

Virtuelle Optimierung in der Kernfertigung – Innovative Methodik zur systematischen Werkzeugauslegung und Prozessoptimierung

Die Herstellung von Sandkernen umfasst eine komplexe Prozesskette mit vielen Stellgrößen, bei der der Einfluss auf die Kernqualität und Wirtschaftlichkeit oft nicht oder nur qualitativ beurteilt werden kann. Die Prozess-Simulation ist heute als zuverlässiges Planungs- und Analysewerkzeug akzeptiert. Sie bietet ein erweitertes Prozessverständnis und die Möglichkeit zur quantitativen Bewertung der relevanten Einflussgrößen. Mit dem Schritt von der einzelnen Simulation zur automatisierten Optimierung lassen sich bereits im Planungsstadium eines neuen Kernwerkzeugs Korrelationen zwischen Prozessvariablen und quantifizierbaren Qualitätskriterien ermitteln. Dabei können die Prozessschritte Kernschießen und Aushärtung zur systematischen Werkzeugentwicklung gleichzeitig optimiert werden. Die virtuelle Optimierung liefert entweder den besten Kompromiss für den Gesamtprozess oder die jeweils beste Lösung für beide Teilprozesse. Diese integrierte Vorgehensweise bietet große Potenziale für eine robuste Kernfertigung, bei der Zykluszeiten erheblich verkürzt und gleichzeitig der Ressourcenverbrauch minimiert werden.

Ingo Wagner und Jörg C. Sturm, Aachen

1 Einleitung

Die Kernfertigung ist, wie wenige Prozesse in der Gießerei, auch heute noch erheblichen Fertigungsschwankungen ausgesetzt. Die große Anzahl von Einflussgrößen auf die Qualität reicht von den verwendeten Rohstoffen und ihrer Verarbeitung über die eigentliche Herstellung der Kerne mit den Prozessschritten Kernschießen und Aushärtung bis zu den Auswirkungen im Gießprozess. Durch den hohen Komplexitätsgrad entlang dieser langen Prozesskette können die Einflussgrößen und ihre Wechselwirkung auf die Kernqualität oft gar nicht oder nur als qualitative Effekte beurteilt werden. Die einzelnen Prozessschritte und die Vorgänge in der Kernschießmaschine sowie im Werkzeug sind im Wesentlichen messtechnisch nicht zugänglich. Für eine prozesssichere Auslegung der Werkzeuge müssen darüber hinaus auch Fertigungsschwankungen aufgrund von Betriebsbedingungen oder der verwendeten Anlagen berücksichtigt werden, die sowohl die Kernqualität als auch die Produktivität des Prozesses in hohem Maß bestimmen. Waren die Gießerei oder der Werkzeugbauer früher alleine auf Fachwissen und langjährige Erfahrung angewiesen, kann heute die Prozess-Simulation als zuverlässiges Planungs- bzw. Optimierungs- und Analysewerkzeug in die Arbeitsläufe integriert werden. Das Simulationsprogramm MAGMA C+M (Core and Mold) unterstützt bereits

in der Planungsphase die Auslegung von Werkzeug und Prozess für eine robuste und wirtschaftliche Kernfertigung. Die Prozess-Simulation ermöglicht eine schnelle und effiziente Erprobung und Bewertung der Werkzeugauslegung. Flexiblere und bislang nicht praktisch qualifizierte Konfigurationen, die über das Erfahrungswissen hinausgehen, können erprobt und validiert werden, bevor das Werkzeug gefertigt wird. Mit diesen Möglichkeiten wird der Fokus der Prozessauslegung über das Ziel, Kerne gut auszuschießen, hinaus erweitert. Zunehmend rückt auch die Optimierung der Aushärtung in den Vordergrund. Kurze Zykluszeiten und die Minimierung des Ressourcenverbrauchs ermöglichen eine nachhaltige Steigerung der Wirtschaftlichkeit und fördern umweltgerechteres Handeln.

2 Robuste Prozesse mit robusten Werkzeugen

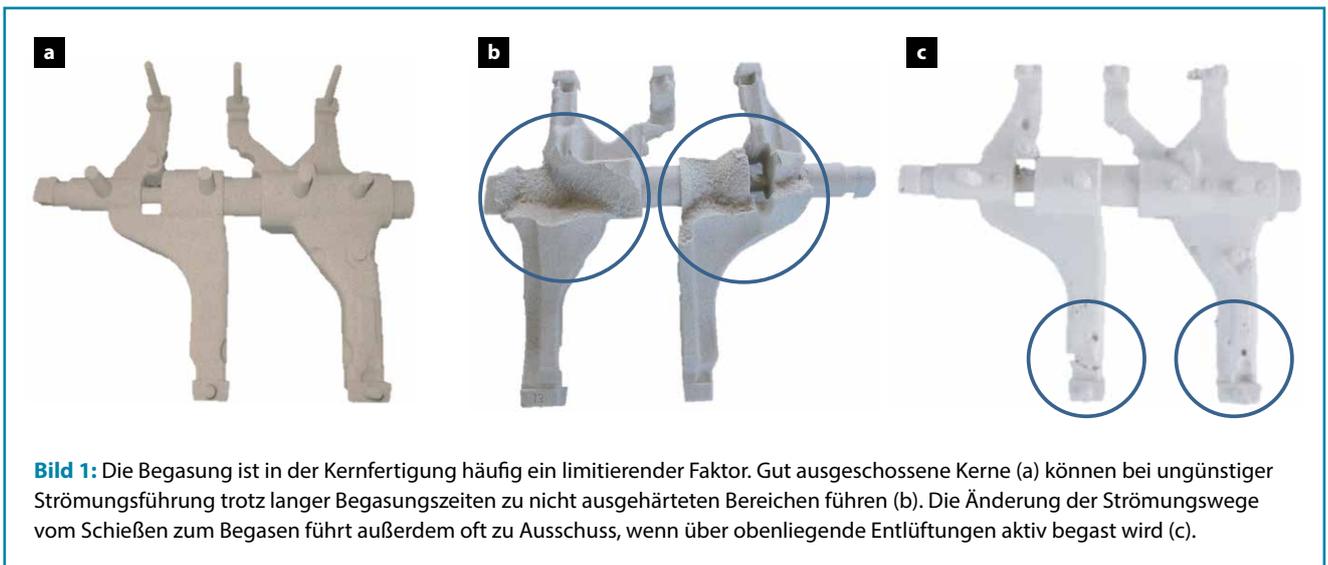
Ein robuster Prozess, der die typischen Fertigungsschwankungen bestmöglich kompensiert, beginnt mit einer prozesssicheren Werkzeugauslegung. Dabei sind für das Kernschießen und die Kernaushärtung die Anforderungen an die Funktionalität des Werkzeugs unterschiedlich. Hauptziel einer guten Werkzeugaus-

legung ist zunächst ein optimal ausgeschossener Kern. Schießdüsen und Entlüftungen werden in den Werkzeugen so positioniert, dass die Kerne auch mit variablen Prozessgrößen gut geschossen und verdichtet werden können. Dabei sind sich verändernde Fertigungsbedingungen mit zu berücksichtigen. Bereits mit dem ersten Schuss beginnt das Zusetzen von Entlüftungsdüsen. Sandpartikel und Binder verkleben die Entlüftungsflächen. Das Werkzeug muss bezüglich der Positionierung der Düsen und der insgesamt verfügbaren Entlüftungsfläche daher so ausgelegt sein, dass die Kerne über einen möglichst langen Zeitraum auch bei zunehmender Verschmutzung gut ausgeschossen werden können.

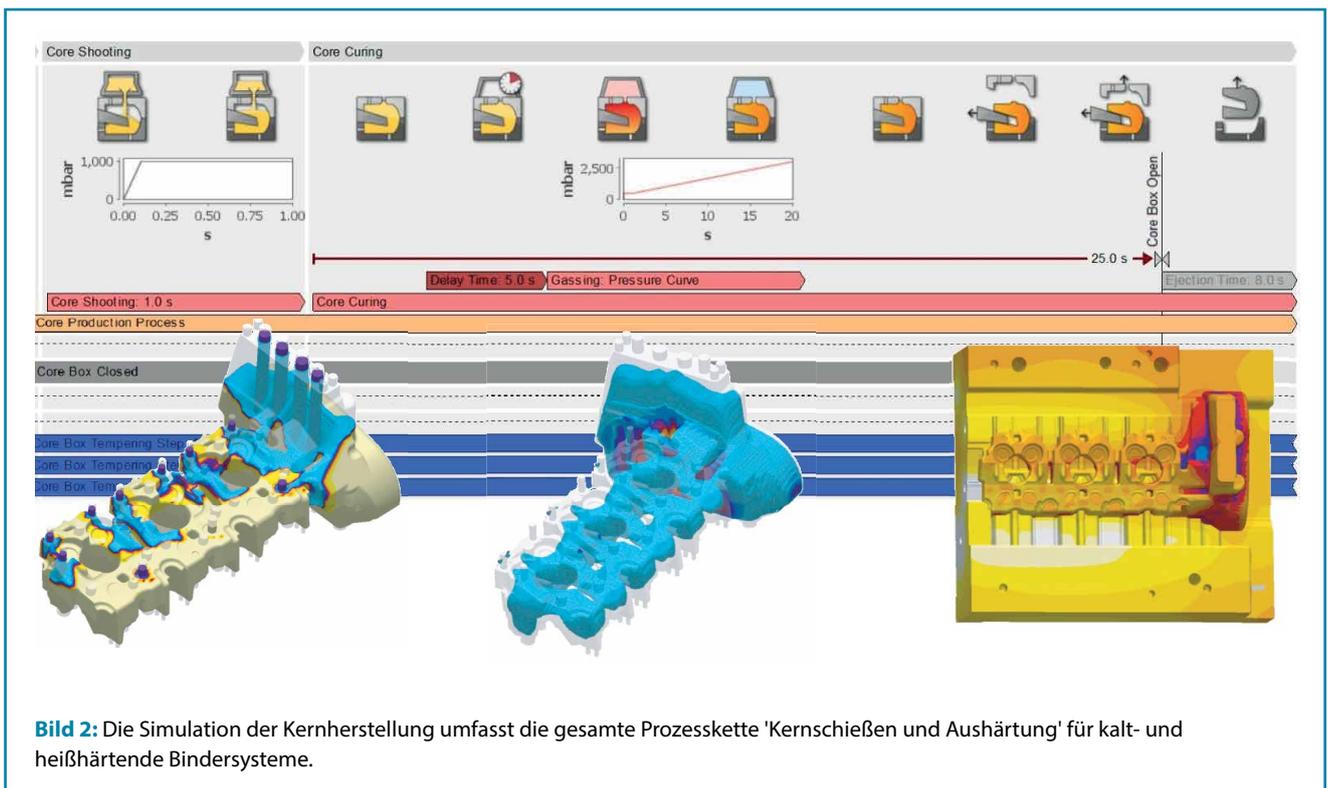
Bei der Begasung des Kerns wird häufig akzeptiert, dass einzelne Entlüftungen ungünstig liegen und dadurch vorhandene

Strömungsschatten lokal eine schnelle Aushärtung verhindern. Im Falle des Cold-Box-Verfahrens führt dies zu unnötig langen Begasungszeiten. Als Konsequenz kann sich der Aminverbrauch um ein Mehrfaches über das erforderliche Maß hinaus erhöhen. Bei Verwendung anorganischer Bindersysteme führen ungünstige Entlüftungsbedingungen zu langen Trocknungszeiten, da durch nicht optimale Strömungsverhältnisse bzw. eine unzureichende Werkzeugtemperierung, der Kern nicht effektiv genug getrocknet werden kann.

Typische Ursachen für Fehler, die nach dem Kernschießen entstehen, sind nicht ausgehärtete Bereiche durch ineffektive Strömung und durch prozessbedingte Änderung der Strömungsausrichtung vom Schießen zum Begasen (**Bild 1**). Begasungsbedingte



GRAFIKEN: MAGMA



Fehler, die erheblich zu Ausschuss beitragen können, müssen daher bereits bei der Werkzeugauslegung berücksichtigt werden.

Die experimentelle Optimierung von Kernwerkzeugen ist ineffektiv und hat klare Grenzen. Ein neu gefertigtes Werkzeug wird typischerweise mehrfach geändert, bis die erforderliche Kernqualität in der Serienfertigung reproduzierbar erreicht wird und mit dem Werkzeug zudem lange störungsfrei bis zum nächsten Wartungsintervall produziert werden kann. Dadurch werden bei der Werkzeugaufbereitung oft von vorneherein viel mehr Entlüftungen vorgesehen als tatsächlich benötigt werden. In aufwendigen Einfahrzyklen werden einzelne Entlüftungen verschlossen und wieder geöffnet, bis eine zufriedenstellende Qualität erreicht wird. Als Ergebnis werden Prozessbedingungen festgelegt, die zu einer akzeptablen Kernherstellung führen. Diese Vorgehensweise bietet subjektiv die Möglichkeit zu schnellen Änderungen direkt am Werkzeug, führt aber weder zu Prozesssicherheit noch bietet sie Informationen über den optimalen Arbeitspunkt. Diese mit jedem neuen Werkzeug immer wieder erforderlichen, aufwendigen Einfahr- und Änderungsschritte können heute durch die konsequente Nutzung der Prozess-Simulation zu einem wesentlichen Teil vermieden werden.

Die Prozess-Simulation für die einzelnen Prozessschritte der Kernherstellung ist längst anerkannter Stand der Technik und in der betrieblichen Praxis etabliert [1-2]. Sie ermöglicht eine umfassende Prozessabbildung und die Bewertung wesentlicher Einflussgrößen (**Bild 2**). Die Prozess-Simulation gewährt Einblicke und vermittelt Verständnis insbesondere da, wo der reale Prozess weder beobachtet noch messtechnisch erfasst werden kann.

Die Software MAGMA C+M modelliert die Physik einer gekoppelten Strömung von Luft und Sand und deren Interaktion beim Kernschießen sowie die prozesstechnischen Besonderheiten der Aushärtung oder Trocknung für die gängigen Bindersysteme [1]. Darüber hinaus erlaubt MAGMA C+M - bei Verwendung temperierter Werkzeuge für heißhärtende Verfahren - die Berechnung des Temperaturhaushaltes. Die Software bietet im Gegensatz zum realen Prozess die Möglichkeit, einzelne Prozessschritte auch getrennt voneinander untersuchen und differenziert bewerten zu können.

Für den ersten Prozessschritt Kernschießen ist es naheliegend, die nachfolgende Aushärtung nicht zu berücksichtigen, wenn es ausschließlich darum geht, den Kern gut auszuschießen. Alternativ dazu kann die Aushärtung auch alleine berechnet werden. Hierbei wird ein gleichmäßig verdichteter Kern als Ausgangspunkt gesetzt. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die Dichteunterschiede bei gut ausgeschossenen Kernen gering sind und keinen wesentlichen Einfluss auf das Strömungsverhalten während der Begasung haben.

3 Innovative Ansätze zur virtuellen Optimierung

In Verbindung mit statistischen Methoden zur Versuchsplanung erlaubt die Prozess-Simulation die Bewertung von Werkzeugzuständen sowie ihre systematische Optimierung und unterstützt damit unternehmensinterne, kontinuierliche Verbesserungsprozesse. Das aus den virtuellen Versuchen erzeugte Wissen wirkt sich bei jedem weiteren neuen Werkzeug positiv auf die Verkürzung von Entwicklungszeiten und eine robustere Kernfertigung aus. MAGMA C+M nutzt hierzu integrierte virtuelle Methoden zur Versuchsplanung, um relevante Parameter auto-

matisiert und systematisch zu variieren. Die Ergebnisse können - ebenfalls automatisiert - quantitativ ausgewertet werden [3-4].

Klare und konkrete Ziele sind eine wichtige Basis für erfolgreiches Handeln. Dies gilt insbesondere auch für die virtuelle Optimierung. Dabei müssen die Ziele in der Software quantitativ bewertbar sein. Das Ziel, einen „guten Kern“ zu produzieren, lässt sich mathematisch nicht beschreiben. Eine sinnvolle Zielsetzung für das Kernschießen ist, eine bestimmte Kerndichte über den gesamten Kern oder an definierten Stellen zu erreichen. Bei der Aushärtung eines Cold-Box-Kernes kann eine Zielsetzung sein, die Strömung so auszurichten, dass der Aminverbrauch minimiert und gleichzeitig kurze Begasungszeiten realisiert werden.

Für die automatisierte Optimierung durch die Software entscheidet der Fachmann, welche Freiheitsgrade im Werkzeug oder in den Prozessbedingungen im Programm systematisch variieren sollen. Beispiele hierfür sind die Variation der Positionen für die Schieß- bzw. Begasungsdüsen oder für die Entlüftungen im Werkzeug. Dies gilt sowohl für den Teilprozess Kernschießen als auch für die Begasung oder Trocknung. Für die Schießdüsen können zusätzlich auch die Düsentypen bzw. deren Austrittsquerschnitte variiert werden. Für die Entlüftungsdüsen sind darüber hinaus auch die Auswirkungen eines zunehmenden Verschmutzungsgrades relevant. Weiterhin können Prozessbedingungen zwischen den beiden Teilprozessen Kernschießen und Begasen variiert werden, um die tatsächliche Vorgehensweise in der Praxis abzubilden. So werden häufig z. B. oben liegende Entlüftungen beim Kernschießen zu Einlässen für die anschließende Begasung. Damit ändern sich die Funktion der Düsen und die lokale Gasströmung (**Bild 3**).

Messbare Qualitätskriterien für das Kernschießen können die lokale Kerndichte oder die eingeschossene Sandmasse sein. Wenn bei einem Kern schwierig zu füllende Bereiche bekannt sind, ist es von besonderem Interesse, z. B. Verdichtungsgrade speziell an diesen kritischen Stellen quantitativ zu bewerten. Hierfür werden sogenannte Auswertgebiete definiert, in denen sich die gewählten Qualitätskriterien lokal bestimmen lassen. Für die Simulation der Begasung werden Qualitätskriterien formuliert, die aushärtekritische Bereiche identifizieren. Durch die Berechnung der lokalen Aminkonzentrationen zu bestimmten Zeitpunkten kann auf diese Weise die Begasungseffektivität quantitativ bewertet werden.

Bei einer automatisierten virtuellen Optimierung werden eine Vielzahl von Varianten, die sich aus den definierten Freiheitsgraden ergeben, auf Basis eines statistischen Versuchsplans vom Programm autonom berechnet und entsprechend der gewählten Qualitätskriterien ausgewertet. Aus der Gesamtzahl der Varianten wird für die gewählten Ziele entweder das jeweilige Optimum oder der beste Kompromiss ermittelt. Wenn der Versuchsraum durch verschiedene Variablen, die jeweils in mehreren Schritten verändert werden, festgelegt ist, kann die Gesamtzahl möglicher Kombinationen beliebig groß werden. Die Software bietet daher unterschiedliche Optionen, um aus der Gesamtzahl der Designs mithilfe von statistischen Methoden eine repräsentative Menge auszuwählen und damit auch den Berechnungsaufwand zu reduzieren. Dabei wird eine gute Abbildung der Einflussgrößen und ihrer Veränderungen sichergestellt. Auf diese Weise können zahlreiche Varianten in akzeptabler Zeit durchgerechnet werden.

Aus der quantitativen Bewertung der Ergebnisse lassen sich Korrelationen und Zusammenhänge ableiten, die sichere Entscheidungen für das Erreichen der festgelegten Ziele ermögli-

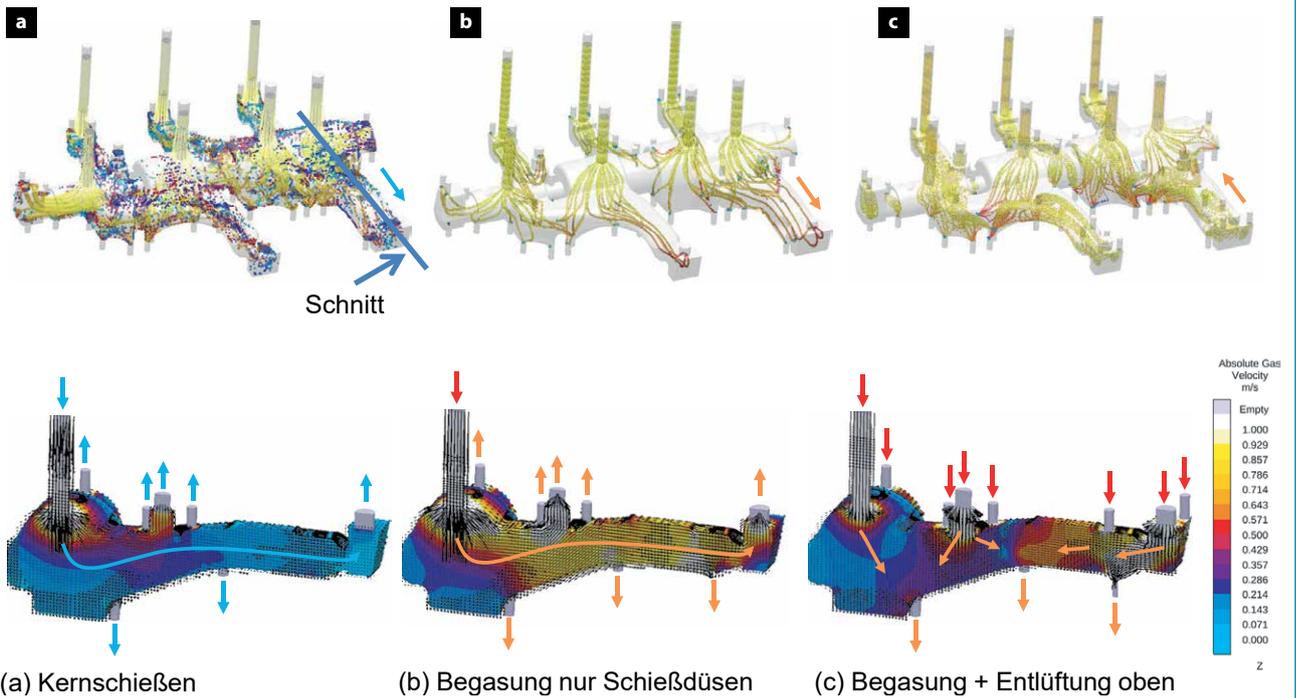


Bild 3: Die Düsenbelegung bestimmt die Strömungswege. Gleiche Ein- und Auslässe bei Kernschießen und Begasen führen zu vergleichbarer Strömungsausrichtung (a und b). Werden z. B. oben liegende Entlüftungen auch aktiv zur Begasung genutzt, werden die Strömungswege verändert (c).

Oben: Strömungstracer zur Analyse von Strömungsprofilen.

Unten: Geschwindigkeitsverteilung in einem Schnitt des Kerns. Zu beachten ist die Richtungsänderung der Strömung zwischen (a) und (c).

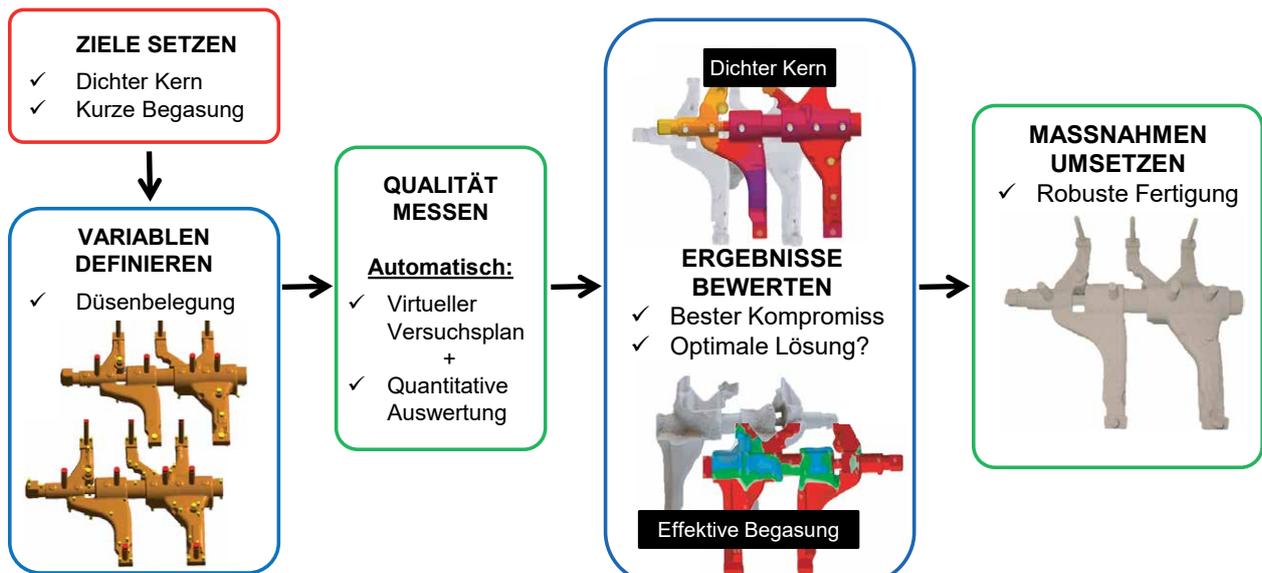


Bild 4: Vorgehensweise zur systematischen, virtuellen Optimierung, gleichzeitig für Kernschießen und Aushärtung - von der Zielsetzung bis zur Umsetzung von Maßnahmen in der Praxis.

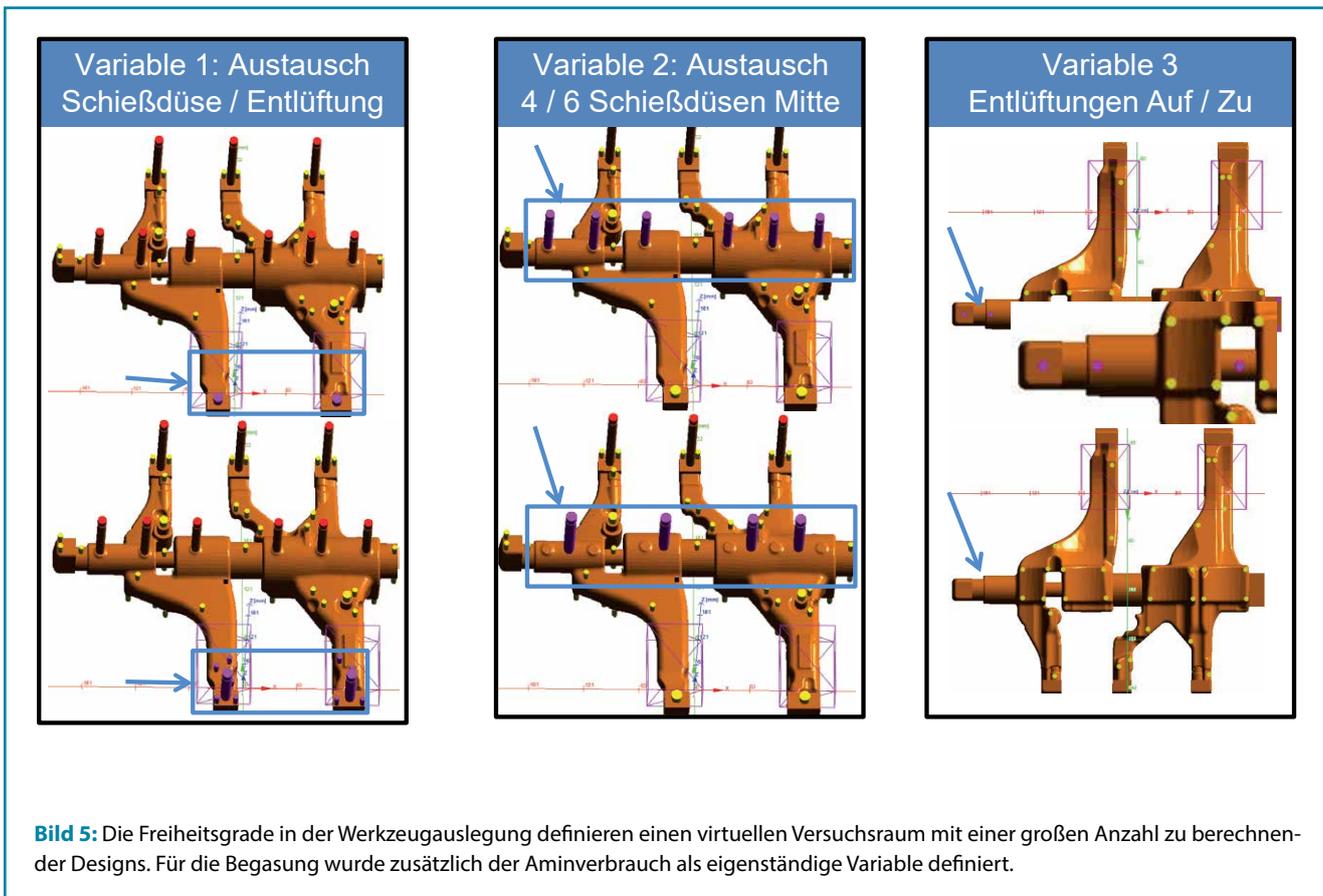


Bild 5: Die Freiheitsgrade in der Werkzeugauslegung definieren einen virtuellen Versuchsraum mit einer großen Anzahl zu berechnender Designs. Für die Begasung wurde zusätzlich der Aminverbrauch als eigenständige Variable definiert.

chen (Bild 4). Die beschriebene Vorgehensweise wird nachfolgend an zwei Beispielen demonstriert und zeigt exemplarisch die Potenziale und Vorteile der virtuellen Optimierung auf.

4 Der beste Kompromiss – Gleichzeitiges Optimieren von Kernschießen und Aushärtung

Bei der Auslegung von Kernwerkzeugen gibt es immer mehrere Lösungen, die in der Praxis funktionieren. Mit der Erstausslegung des Werkzeugs werden insbesondere hinsichtlich der Positionierung von Schießdüsen und Entlüftungen mögliche Änderungen frühzeitig in Erwägung gezogen und so gut wie möglich berücksichtigt. Das Setzen von Blinddüsen reduziert kostenaufwendige nachträgliche Änderungen, erhöht allerdings die Fertigungskosten für die Erstausslegung. Das reale Aktivieren und Deaktivieren an vorbereiteten Entlüftungspositionen erfolgt dann während der Einfahrphase an der Maschine, was zusätzlich den Testaufwand signifikant erhöht.

In der Kernfertigung wird für das Kernschießen und für die anschließende Begasung zur Aushärtung immer noch sehr oft dieselbe Düsenkonfiguration verwendet. In vielen Kernmachereien gibt es Auslegungsregeln, dass nur über die Einschüsse aktiv begast werden darf und Entlüftungen sowohl beim Schießen als auch bei der Begasung die gleiche Funktion behalten. In diesem Fall bleiben die Entlüftungswege unverändert (Bild 3b). Wenn jedoch am Werkzeug nach oben offene Entlüftungskanäle vorhanden sind, über die dann aktiv begast wird, ändert sich die Ausrichtung der Strömung signifikant (Bild 3c). Bild 5 skizziert die untersuchten Freiheitsgrade für ein neues Werkzeug, bei dem

für das Kernschießen Anzahl und Positionen von Schießdüsen sowie die Positionierung der Entlüftungsdüsen variiert wurden. Das Einbringen von Schießdüsen anstatt von Entlüftungen auf der "zweiarmigen" Seite (Variable 1) sollte insbesondere die Frage klären, ob ein oder zwei Kerne gleichzeitig hergestellt werden können. Wenn Schießdüsen verwendet werden, war es von den Abmessungen der Maschine her nicht möglich, ein Zweifachwerkzeug zu realisieren. Für die mit dem Schießen gekoppelte Berechnung der Aminbegasung wurde zusätzlich der Aminverbrauch als Variable definiert. Alle oben liegenden Entlüftungen wurden zur aktiven Begasung verwendet. Für die ausgewählten Freiheitsgrade wurden 16 unterschiedliche Designs gerechnet und ausgewertet (Bild 6).

Für die Varianten mit derselben Düsenanordnung bedeutet ein gleichzeitiges Optimieren von Schießen und Begasen, dass für die jeweils definierten Ziele in Summe der beste Kompromiss gefunden werden muss. Die quantitative Auswertung zeigt im Übersichtsdiagramm das gesamte Parameterfeld, unter welchen Bedingungen beim Schießen eine ausreichende Verdichtbarkeit der Kerne erreicht oder lokal in möglichst kurzer Zeit eine bestimmte minimale Aminkonzentration überschritten wird. Aus dem Diagramm ergeben sich die folgenden Erkenntnisse:

1. Die Ergebnisse der Varianten für die Variable 1 zeigen für den Teilprozess Schießen eindeutig, dass auf der zweiarmigen Seite Schießdüsen gesetzt werden müssen, um eine ausreichende Sandverdichtung zu erreichen.
2. Für die Variable 2 sind die Dichteunterschiede für beide Auslegungsvarianten gering. Eine Entscheidung würde tenden-

3x Gruppen Entlüftungen zu/offen	2 Varianten Aminverbrauch
2 Aminmengen	2 Begasungsdrücke
64 Varianten	

Bild 7: Variation der Entlüftungsbedingungen zwischen den Prozessschritten 'Kernschießen und Begasen' durch systematisches Öffnen und Schließen von Düsengruppen. Ziel ist die Reduzierung der Begasungszeit und des Aminverbrauchs durch eine effektivere Strömungsausrichtung.

Die Untersuchung der Strömung für eine einzelne Simulation zeigt die Mittelachse im Kern als Schwachstelle auf, da sie schwierig zu begasen ist (siehe Bild 1b bzw. Bild 6 rechts unten). Die Ergänzung weiterer Entlüftungen oder das variable Öffnen und Schließen vorhandener Entlüftungen ergibt in Summe sehr schnell eine beliebig große Menge möglicher Varianten (**Bild 7**). Daher wurden als Freiheitsgrade drei verschiedene Gruppen definiert, die im Werkzeug jeweils offen oder geschlossen sein können:

- kleinere Entlüftungsdüsen an den kleinen Querschnitten und den Kernenden auf der Unterseite,
- sechs große Entlüftungsdüsen auf der Oberseite (an den Positionen, an denen vorher Schießdüsen angeordnet waren),
- kleinere Entlüftungen auf der Oberseite an den kleinen Querschnitten und an den Kernenden.

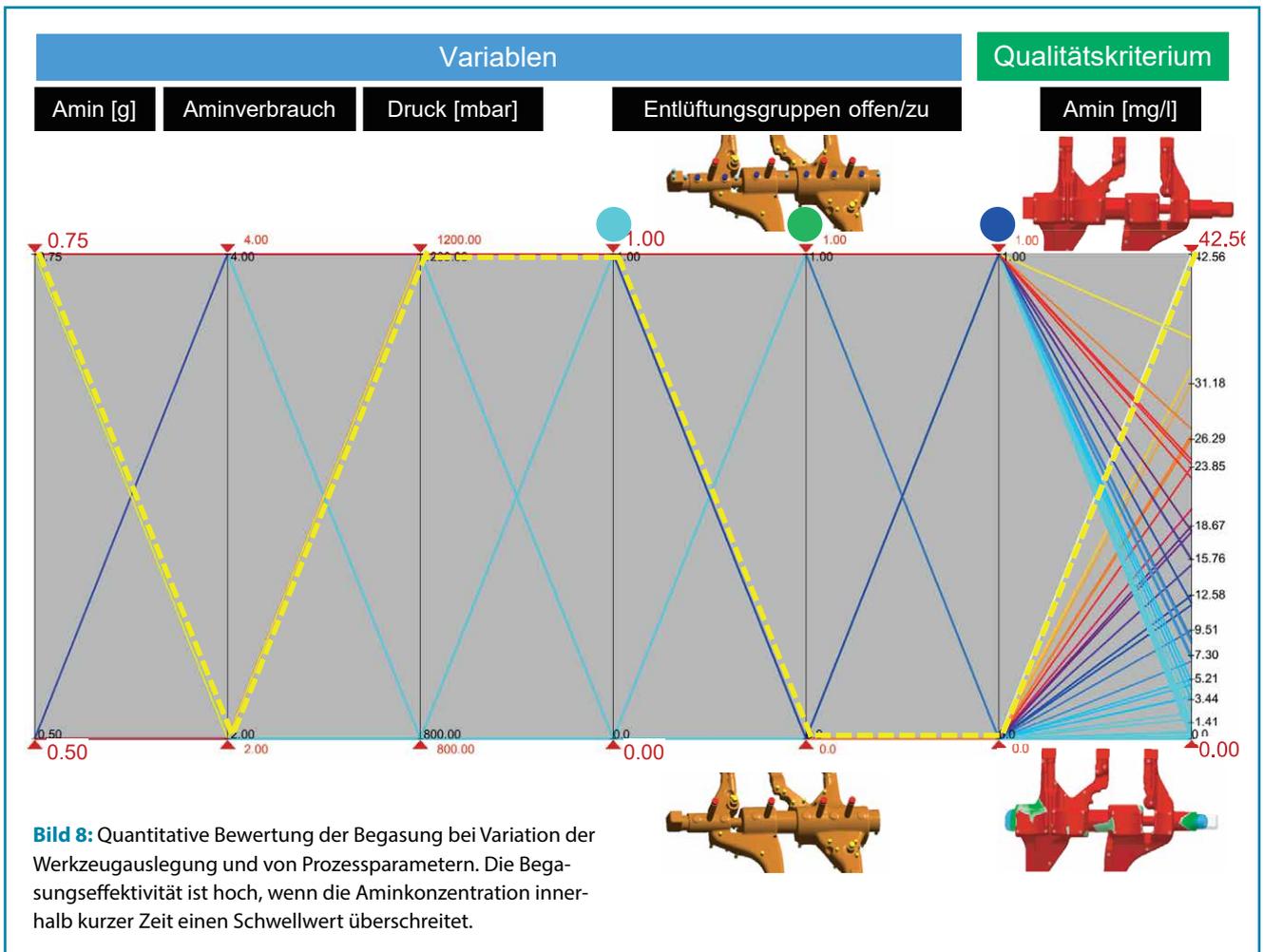
Darüber hinaus wurde zusätzlich als Variable der Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter (Begasungsdruck oder Aminverbrauch) auf die Begasungsqualität bewertet.

Die Auswertung des virtuellen Versuchsplans bietet quantitative Informationen, mit welcher der Varianten an allen Stellen des Kerns eine vordefinierte Konzentration des Amins in kürzester Zeit erreicht werden kann (**Bild 8**). Die Bewertung der unterschiedlichen Entlüftungsvarianten ermöglicht damit die folgenden Aussagen hinsichtlich ihrer Begasungseffektivität:

1. Die Begasung ist am effektivsten, wenn die sechs großen Entlüftungen auf der Oberseite und die kleineren an der Unterseite geschlossen sind.
2. Die kleineren Entlüftungsdüsen an der Oberseite des Kerns wirken sich positiv aus. Diese dünnen Wandstärken werden zwar durchströmt, wegen der jeweils kleinen Entlüftungsfläche entweicht das Amin aber auch nicht zu schnell und die Durchströmung der dickwandigeren Bereiche wird gefördert.
3. Mit einer optimierten Düsenbelegung wird der Einfluss der sich verändernden Prozessparameter auf die Begasungseffektivität gering. Kleinere Aminmengen führen zu ebenso guter Begasung wie verringerte Begasungsdrücke.

Wenn Kernschießen und Begasen eigenständig optimiert werden, ergeben sich daraus die folgenden Maßnahmen für die Werkzeugauslegung und Einstellung von Prozessbedingungen:

- schließen der großen Entlüftungen auf der Oberseite und der kleinen auf der Unterseite des Werkzeugs beim Begasen,
- öffnen der kleinen Entlüftungen an der Oberseite des Werkzeugs bei der Begasung,
- der Prozess ist für unterschiedliche Aminmengen und Begasungsdrücke robust.



Die eigenständige Optimierung beider Prozessschritte in Verbindung mit den bereits diskutierten Maßnahmen für das Kernschießen führte zur besten Lösung für eine robuste und gleichzeitig effektive Kernfertigung.

6 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Methodik zur virtuellen Prozessoptimierung bietet große Potenziale, die Kernfertigung nachhaltig zu verbessern. Das durch die Prozess-Simulation gewonnene Verständnis und die quantitative Bewertung von Prozesseinflussgrößen auf die Kernqualität sind Voraussetzungen, um in Verbindung mit der systematischen virtuellen Versuchsplanung den realen Prozess reproduzierbar zu optimieren. Für die Umsetzung in die Praxis der Kernfertigung können so frühzeitig und zuverlässig Maßnahmen zur bestmöglichen Werkzeugauslegung abgeleitet werden. Im Normalfall sollte für Kernschießen und Aushärtung die gleiche Werkzeugkonfiguration verwendet werden können. Alternativ können bereits bei der Werkzeugplanung Möglichkeiten bewertet werden, um durch die Variation insbesondere der Entlüftungssituation zwischen Schießen und Begasen die Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Kernfertigung drastisch zu steigern. Systematisches virtuelles Optimieren unterstützt zielorientiertes Vorgehen und fördert das Umdenken für neue, robuste und optimierte Lösungen in der Praxis.

Dr.-Ing. Ingo Wagner, Leiter Support, Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Geschäftsführer, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Literatur

- [1] *Giesserei* 96 (2009), [Nr. 12], S. 16-29.
- [2] *Giesserei* 100 (2013), [Nr. 4], S. 42-53.
- [3] *Giesserei* 103 (2016), [Nr. 12], S. 36-45.
- [4] *Giesserei* 105 (2018), [Nr. 1], S. 34-45.