



FOTOS: MAGMA

# Der virtuelle Kern – von der Herstellung bis zum Gießprozess

Fachgespräche an der virtuellen Kernschießmaschine: Was passiert wirklich in Maschine und Werkzeug?

VON SANJEEV KUMAR, JÖRG C. STURM, JESPER THORBORG UND INGO WAGNER, AACHEN

Neben der numerischen Beschreibung der einzelnen Prozessschritte ist die Ermittlung von geeigneten Materialdaten für die unterschiedlichen Einsatzgebiete – nicht nur aufgrund der Vielfalt von Formstoffsystemen – eine Herausforderung. Da die Eigenschaften von Formstoffen weder bei ihrer Herstellung noch im Einsatz durch klassische Kontinuumsmechanik beschreibbar sind, können die bekannten physikalisch-technischen Messmethoden zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens häufig nicht verwendet werden oder sind für eine umfassende Materialbeschreibung unzureichend. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass sich die Werkstoffeigenschaften im Einsatz sowohl irreversibel als auch zeit- und tem-

peraturabhängig verändern. Dieser Beitrag beschreibt den Stand der Möglichkeiten zur Modellierung des komplexen Mehrstoffsystems „Kernsand“ von der Kernherstellung bis zum Verhalten beim Abguss. Dabei werden für alle Prozessschritte das sich sowohl zeitlich als auch mit der Temperatur verändernde Werkstoffverhalten des granularen Werkstoffs und seine Auswirkungen auf die Herstellung, das Werkzeug und die Gussteilqualität diskutiert.

## Der Lebenszyklus von Sandkernen

Kernsand durchläuft von der Mischung der Rohmaterialien bis zur Regenerierung nach dem Abguss zahlreiche Prozessschritte verschiedenster Art. Diese Prozesskette kann heute in ihren wesentlichen Teilschritten zusammenhängend simuliert werden (Bild 1). Nach der Aufbereitung der Kernsandmischung ist das Kernschie-

ßen der erste berechenbare Schritt. Neben dem eigentlichen Füll- und Verdichtungsverhalten werden auch damit verbundene Effekte wie der abrasive Verschleiß im Werkzeug virtuell abgebildet.

Die Vorgehensweise für die Simulation der Aushärtung von Kernen hängt insbesondere von den Besonderheiten des jeweiligen Bindersystems ab. Die Aminbelegung für das Cold-Box-Verfahren ist genauso berechenbar wie die Trocknungshärtung von anorganisch gebundenen Kernsanden in temperierten Werkzeugen. Nach der Kernherstellung ändern sich deren Eigenschaften durch Nachbehandlung und Lagerung bis zum Gießen. Hierbei werden derzeit Lücken in der Simulationskette geschlossen, um die Eigenschaften von Sandkernen sinnvoll als Eingangsgrößen für die Gießprozess-Simulation verwenden zu können. Während des eigentlichen Gießprozesses können heute

das Verformungsverhalten des Kerns beim Gießen und der aus dem Kernzerfall resultierende Gasstoß vorhergesagt werden, um dadurch Kerneigenschaften integrativ zu modellieren.

### Virtuelle Kernschießmaschine

Die Modellierung des Kernschießens ist wegen der sich kontinuierlich ändernden Strömung von Luft und Sand ein anspruchsvoller Vorgang. Das Strömungsverhalten ist anders als beim Gießen von Metallschmelzen, von den sich ständig ändernden lokalen Fließ- bzw. Strömungsbedingungen des „Fluids“ Luft und des granularen Sandes abhängig. Der harzhüllte Sand wird durch beschleunigte Luft im Schießkopf der Kernschießmaschine fluidisiert und über die Schießdüsen in das Werkzeug transportiert. Die Verdichtung des Sandes in der Kernbüchse ist mit der erneuten Trennung vom Trägergas Luft durch die Entlüftungsdüsen verbunden. Die Wechselwirkungen von Luft und Sand untereinander sowie mit ihrer Umgebung (Schießzylinder, Düsen, Werkzeug) erfordern zusätzlich die Berücksichtigung technologischer Randbedingungen und die Integration von Fachwissen.

Zur Beschreibung der Dynamik von Luft-Sand-Gemischen beim Kernschießen ist es notwendig, einen Ansatz zu wählen, bei dem Luft und Sand bzw. Sand-Binder-Mischungen als zwei separate Phasen behandelt werden (Bild 2). Neben der dominanten Impulsübertragung zwischen Luft und Sand wird dabei auch die Wechselwirkung der Sandkörner untereinander berücksichtigt [1, 2]. Zur Prozessmodellierung gehört zudem die Berücksichtigung maschinentechnischer Größen wie 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 über Druckabfallgesetze modelliert werden. 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. Je nach Zielsetzung ist für die Simulation des Kernschießens zu entscheiden, ob die wesentlichen Einheiten der Kernschießmaschine mit berücksichtigt werden müssen oder ob es ausreicht, das Simulationsmodell durch geeignete Rand-

### KURZFASSUNG:

Eine erfolgreiche Gussteilentwicklung ist in hohem Maße von der planbaren Herstellbarkeit des Kerns und seiner reproduzierbaren Qualität abhängig. Die Prozess-Simulation leistet heute einen wesentlichen Beitrag, um komplexe Abläufe bei der Herstellung von Gussteilen zu beherrschen und immer anspruchsvollere Bauteile wirtschaftlich fertigen zu können. 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 kann die Kernfertigung mit den einzelnen Prozessschritten virtuell abgebildet werden. Der gesamte Prozessablauf und die relevanten physikalischen Größen werden transparent. Dies erlaubt eine zielgerichtete Vorgehensweise auf Basis von physikalischen Zusammenhängen und klaren Fakten.

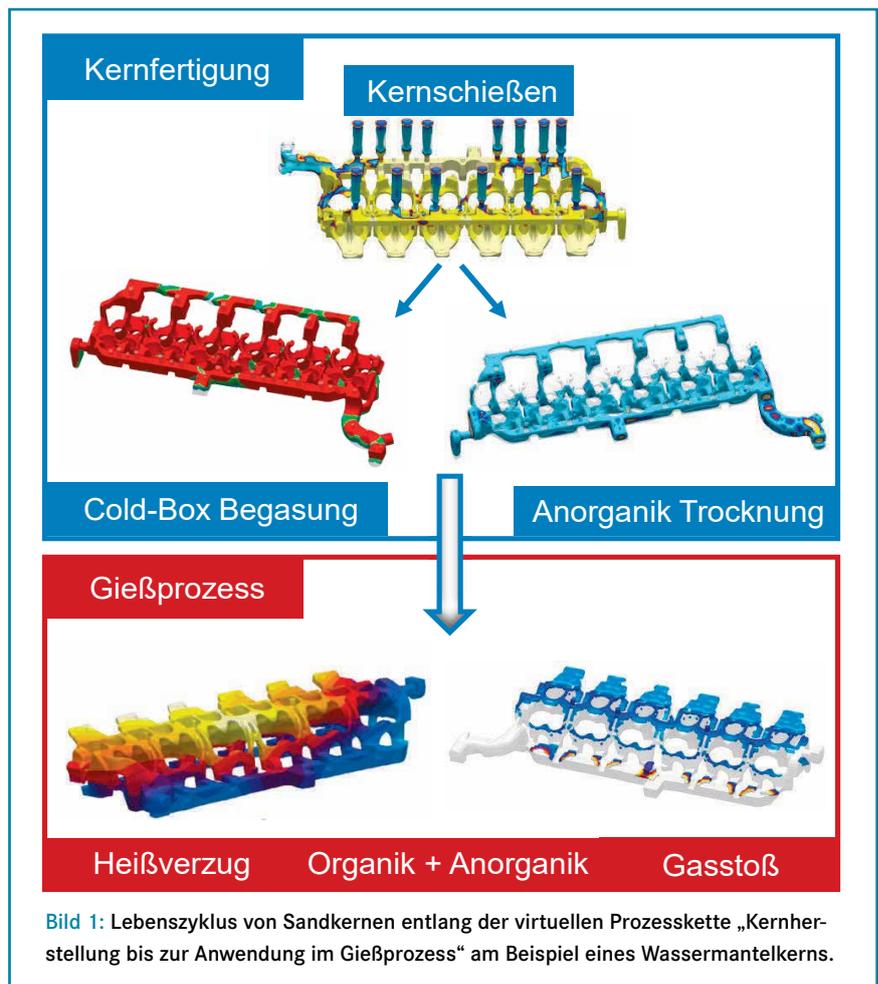


Bild 1: Lebenszyklus von Sandkernen entlang der virtuellen Prozesskette „Kernherstellung bis zur Anwendung im Gießprozess“ am Beispiel eines Wassermantelkerns.

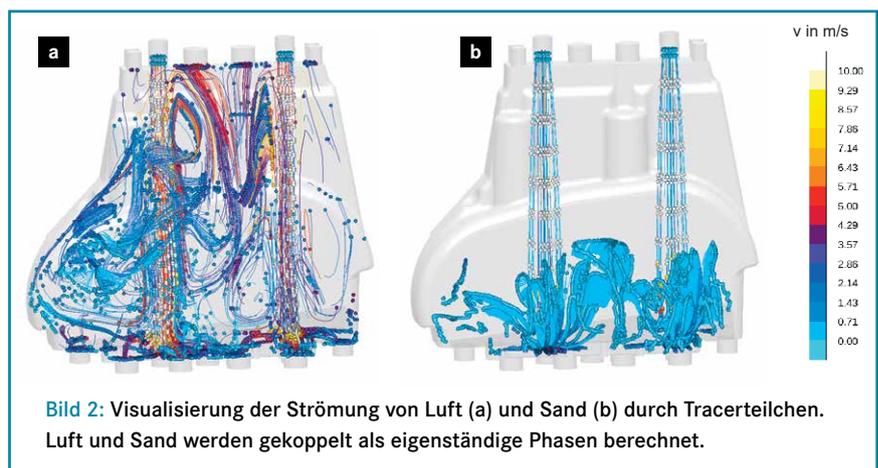
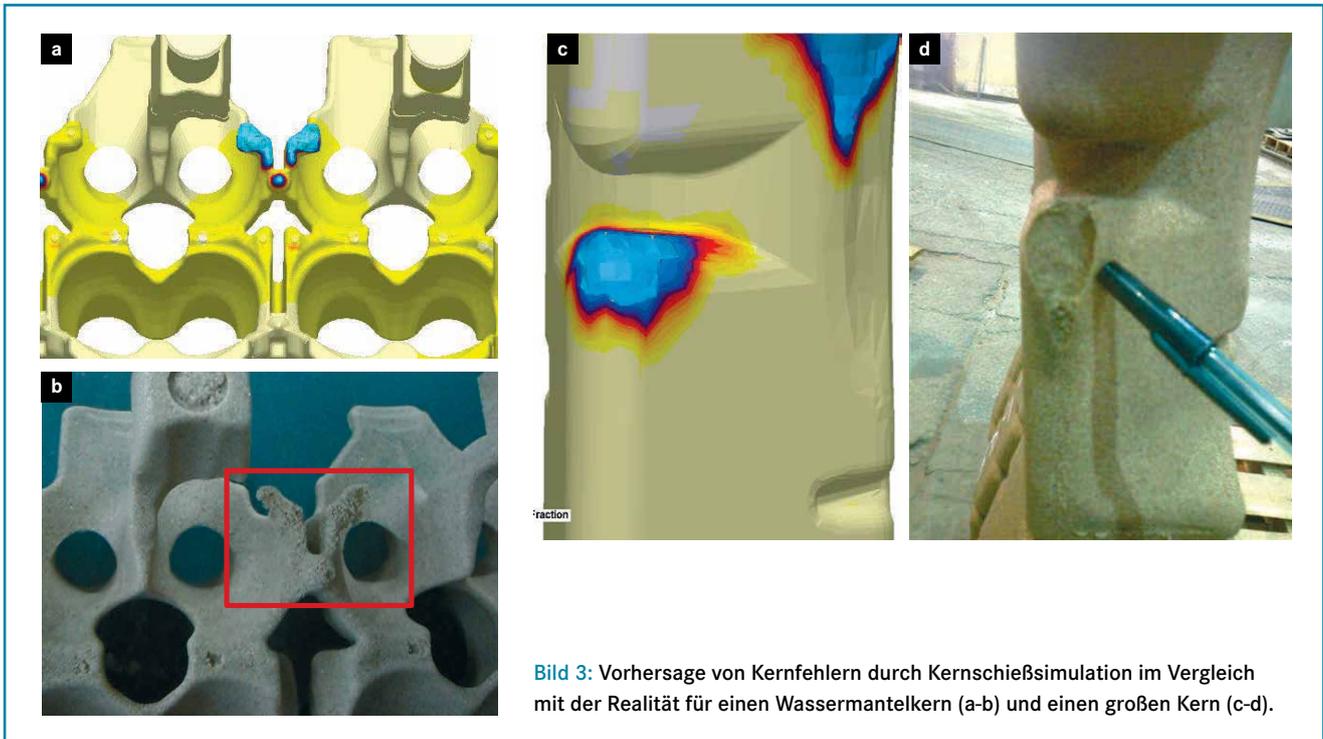


Bild 2: Visualisierung der Strömung von Luft (a) und Sand (b) durch Tracerteilchen. Luft und Sand werden gekoppelt als eigenständige Phasen berechnet.

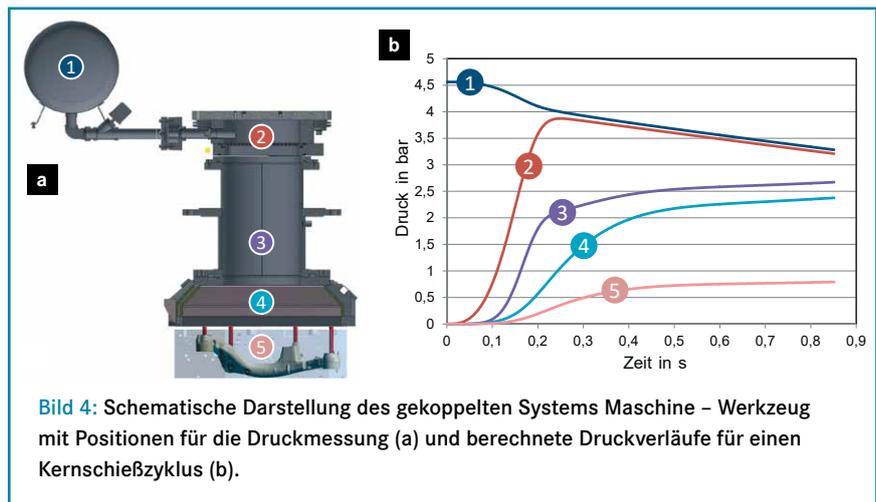


**Bild 3:** Vorhersage von Kernfehlern durch Kernschießsimulation im Vergleich mit der Realität für einen Wassermantelkern (a-b) und einen großen Kern (c-d).

bedingungen an den Schießdüsen auf das Werkzeug zu reduzieren. Dadurch wird die erforderliche Ergebnisqualität mit einem Minimum an Rechenzeit erreicht und der Prozessablauf und die Qualität des Kerns können zuverlässig bewertet werden (Bild 3).

Zur Ermittlung geeigneter Randbedingungen wurde bei MAGMA eine Software entwickelt, die das Gesamtsystem „Kernschießmaschine“ mit allen relevanten Maschinenteilen und ihrer Funktionalität vereinfacht abbildet [3] (Bild 4). Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Strömungen sowohl der Luft als auch des Sandes im Wesentlichen einem Druckgradienten folgen. Dadurch können das Gesamtsystem mit ausreichender Genauigkeit eindimensional betrachtet [4] und alle relevanten maschinen- sowie werkzeugseitigen Bedingungen und Effekte in die Berechnung mit einbezogen werden. Gleichzeitig reduziert sich die Komplexität der Berechnung drastisch. Der gesamte Prozess wird in Millisekunden berechnet.

Das Modell berücksichtigt eine kompressible Luftströmung. Vom Druckkessel bis zum oberen, leeren Bereich des Schießkopfes wird die Luftströmung einphasig berechnet. Wenn die Luft den Formstoff erreicht, muss die Strömung zweiphasig berücksichtigt werden. Vereinfacht dargestellt werden in dem Programm die folgenden Grundgleichungen verwendet, die an anderer Stelle detailliert beschrieben werden, siehe z. B. [5-6]:



**Bild 4:** Schematische Darstellung des gekoppelten Systems Maschine - Werkzeug mit Positionen für die Druckmessung (a) und berechnete Druckverläufe für einen Kernschießzyklus (b).

- > Zustandsgleichung für kompressible Luft,
- > Kontinuitätsgleichung für kompressible Luft und inkompressiblen Formstoff,
- > Impulsgleichungen für die reibungsbehafteten Wechselwirkungen zwischen Luft und Formstoff.

Durch Kopplung dieses neuen Berechnungsmodells mit der umfassenden 3-D-Prozess-Simulation in Magma C+M können die Randbedingungen an den Schießdüsen mit dem Prozessfortschritt laufend an die sich verändernden Bedingungen in der Maschine und im Werkzeug angepasst werden.

Bei allen Strömungsvorgängen müssen zusätzlich Reibungs- und Druckverluste entlang der Strömungswege berücksichtigt werden. Zur Berechnung des gesamten Prozesses wird ein System von

Gleichungen iterativ gelöst, das lokal alle relevanten Effekte einbezieht. Damit ist es möglich, die Eigenschaften von Schießdüsen mit ihren Besonderheiten systematisch in eine Datenbank zu integrieren, sodass das charakteristische Strömungsverhalten anhand der Geometrie physikalisch richtig abgebildet wird (Bild 5). Je nach Fragestellung lassen sich sowohl Werkzeugauslegung als auch Prozessbedingungen in der Maschine für die geforderte Kernqualität optimiert und robust gestalten.

### Werkzeugverschleiß

Kernschießwerkzeuge unterliegen prozessbedingt lokal hoher Verschleißbeanspruchung. Da die Schädigung von vielen Einflussgrößen abhängig ist, benötigt der Werkzeugbauer bereits während der Pla-

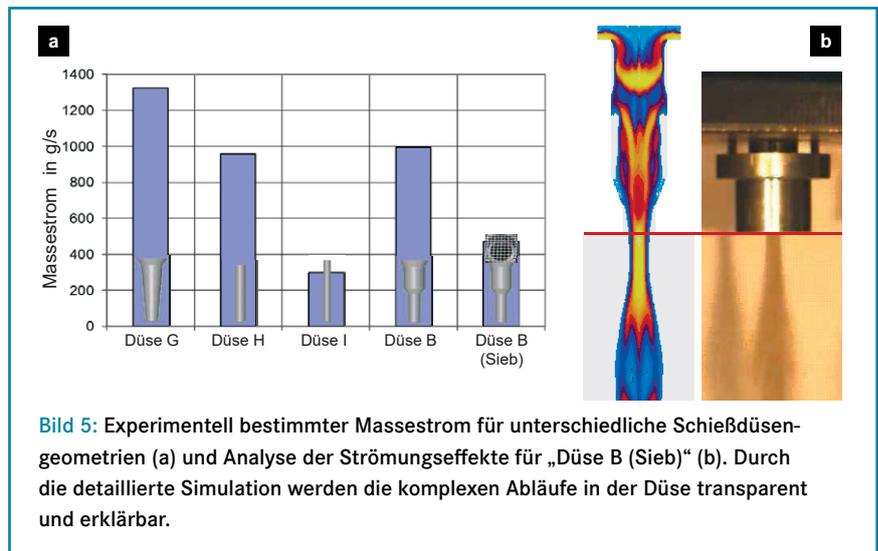
nungsphase sichere Indikatoren für die Konzeption des Werkzeugs. Das abrasive Verhalten der Sandkörner führt dabei zu einem Materialabtrag an der Oberfläche der verwendeten Werkzeugmaterialien. Die mit Anzahl der Produktionszyklen zunehmende Maßabweichung muss beobachtet und bewertet werden. Maßabweichungen beim Kern können sowohl bei der Kernmontage als auch beim Gießprozess zu Problemen führen und die geforderte Gussteilqualität wird nicht mehr erreicht.

Die Modellbildung zur Vorhersage des Verschleißverhaltens ist anspruchsvoll. Zurzeit ist kein Messverfahren bekannt, mit dem die lokale Werkzeugbelastung für den einzelnen Schuss gemessen und mit dem lokalen Materialabtrag korreliert werden kann. Neue Simulationsmodelle berücksichtigen die beteiligten Werkstoffe sowie ihre Eigenschaften. Für den Kernsand sind dies primär die Härte der Körner, das Kornspektrum und die Kornform. Werkzeugseitig ist der Verschleiß abhängig von der Härte und der Duktilität des verwendeten Werkstoffs [7]. In der Praxis werden typische Werkzeugstähle, Hartmetalleinlagen an lokalen Positionen, Aluminiumlegierungen oder auch eine Vielzahl von Kunststoffen verwendet. Für die Simulation des Werkzeugverschleißes beim Kernschießen werden insbesondere die lokalen Prozessbedingungen für das Auftreffen des Sandes auf die Werkzeugoberfläche berechnet. Dabei trifft ein Sandstrahl mit einem lokalen Geschwindigkeitsgradienten sowie variablem Sandanteil für eine bestimmte Zeit und in einem bestimmten Auftreffwinkel auf die Werkzeugoberfläche. Diese Prozessgrößen sind Ergebnisse der Kernschießsimulation und dienen als Eingangsgrößen für die Modelle zur quantitativen Berechnung des lokalen Verschleißes. Die Simulation berechnet den lokalen Materialabtrag bzw. direkt die maßliche Änderung pro Schuss (Bild 6).

### Kernaushärtung in kalten und temperierten Werkzeugen

Bei der Gasaushärtung wird ein temperiertes Gasgemisch in den geschossenen Kern eingeleitet. Die gängigen Härtungsmechanismen bei Gashärtung, wie z. B. beim Cold-Box-Verfahren, können durch Anwendung geeigneter Modelle simuliert werden [1-2].

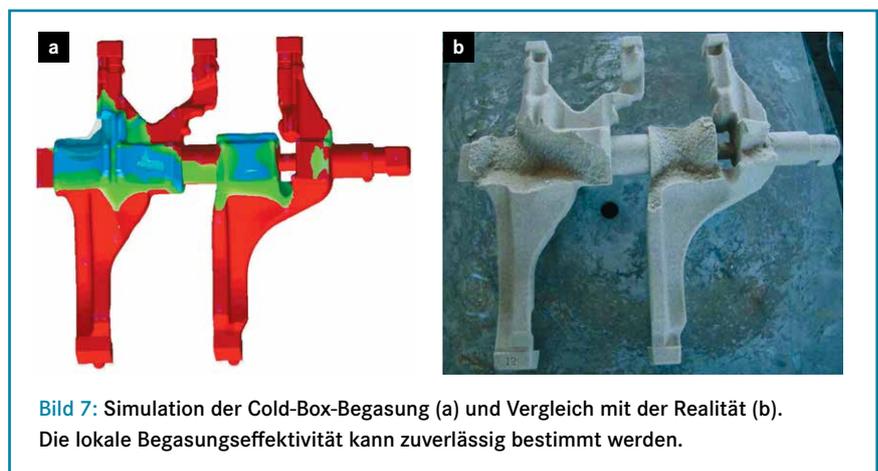
Der Transport von Gas durch den offenen Porenraum von Sandkernen charakterisiert den Strömungsvorgang bei der Kernaushärtung. Für eine Cold-Box-Aushärtung bedeutet dies, ein katalytisch



**Bild 5:** Experimentell bestimmter Massestrom für unterschiedliche Schießdüsengeometrien (a) und Analyse der Strömungseffekte für „Düse B (Sieb)“ (b). Durch die detaillierte Simulation werden die komplexen Abläufe in der Düse transparent und erklärbar.



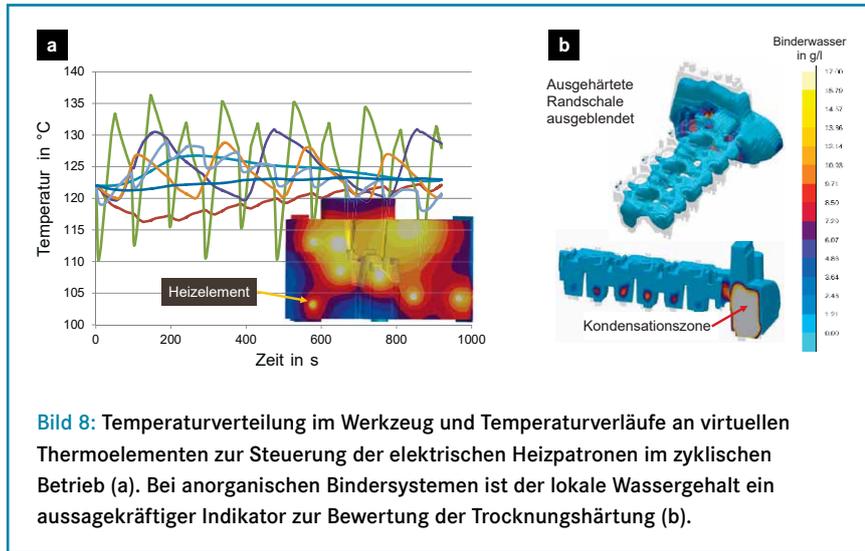
**Bild 6:** Berechneter Werkzeugverschleiß für zwei verschiedene Grundsande. Bei kugelförmigen Sandkörnern (a) ist der Materialabtrag deutlich geringer als bei kantigen Sandkörnern (b).



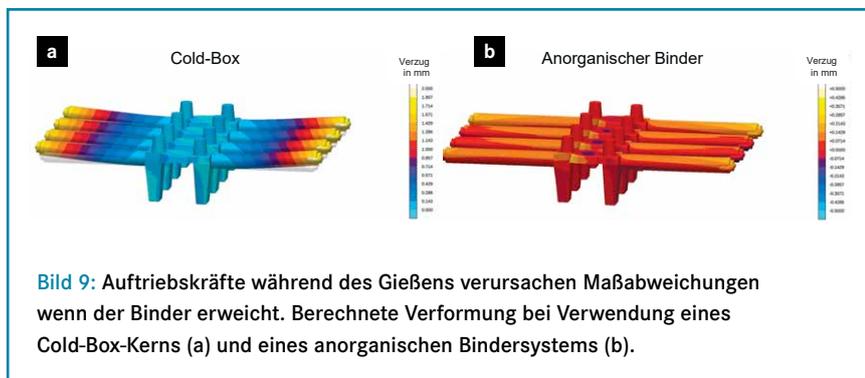
**Bild 7:** Simulation der Cold-Box-Begasung (a) und Vergleich mit der Realität (b). Die lokale Begasungseffektivität kann zuverlässig bestimmt werden.

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 Bindertfilm, Amintyp sowie Sand- und Gas-temperatur. Die Gasströmung durch den Kernsand ist primär von der Kerngeometrie, der Düsenkonfiguration, dem Gasdruck sowie der Gasdurchlässigkeit der Formstoffmischung abhängig. Ziel der Si-

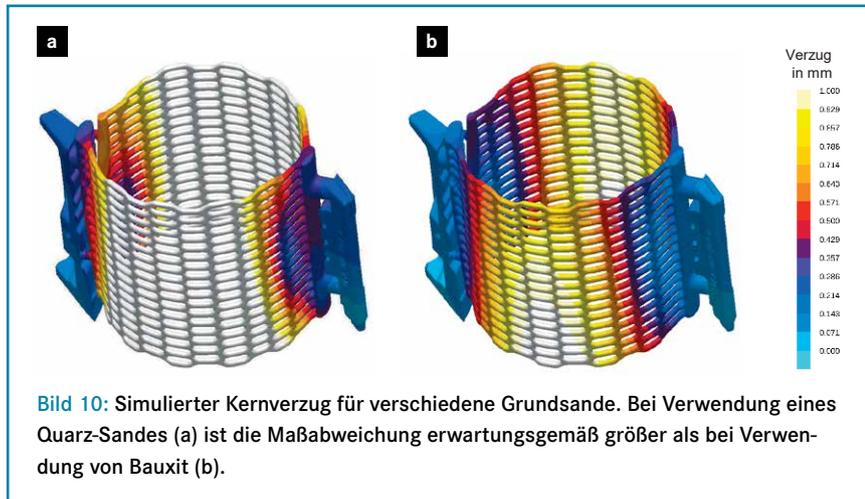
mulation ist es, zunächst den zeitlichen Verlauf der Amingasströmung abzubilden. Damit kann bereits bei der Auslegung von Kernwerkzeugen überprüft werden, ob und in welcher Intensität alle Bereiche des Kerns ausreichend durchströmt werden (Bild 7). Die Simulation berücksichtigt sowohl das aktive Begasen als auch den nachfolgenden Spülvorgang mit trockener Luft. Dadurch wird die Begasungseffektivität bewertbar und insbesondere auch in Bezug auf die tatsächlich erforder-



**Bild 8:** Temperaturverteilung im Werkzeug und Temperaturverläufe an virtuellen Thermoelementen zur Steuerung der elektrischen Heizpatronen im zyklischen Betrieb (a). Bei anorganischen Bindersystemen ist der lokale Wassergehalt ein aussagekräftiger Indikator zur Bewertung der Trocknungshärtung (b).



**Bild 9:** Auftriebskräfte während des Gießens verursachen Maßabweichungen wenn der Binder erweicht. Berechnete Verformung bei Verwendung eines Cold-Box-Kerns (a) und eines anorganischen Bindersystems (b).



**Bild 10:** Simulierter Kernverzug für verschiedene Grundsande. Bei Verwendung eines Quarz-Sandes (a) ist die Maßabweichung erwartungsgemäß größer als bei Verwendung von Bauxit (b).

derlichen Aminmengen sowie die Begasungszeiten optimierbar.

Für die Trocknungshärtung anorganischer Binder mit heißer Luft in temperierten Werkzeugen können die Modelle analog angewendet werden [1-2]. Die Kernfestigkeit entsteht über eine überwiegend reversible Trocknungshärtung (Bild 8). Modelliert werden der Wärmefluss im Kernsand und die dadurch verursachte Verdunstung von Binderwasser. Damit gekoppelt sind die gleichzeitige Aufnahme von Wasserdampf durch Trocknungsluft sowie der Transport des Wasserdampfes

aus dem Porenraum durch den Heißluftstrom. Die Modelle berücksichtigen ebenfalls Kondensationseffekte, bei denen an der heißen Werkzeugwand verdampftes Binderwasser in kälteren Regionen im Kern wieder kondensiert. Die Bildung der ausgehärteten Randschicht durch den Trocknungsprozess und die Effektivität des Prozessablaufs zur Entfernung des Binderwassers aus dem Kern können bewertet werden. Eine eigenständige Zielsetzung ist die geeignete thermische Auslegung von Werkzeugen mit elektrischen Heizpatronen oder Öltemperierung, wobei

typischerweise eine gleichmäßige Temperaturverteilung im zyklischen Betrieb angestrebt wird.

### Eigenschaften und Effekte beim Gießen

Die Modellierung des Einflusses von Kernen und deren Eigenschaften auf die Gussteilqualität hat lange zu wenig Beachtung gefunden. Heute können sowohl der Kernverzug beim Gießen als auch das Zersetzungsverhalten von Kernbindern und anderen flüchtigen Bestandteilen berechnet werden. Dies ermöglicht die Vorhersage von kernbedingten Gussfehlern durch Kernverzug oder Kerngase. Die hierfür notwendigen Daten für die zeit- und temperaturabhängigen thermomechanischen Werkstoffeigenschaften des Kerns sind auch die Voraussetzung für die Vorhersage des Entkernverhaltens nach dem Gießen.

### Kernverzug

Sandkerne verformen sich abhängig von ihrer thermischen Ausdehnung sowie von der Lage der Kernmarken. Bei langen, dünnwandigen Kernen spielen beim Gießen zusätzlich Auftriebskräfte zwischen Kern und Schmelze eine wichtige Rolle. Bei organisch gebundenen Kernen können, aufgrund von Kriecheffekten im Kunstharzbinder, selbst geringe Auftriebskräfte zu zeitabhängigen Verformungen führen. Diese sind bei der Verwendung anorganischer Binder nicht in gleicher Weise zu beobachten (Bild 9).

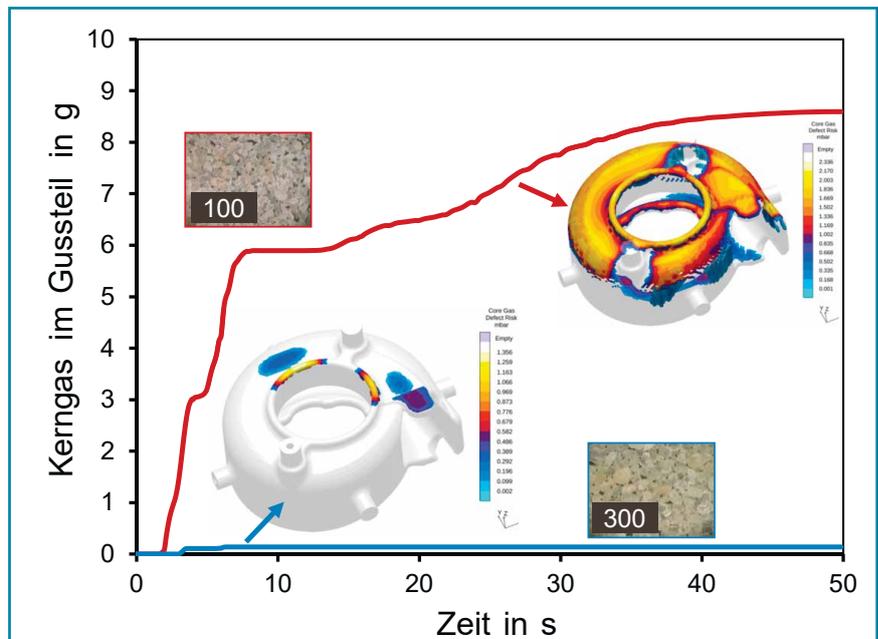
Zur Modellierung der Eigenschaften und des Verhaltens dieser granularen, diskontinuierlich unregelmäßigen Werkstoffe, bei denen die Binderbrücken zwischen den Sandkörnern entscheidend für Zug- sowie Biegefestigkeit sind, können die in der Werkstoffmodellierung bewährten Ansätze aus der Kontinuums-Mechanik nicht angewendet werden. Aus diesem Grund wurde eine umfassende Methodik aus unterschiedlichen Prüfverfahren entwickelt, um das Verhalten des gebundenen Formstoffs beim Gießen und unter Last umfassend zu charakterisieren. Auf dieser Basis wurde ein Materialmodell entwickelt, das den Werkstoff als poröses Medium behandelt [8]. Hierzu wurden Modelle aus der Bodenmechanik adaptiert, in denen die Festigkeit des Materials sowohl druck- als auch temperaturabhängig abgebildet wird [9]. Die Abbildung der Verformung in Abhängigkeit von der Zeit (Bindererweichung und -zersetzung) wird durch zusätzliche Kriechmodelle berücksichtigt. Darüber hinaus werden Kräfte, die z. B. durch Auftrieb auf den Kern ein-

wirken, während des Gießvorgangs in Magmasoft berechnet (s. Bild 9). Mit der Abbildung des Heißverzugs beim Gießprozess lassen sich praktische Fragestellungen in Bezug auf den zu erwartenden Kernverzug bewerten und Lösungen zielorientiert erarbeiten. Dies kann durch Anpassung der Kernlagerung, des Formstoffes bzw. des Bindersystems oder durch Vorkompensation bei der Auslegung des Werkzeugs geschehen. Bei komplexen Geometrien, in denen große dünnwandige Kerne eingesetzt werden müssen, kann deren thermische Ausdehnung zu erheblichen Problemen führen. In einem Beispiel wurde untersucht, ob ein Ersatz des Quarzsandes durch einen Bauxitsand mit geringerer thermischer Ausdehnung, entsprechende Gussfehler sicher vermeiden würde (Bild 10).

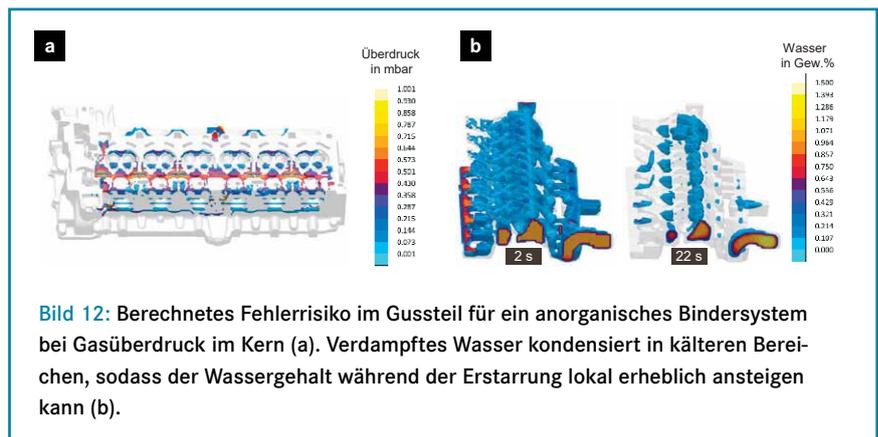
Die entwickelten Modelle erlauben die Vorhersage des Kernverzugs für alle gängigen Bindersysteme und Sandtypen. Die quantitative Bewertung der Ergebnisse ist insbesondere von der Qualität und der Verfügbarkeit von Messdaten nach der beschriebenen Prüfmethodik abhängig. Messdaten werden kontinuierlich für individuell unterschiedliche Sand-Binder-Systeme ermittelt. Im Fokus aktueller Untersuchungen stehen die industriell führenden Systeme aus den Bereichen Cold-Box und Anorganik. Daneben werden auch Daten für Hot-Box oder Cronic-Systeme ermittelt. Bei den geschossenen Kernen kann in guter Näherung von isotropen Eigenschaften in allen Raumrichtungen ausgegangen werden, wobei anorganisch gebundene Kerne je nach Trocknungszustand bei Entnahme aus dem Werkzeug und möglicher Nachbehandlung merkliche Eigenschaftsgradienten aufweisen können. Die zunehmende Verfügbarkeit und Anwendung additiv gefertigter Kerne stellt die Simulation vor neue Herausforderungen. Die Eigenschaften gedruckter Kerne unterscheiden sich signifikant von denen konventionell durch Schießen hergestellter Kerne. Insbesondere die Anisotropie der Eigenschaften in Abhängigkeit von der lokalen Druckrichtung, also der räumlichen Positionierung in der „Job-Box“, muss in den Modellen berücksichtigt werden.

### Binderzersetzung und kerngasbedingte Gussfehler

Bei der Erhitzung durch das Gießmetall entstehen in Kernen und Formen Gase, die sich durch die Zersetzung der organischen Binder und gegebenenfalls weiterer flüchtiger Bestandteile bilden und abtransportiert werden müssen. Beim Einsatz von anorganischen Bindersystemen



**Bild 11:** Berechnete Gasmenge im Gussteil bei Zersetzung eines organischen Bindersystems für einen feinen und einen gröberen Sand. Bei gröberen Sanden mit höherer Gasdurchlässigkeit („300“) sind Fehlerrisiken deutlich geringer.



**Bild 12:** Berechnetes Fehlerrisiko im Gussteil für ein anorganisches Bindersystem bei Gasüberdruck im Kern (a). Verdampftes Wasser kondensiert in kälteren Bereichen, sodass der Wassergehalt während der Erstarrung lokal erheblich ansteigen kann (b).

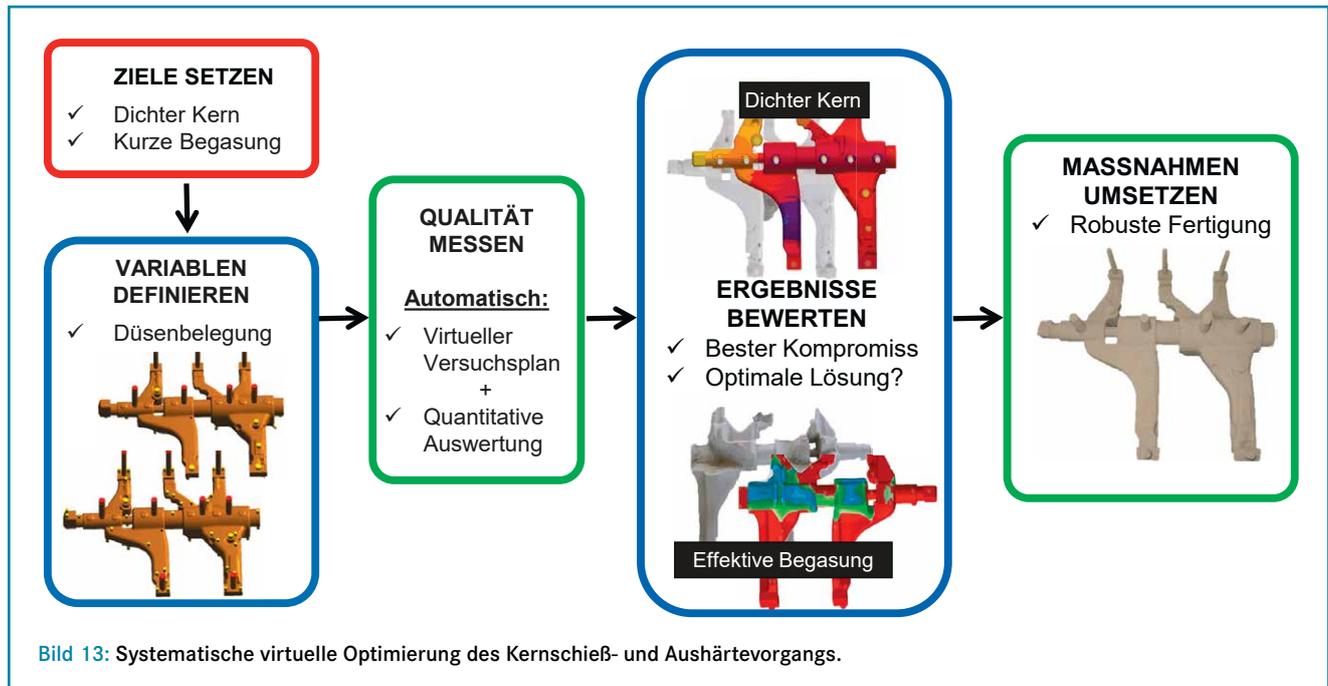
entstehen die Gase primär durch das Verdampfen von Restfeuchte. Diese Gase sind häufig die Ursache für Gussfehler, die aus der Kombination unterschiedlicher Einflussgrößen resultieren:

- > Summe flüchtiger Bestandteile und ihrer Eigenschaften,
- > Kerngeometrie und Kernlagerung in der Form,
- > Gasbildung durch die thermische Belastung beim Gießprozess, der resultierenden Gasströmung durch den Kern sowie insbesondere der Gasentlüftung zum Abbau des Gasstoßes.

Simulationsmodelle, die mit der Gieß- und Erstarrungssimulation gekoppelt sind, bilden die relevanten Vorgänge virtuell ab. Dabei unterscheiden sich die Modelle zur Zersetzung organischer Bestandteile grundlegend von denen für anorganische Bindersysteme.

Organische Binder werden in Abhängigkeit von ihrer lokalen thermischen Geschichte pyrolysiert und/oder verdampft. Die Zersetzungskinetik der verschiedenen Stoffe ist primär von der Temperatur abhängig. Die lokale Verfügbarkeit von Sauerstoff verändert den Abbrand flüchtiger bzw. brennbarer Bestandteile zusätzlich erheblich. Dabei wird die Zersetzung entweder über eine Arrhenius-Funktion oder abhängig von der Zusammensetzung der Vielstoffgemische und der lokalen thermischen Geschichte, auch über Polynomfunktionen beschrieben [10]. Da die zeitliche Gasentwicklung für praxisübliche Bindersysteme sehr unterschiedlich ist, kann die Kinetik der Binderzersetzung kaum verallgemeinert werden.

Die aktuell implementierten Modelle haben sich trotz der bislang unzureichend vorhandenen Digitalisierung der Werkstoffeigenschaften für eine Bewertung



möglicher Gussfehler bewährt. In der Praxis haben die verwendeten Rohstoffe und die Prozessführung bei der Kernherstellung, die Kernnachbehandlung (z. B. durch Trocknung) sowie die Lagerungsbedingungen und die Lagerzeit bis zum Abguss maßgeblichen Einfluss auf die Menge und die Verteilung flüchtiger Bestandteile. Ziele für die Prozess-Simulation sind daher zunächst die Bewertung der Kerngeometrie und der Kernlagerung in Bezug auf die Entstehung von Kerngasen, die daraus resultierenden lokalen Drücke sowie der Transport der Gase. Die Simulation ermöglicht eine Bewertung von Risiken, durch die Kerngase zu Gussfehlern führen. Gleichzeitig kann bewertet werden, ob die Lagerung der Kerne in der Form eine ausreichende Gasabfuhr ermöglicht (Bild 11).

Die Gaskomponente ist bei Verwendung anorganischer Bindersysteme überwiegend Wasserdampf. Die Berechnung der Verdampfung, der Strömung und der Kondensation des Wassers erfordert im Vergleich zu sich zersetzenden Bindersystemen andere physikalische Modelle. Die Effekte sind ähnlich der Trocknungshärtung von anorganischen Formstoffen bei der Kernherstellung. Für die Simulation des Gasstoßes beim Gießen können die Kerneigenschaften je nach Zustand der verwendeten Kerne sehr unterschiedlich sein. Im Idealfall ist der Kern vollständig getrocknet. Beim Gießen sind wenig Restfeuchte und das sogenannte Kristallwasser vorhanden, das allerdings erst bei erhöhten Temperaturen freigesetzt wird. Der Normalfall in der Praxis ist eher, dass anorganisch gebundene Kerne zumindest

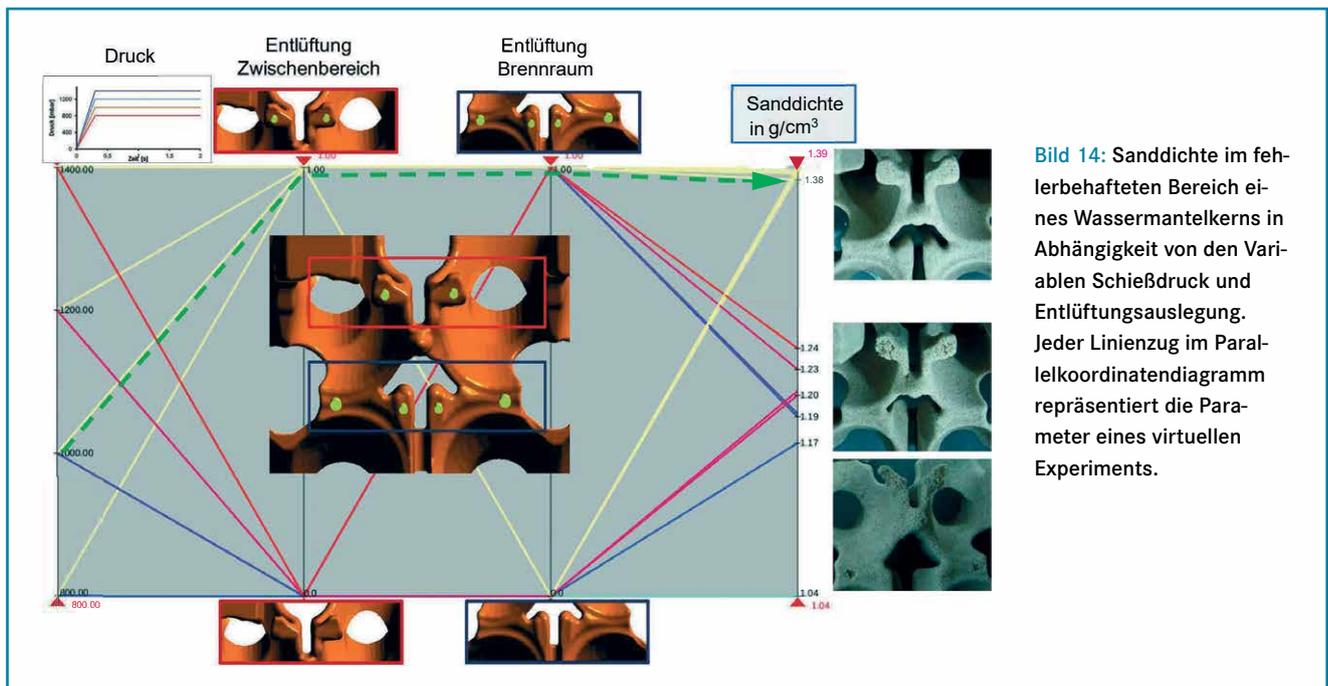
im Inneren erhebliche Anteile an ungebundenem Wasser aufweisen. Daher muss die Simulation mit grundlegend unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften innerhalb des Kerns durchgeführt werden. Vereinfacht können sowohl eine gleichmäßige als auch eine gradierte Verteilung der Wasserkonzentration im Kern angenommen werden. Darüber hinaus kann auch eine Wasserverteilung als Startsituation gesetzt werden, die bei der Simulation der Trocknung ermittelt wurde. In diesem Fall liegt eine örtlich unterschiedliche Konzentration des Wassers vor, mit der der Gasstoß beim Gießen genau bewertet werden kann. Wie bei der Simulation des Zersetzungsverhaltens und des Gasstoßes bei organisch gebundenen Kernen ist das Ziel bei anorganischen Kernen die Bewertung von Gussfehlerrisiken durch Wasserdampf, der lokal aufgrund im Vergleich zum metallostatistischen Druck ungünstiger Gasdrücke zu Gussfehlern führen kann (Bild 12). Durch die systematische Bewertung von wichtigen Einflussgrößen können daher bereits in der Konstruktionsphase mögliche Maßnahmen (Entlüftungsbedingungen über Kernmarken, Zwangsentlüftung durch Unterdruck) für einen robusten Prozess optimal bewertet werden.

**Robuste Prozesse durch Autonomous Engineering**

Die Kernfertigung besteht aus einer komplexen Prozesskette mit einer Vielzahl von Parametern, die sich gegenseitig beeinflussen. Entscheidend für eine gute und in der Serie gleichbleibende Kernqualität

ist die Auslegung eines robusten Werkzeugs. Was hier falsch gemacht wird, kann in der Praxis nicht immer durch Optimierung der Prozessparameter oder des Sandsystems korrigiert werden. Der tägliche Prozessbetrieb weist typischerweise Schwankungen auf. Die Qualität bzw. die Eigenschaften der Sandmischung sind nicht exakt reproduzierbar und Prozessgrößen wie der Schießdruck an der Maschine oder der Druckaufbau im Schießkopf sind nicht unbedingt exakt regelbar. Ein robust ausgelegtes Werkzeug kann diese Schwankungen bestmöglich kompensieren. Die Möglichkeiten zur virtuellen Versuchsplanung und autonomem Optimierung erlauben eine neuartige methodische Vorgehensweise zur Werkzeug- und Prozessauslegung [11-12]. Auf Basis klar definierter Optimierungsziele werden in der Software Freiheitsgrade festgelegt, die die Möglichkeit bieten, bislang manuell durchgeführte Schritte systematisch und automatisiert zu berechnen und in Summe zu bewerten (Bild 13).

Die Nutzung parametrisierter Geometrielemente erlaubt die automatische Variation der Kerngeometrie, der Art und der Positionierung verschiedenartiger Düsen oder der Heizeinrichtungen bei beheizten Werkzeugen. Gleichzeitig können typische Prozessparameter wie z. B. Schießdruck, Begasungsparameter, Steuerung der Temperierung oder auch relevante Sandeigenschaften variiert werden. Alle in der Simulation verfügbaren Qualitätskriterien werden automatisch quantitativ ausgewertet und mit den variierten Parametern verknüpft. Daraus wird z. B. automatisch eine Rangfolge zur Bewer-



**Bild 14:** Sanddichte im fehlerbehafteten Bereich eines Wassermantelkerns in Abhängigkeit von den Variablen Schießdruck und Entlüftungsauslegung. Jeder Linienzug im Parallelkoordinatendiagramm repräsentiert die Parameter eines virtuellen Experiments.

Der Kernqualität hinsichtlich der verwendeten variablen Parameter abgeleitet. Statistisch basierte Auswertemethoden stellen eine schnelle quantitative Bewertung von Wechselwirkungen unterschiedlicher Parameter auf die Kernqualität bzw. auf wirtschaftliche Faktoren sicher und erlauben die Ableitung von praxisorientierten Maßnahmen. Die Kernfertigung wird somit virtuell optimiert (Bild 14). Im Regelfall ist es nicht sinnvoll, eine unüberschaubare Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten vollständig durchzuspielen. Der Fachmann ist gefragt, eine geeignete Ausgangssituation zu definieren, die mit angemessenem Aufwand zum Ziel führt. Die neuen virtuellen Möglichkeiten fördern auch neue effiziente Vorgehensweisen zum systematischen und zuverlässigen Erreichen der Ziele. Anstatt einer iterativen, schrittweisen Vorgehensweise wird der gesamte Arbeitsprozess zum Erreichen der Ziele vorab mit seinen variablen Größen strukturiert beschrieben und systematisch abgearbeitet.

## Zusammenfassung

Neueste Entwicklungen für die Simulation von Kernen berücksichtigen heute neben allen wesentlichen Teilschritten für die Herstellung auch das Verhalten von Kernen während des Gießens. Durch die Integration in die gesamte Prozesskette können damit erstmals die aus Schießen und Aushärten berechneten Eigenschaften des Kerns für die Vorhersage unterschiedlicher kernbedingter Gussfehler genutzt werden. Damit wird es in Zukunft möglich, nicht nur die Optimierung ein-

zelner Teilprozesse virtuell durchzuführen, sondern zielgerichtet unterschiedliche Einflüsse aus der gesamten komplexen Prozesskette auf die Eigenschaften und das Verhalten von Kernen virtuell bereits vor der Produktion vorherzusagen. Zukünftige Herausforderungen liegen insbesondere in der Digitalisierung der verwendeten Formstoffsysteme. Hierbei wird es notwendig, das Werkstoffverhalten des komplexen Mehrstoffsystems „Kern“ zu bestimmen, um damit das Wissen über den Einfluss der wesentlichen Komponenten (Sand, Binder, Additive) sowie der Formstoffaufbereitung (Mischen, Lagern, Regenerieren) über qualitative Effekte hinaus für die Simulation quantitativ nutzbar zu machen.

Dr.-Ing. Sanjeev Kumar, Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Dr. Jesper Thorborg, Dr.-Ing. Ingo Wagner, MAGMA Gießertechnologie GmbH, Aachen.

## Literatur:

- [1] Schneider, M. et al.: *Experimental investigation, physical modeling and simulation of core production processes*. AFS Transactions 2008, Paper 08-058(04). S. 1-14.
- [2] Giesserei 96 (2009), [Nr. 12], S. 16-29.
- [3] Gronen, K.; Wagner I.: EP3473351 A1.
- [4] Giesserei 106 (2019), [Nr. 6], S. 52-63.
- [5] Patankar, S.V.: *Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York, 1980.
- [6] Gidaspow, D.: *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*, Academic Press, New York, 1984.

[7] Aquaro, D.: *Erosion rate of stainless steel due to the impact of solid particles*, AITC-AIT 2006, International Conference on Tribology, 20-22 September 2006, Parma, Italy.

[8] P. R. Brewin et al.,: 2008, *Modelling of Powder Die Compaction*.

[9] Desai, C.S., and H.J. Siriwardane. 1984. *Constitutive Laws for Engineering Materials. With Emphasis on Geologic Material*, Prentice-Hall.

[10] Samuels, G. und Beckermann, C.: *Measurement of Gas Evolution from PUNB Bonded Sand as a Function of Temperature*, 65th AFSA, Chicago, 2011.

[11] Giesserei 103 (2016), [Nr. 12], S. 36-45.

[12] Giesserei-Special 01/2019, S. 70-77.