlich und räumlich aufgelöste Simulation der Binderzersetzung während des Gießprozesses sinnvoll möglich (Bild 17). Unter Einwirkung der Gießhitze wird der Binder in Abhängigkeit von seiner lokalen thermischen Geschichte pyrolysiert und/oder verdampft. Die Gasentwicklung führt zu einem Druckaufbau im Kern (Bild 18). Der Gasdruck führt zu ei-





ner Gasströmung. Erfolgt die Gasemission sehr kurz nach dem Eingießen der Schmelze, kann Gas in das Gussteil gedrückt werden und zu formstoffbedingten Gussfehlern führen. Gase können über Kernmarken und Entlüftungskanäle aus dem Kern entweichen, um Gussfehler sicher zu vermeiden. Die Tendenz zur Gasentwicklung ist für praxisübliche Bindersysteme sehr unterschiedlich. Günstig ist es z. B., wenn die Gase zeitlich verzögert entstehen. Ist zu diesem Zeitpunkt bereits eine ausreichende metallische Randschale an der Grenzfläche zum Kern entstanden, ist die Gefahr von Gussfehlern gering. Die Simulation der Binderersetzung erfolgt am effektivsten in direkter Kopplung mit der Gieß- und Erstarrungssimulation.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Entwicklungsarbeit war es, ein virtuelles Werkzeug zur Simulation der Kernherstellung zu realisieren, 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 Pro-

zessschritten 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 aufwendige praktische Versuche mit dem Werkzeug durchzuführen. Eine Optimierung von Werkzeugen für die Serienproduktion wird zeitlich verkürzt und Kosten werden eingespart.

Die grundlagenorientierten Forschungsarbeiten wurden über das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.), Bonn, mit Haushaltsmitteln des BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), Berlin, im Rahmen des Verbundvorhabens „VIGI“ unter dem Kennzeichen 01R105008 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 Mitarbei-

tern für den engagierten konstruktiven fachlichen Erfahrungsaustausch.

Von Ingo Wagner und Marc Schneider, MAGMA GmbH, Aachen

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.*