

## Von der Simulation zur gieß- technischen Optimierung

VON INGO HAHN UND JÖRG C. STURM,  
AACHEN

### Einführung

Die Gießprozess-Simulation ist heute ein allgemein akzeptiertes und angewandtes Werkzeug in der Gussteilentwicklung, Arbeitsvorbereitung und Werkzeugauslegung. Simulationen werden von Fachleuten durchgeführt. Die Ergebnisse spiegeln somit auch immer ihre Erfahrung, gießtechnischen Überlegungen und ihr Know-how wider. Jede einzelne gießtechnische Simulation ist wie ein virtuelles Experiment. Der Fachmann entscheidet bis heute auf Basis der Simulationsergebnisse,

ob ein gewähltes Gießsystem oder ausgewählte Prozessparameter zu akzeptabler Qualität führen und erarbeitet auf dieser Basis Vorschläge für verbesserte Lösungen.

„Alles aus einem Guss“ ist einer der größten Vorteile von Gießprozessen im Verfahrenswettbewerb. Dies macht andererseits Entscheidungen für eine geeignete oder die beste Fertigungstechnik aber auch sehr komplex: Alles geschieht gleichzeitig und ist miteinander verknüpft. Die Änderung eines einzelnen Prozessparameters hat eine Reihe von Auswirkungen auf den Verfahrensablauf und kann die Qualität in vielfältiger Weise beeinflussen.

Die heute an gießtechnische Entwicklungen gestellten Anforderungen erfordern Methoden und Werkzeuge, deren Einsatz maximale Robustheit und Wirtschaftlichkeit zu einem möglichst frühen Zeitpunkt sicherstellen. Dieser Verbesserungsprozess ist wesentlich geprägt durch eine beschränkte Anzahl von realen Versuchen im Entwicklungsstadium oder die durch den Aufwand bedingte, begrenzte Freiheit bei der Änderung von Fertigungsparametern in der Serie. Eine quantitative Aussage über die Gussqualität, basierend auf realen Gießversuchen, und die Reduzierung praktischer Experimente zur Optimierung eines Gießprozesses bleiben eine dauernde Herausforderung.

Im Unterschied zu realen Versuchen bietet virtuelles Experimentieren viel größere Freiheitsgrade. So können in der Gießprozess-Simulation Prozessbedingungen im Gussteildesign oder in der Gießtechnik gleichzeitig und unabhängig voneinander geändert werden. Darüber hinaus können beliebige Qualitätskriterien individuell und quantitativ ausgewertet werden. In Verbindung mit bekannten statistischen Werkzeugen zur Versuchsplanung kann nun die Simulation auch zur automatischen Optimierung genutzt werden [1]. Die Software unterstützt die gleichzeitige Verfolgung unterschiedlicher Zielsetzungen und ermöglicht damit die Ermittlung eines geeigneten Kompromisses aus Qualitätszielen und wirtschaftlichen Anforderungen. Durch die automatische Auswertung von simulierten Qualitätskriterien im virtuellen Experimentierfeld können schnell und einfach optimale Wege gefunden werden, um die gewünschten Ziele zu erreichen. Dadurch wird nicht nur die Anzahl nötiger realer Versuche reduziert. Zusätzlich können viele Prozessparameter während einer frühen Phase der Gussteil-, Werkzeug- oder Prozessentwicklung in ihren Auswirkungen auf die Einstellung eines robusten Prozessfensters bewertet werden [2].

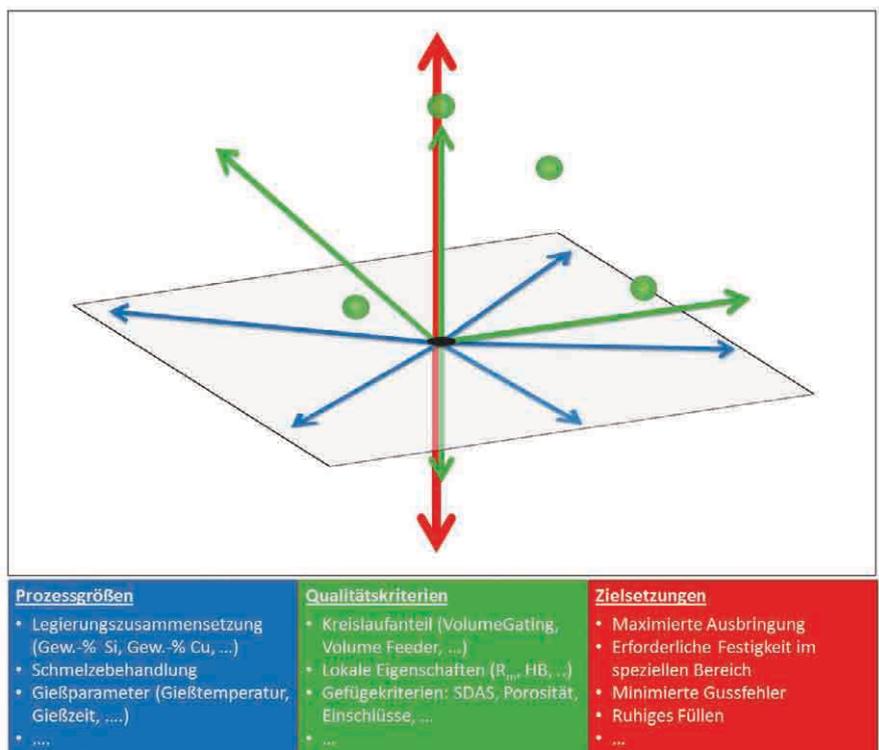
Die neue Methodik des virtuellen Experimentierens und der Optimierung ist kein Ersatz für das Prozesswissen und die Expertise des Fachmannes: Der Gießereifachmann muss seine Freiheitsgrade und das Anforderungsprofil an das Gussteil und an die technischen und wirtschaftlichen Fertigungsrandbedingungen kennen und daraus entsprechende Randbedingungen und Zielsetzungen im Programm festlegen. Gleichzeitig muss er die entsprechenden Qualitätskriterien quantitativ spezifizieren, die die definierten Zielsetzungen messbar machen. Die an die Software zu richtenden Fragen sind z. B.: Was ist ein gutes Gießsystem? Wie erreiche ich eine robuste Werkzeugauslegung? Welche Fertigungsparameter sichern die gewünschte Gussteilqualität? Zur Beantwortung dieser Fragen benötigt das Programm quantitative Formulierungen für die maßgeblichen Einflussgrößen, die Messgrößen und die Optimierungsziele. Diese Aspekte bilden das virtuelle Versuchsfeld ab (Bild 1). Es besteht damit aus drei elementaren Bausteinen, die in MAGMA<sup>5</sup> implementiert wurden:

- > variable Prozessgrößen der virtuellen Versuche;
- > ausgewählte Qualitätskriterien, also berechnete quantitative Ergebnisse;
- > unterschiedliche Zielsetzungen als Zielfunktionen für eine Optimierung.

## KURZFASSUNG:

Gießprozess-Simulation ist ein akzeptiertes Werkzeug für die Bauteilauslegung und Prozessgestaltung von Gussteilen. Sie ermöglicht die Quantifizierung von Erfahrungswissen und liefert Einblicke in Fehlerursachen. Jede Simulation liefert jedoch nur Ergebnisse für einen einzelnen Arbeitspunkt. Daher können einzelne virtuelle Experimente dem Experten nicht aufzeigen, wie robust sein Entwurf ist und ob er unter den gegebenen Bedingungen das Optimum darstellt.

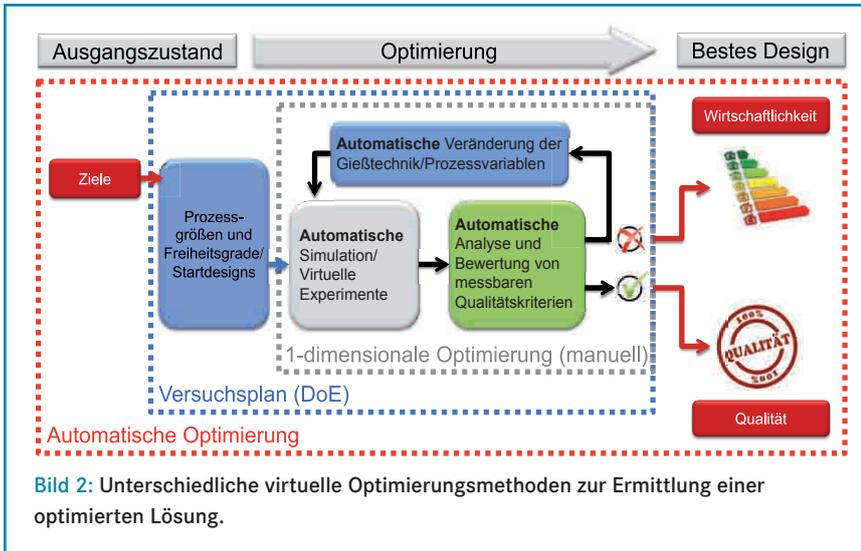
An realen Gussteilen wird gezeigt, wie die Verknüpfung von statistischen Methoden zur Versuchsplanung mit der Gießprozess-Simulation in MAGMA<sup>5</sup> als virtuelles Versuchsfeld eingesetzt werden kann, um robuste Fertigungsfenster einzustellen und verschiedene Optimierungsziele gleichzeitig und automatisiert zu verfolgen. Neben der Darstellung einer konkreten Lösung erweitert die neue Methodik des virtuellen Experimentierens das Prozessverständnis durch transparente Informationen über die quantitativen Zusammenhänge von Prozessvariablen und Qualitätskriterien: Damit kann der Einfluss von konstruktiven Änderungen oder Schwankungen von Fertigungsparametern systematisch analysiert werden, um Ideen für die optimale Gestaltung des Gießsystems, das Werkzeugkonzept und maßgebliche Prozessparameter für eine wirtschaftliche Fertigung bereits im Vorfeld einfach und effektiv zu überprüfen.



**Bild 1:** Virtuelles Versuchsfeld mit Beispielen für variierte Prozessgrößen, berechnete Qualitätskriterien und in der Software definierbare Optimierungsziele.

Bis heute erfolgt beim Einsatz der Simulationsprogramme die Auswahl der Prozessparameter und Bewertung der Ergebnisse durch den Anwender. Der Fachmann führt aufgrund seiner Bewertung der Qualitätskriterien manuell Änderungen in der Gießtechnik oder dem Werkzeugkonzept durch und überprüft sie mit dem Programm, bis er mit dem Ergebnis zufrieden ist. Diese iterative Vorgehensweise kann man als eindimensionale, manuelle Optimierung bezeichnen (Bild 2).

In MAGMA<sup>5</sup> ist dieser innere Kreislauf (grau) erstmalig vollständig automatisiert und um die Möglichkeit erweitert worden, einen Versuchsplan (Design of Experiments, DoE) mit variablen Design- und Prozessgrößen vorab festzulegen (blau). Damit kann das Programm die vorgegebene Variation von Design- und Prozessvariablen wie bspw. Anzahl, Ort und Dimensionierung von Speisern, für den Prozess relevante Fertigungsparameter oder die Legierungszusammensetzung automatisiert abarbei-



ten. Das Programm bewertet für jeden virtuellen Versuch die definierten Qualitätskriterien eigenständig: Qualitätskriterien können alle in MAGMA<sup>5</sup> verfügbaren Ergebnisse sein, also Informationen über den Fertigungsablauf (z. B. Erstarrungszeit), Fehlervorhersagen (z. B. Porositäten, Luft-einschlüsse) oder lokale Gefüge und Eigenschaften (z. B. Dendritenarmabstand, Anzahl an Sphäroliten, Zugfestigkeit).

Das untersuchte Versuchsfeld kann darüber hinaus in MAGMA<sup>5</sup> mit unterschiedlichen Zielfunktionen verbunden werden (rot). Die Zielsetzungen einer Optimierung stehen dabei typischerweise im Konflikt zueinander. Daher muss das Programm einen Kompromiss finden, den der Gießer hinsichtlich der unterschiedlichen Anforderungen (z. B. wenig Porosität oder hohes Ausbringen) auch in der Praxis sucht. Das Programm ist in der Lage, unterschiedliche Ziele gleichzeitig zu verfolgen und aus bereits durchgeführten Experimenten zu lernen. Die Implementierung praktischer, erfahrungsbasierter Vorgehensweisen in das Simulationsprogramm ist Voraussetzung für diese Methodik. Für die virtuelle automatische Optimierung werden genetische Algorithmen genutzt, die - angelehnt an die Natur - für die vorgegebenen Freiheitsgrade durch Auswahl, Vererbung oder Mutation einzelner Qualitätskriterien den optimalen Arbeitspunkt anstreben.

Die neue Methodik der virtuellen Versuchsplanung und automatischen Optimierung mit MAGMA<sup>5</sup> wird im Folgenden für unterschiedliche Anwendungsbeispiele vorgestellt.

### Bewertung und Verbesserung des Reinheitsgrades im Stahlguss

Ein Schlüsselkriterium für die Bewertung der Qualität moderner Stahlgussteile ist

ihr Reinheitsgrad. Die Ansammlung von Verunreinigungen in kritischen Bereichen ist einer der wichtigsten Gründe für Nacharbeit und hat i. d. R. eine Verminderung mechanischer Eigenschaften zur Folge. Oft führen durch Einschlüsse bedingte Oberflächenfehler an bearbeiteten Flächen zum Ausschuss oder aufwendiger Nacharbeit.

Die meisten Einschlüsse in Stahlgussteilen entstehen durch Reoxidation während der Formfüllung in Folge des hohen Sauerstoffpotenzials in der Schmelze. Der Gießer versucht, diesem Mechanismus durch geschickte Auslegung des Gießsystems entgegenzuwirken: Beruhigte Formfüllung und die Vermeidung von eingeschlossener Luft in der Stahlschmelze sichern beim Abguss einen deutlich verbesserten Reinheitsgrad.

Der Reinheitsgrad kann am realen Teil nur durch Bearbeiten von Oberflächen, Anwendung entsprechender Prüfverfahren und anschließendes Bewerten der Qualität beurteilt werden. Wenn die Untersuchung nicht zerstörend für das Teil sein soll, wird sie an externen Proben durchgeführt. Dabei wird jedoch nur die metallurgische Schmelzqualität bewertet. Der für Gussteile unverzichtbare Aspekt strömungsbedingter lokaler Effekte wird völlig außer Acht gelassen. Die experimentelle Bewertung der Verteilung von Einschlüssen und nichtmetallischen Verunreinigungen ist immer zeitaufwendig und in der Fertigung nicht für jedes Gussteil zu realisieren.

Virtuelle Experimente mit Hilfe der Simulation können hingegen schnell und ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Sie erlauben die systematische Variation und quantitative Bewertung der Gießtechnik (Bild 3). In dem Beispiel wurde der Einfluss unterschiedlicher Gießlaufkonzepte auf die Menge und Vertei-

lung von Reoxidationseinschlüssen eines Stahlgussteiles untersucht. Hierzu wurden dem Programm zwölf verschiedene Laufvarianten vorgegeben. Die virtuellen Experimente wurden in MAGMA<sup>5</sup> ohne manuellen Eingriff des Anwenders automatisch generiert, berechnet und nach relevanten Qualitätskriterien bewertet. Die Experimente sind in dem Balkendiagramm nach dem Ergebnis für den berechneten Reinheitsgrad der Oberfläche sortiert. Dies erlaubt mit einem Blick die quantitative Beurteilung von guten bzw. schlechten Varianten. Eine gute (Nr. 3) und eine schlechte gießtechnische Variante (Nr. 10) sind in Bild 3 jeweils zusammen mit dem entsprechenden Simulationsergebnis zum Reinheitsgrad an der Gussteiloberfläche dargestellt.

Bild 4 zeigt die Auswertung der Oberflächenqualität für vier ausgesuchte Varianten. Als zusätzliches Qualitätskriterium ist der Turbulenzgrad der Formfüllung aufgetragen, der in der Simulation anhand der über die gesamte Formfüllzeit kumulierten freien Schmelzeoberfläche berechenbar ist. Bei der Variante mit den meisten Oberflächeneinschlüssen wurde gleichzeitig die unruhigste Füllung ermittelt. Dieses Diagramm bestätigt, dass die Verbesserung des Reinheitsgrades maßgeblich mit einer beruhigten Formfüllung zusammenhängt. Virtuelle Experimente erlauben ohne praktische Versuche eine schnelle und sichere quantitative Bestimmung von Qualitätskriterien und die einfache Ermittlung von Korrelationen zwischen der Gießtechnik und der Gussteilqualität.

### Optimierung der Speisung bei einem Planetenträger

Virtuelle Experimente erlauben es, die Gussqualität anhand unterschiedlicher, quantitativer Qualitätskriterien lokal zu bewerten. Im Zusammenspiel mit der Variation beliebiger Parameter für die Gießtechnik eröffnen sich nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, um wesentliche Einflüsse auf die Gussqualität zu ermitteln und optimale Lösungen für die Fertigungstechnik zu bestimmen. Als weiteres Beispiel wird die programmgestützte Optimierung der Gießtechnik für einen Planetenträger aus Gusseisen mit Kugelgraphit vorgestellt (Bild 5). Die Speisung des kritischen zentralen Flanschbereiches erfolgt durch Kopfspeiser, unterstützt mit verschiedenen Kühlkokillen. Zusätzlich kann die Wandstärke des Gussteils unterhalb der Speiser zur Verbesserung der Durchspeisung lokal verstärkt werden.

Um den Einfluss verschiedener gießtechnischer Parameter auf die Porosität

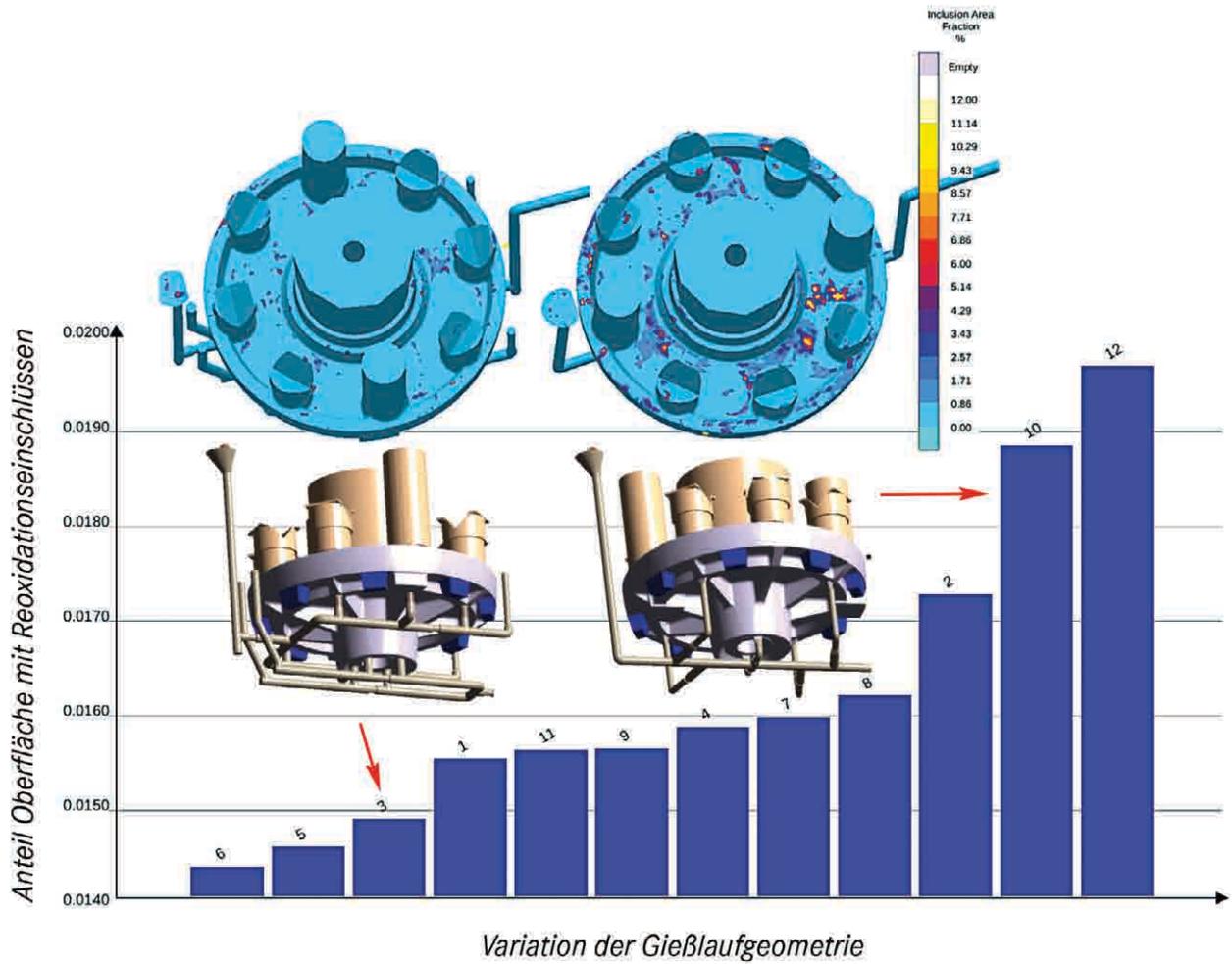


Bild 3: Automatische und quantitative Bewertung von Gießtechnik: Anteil an Reoxidationseinschlüssen an der Gussteiloberfläche für unterschiedliche Gießlaufgeometrien.

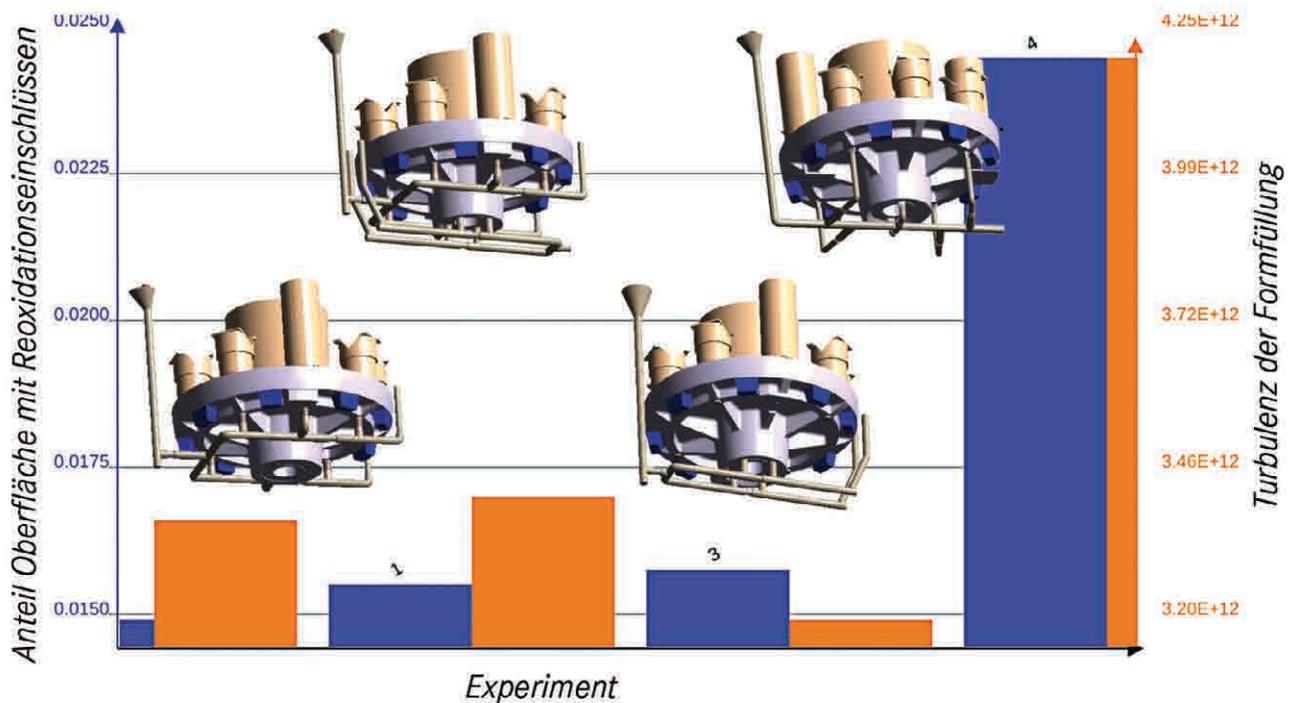
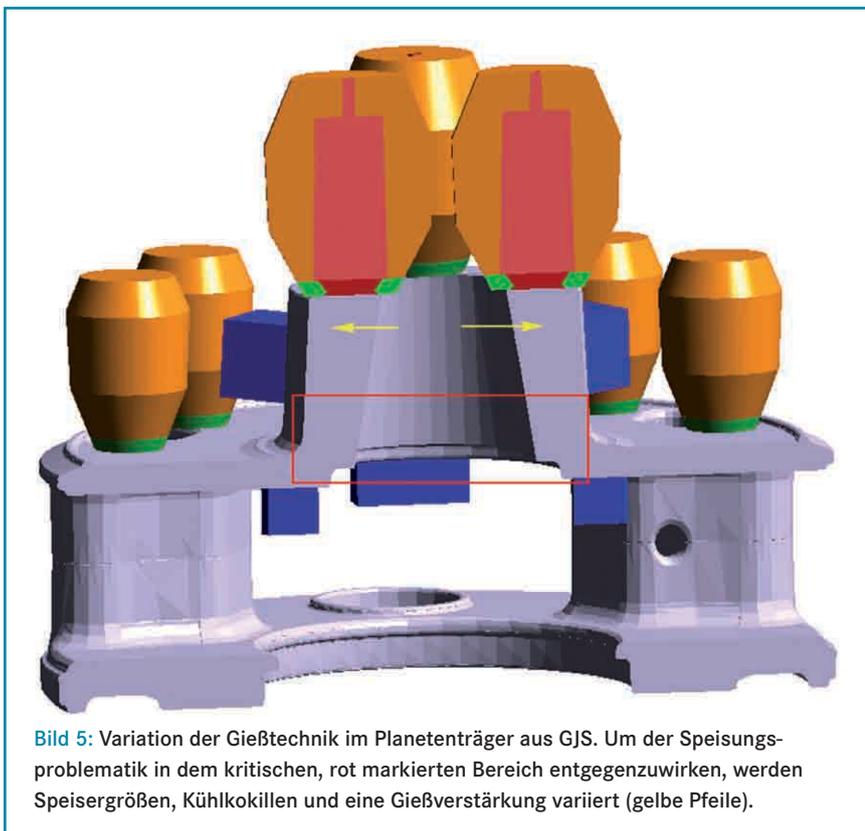


Bild 4: Vergleich von Oberflächenqualität und Turbulenz während der Formfüllung für vier Varianten.



**Bild 5:** Variation der Gießtechnik im Planetenträger aus GJS. Um der Speisungsproblematik in dem kritischen, rot markierten Bereich entgegenzuwirken, werden Speisergrößen, Kühlkokillen und eine Gießverstärkung variiert (gelbe Pfeile).

in dem kritischen Bereich zu untersuchen und die signifikanten fertigungstechnischen Einflussgrößen herauszuarbeiten, wurden die folgenden gießtechnischen Parameter variiert: Größe der Kopfspeiser, Stärke der Gießverstärkung, Konfiguration der Kühlkokillen unterhalb und an der Außenseite des Flansches. In MAGMA<sup>5</sup> wurde ein virtueller Versuchsplan von 32 Experimenten aufgestellt und selbstständig durchgerechnet.

**Bild 6** zeigt die Bewertung des Einflusses aller Parametervariationen auf die Qualität für die durchgeführten virtuellen Experimente. Jeder Punkt in den Streudiagrammen steht für ein einzelnes virtuelles Experiment – also das Ergebnis einer Simulation.

Die Ergebnisse zeigen, dass für alle variierten Prozessparameter ein niedriges Porositätsniveau erreicht werden kann. Dabei hat die Auslegung der Kühlkokillen einen signifikanten Einfluss: Bei einer maximalen Belegung mit Kühlkokillen (Experimente ganz rechts im oberen Bild) gelingt es, im Gegensatz zu den anderen Kokillenanordnungen, die Porosität klein zu halten. Diese Prozessvarianten sind gegenüber den anderen Fertigungseinflüssen entsprechend robust. Erwartungsgemäß hat auch die Gießverstärkung einen großen Einfluss auf die Durchspeisung: Mit zunehmender Gießverstärkung verringert sich das Streuband der Porositätswerte hin zu geringerer Porosität.

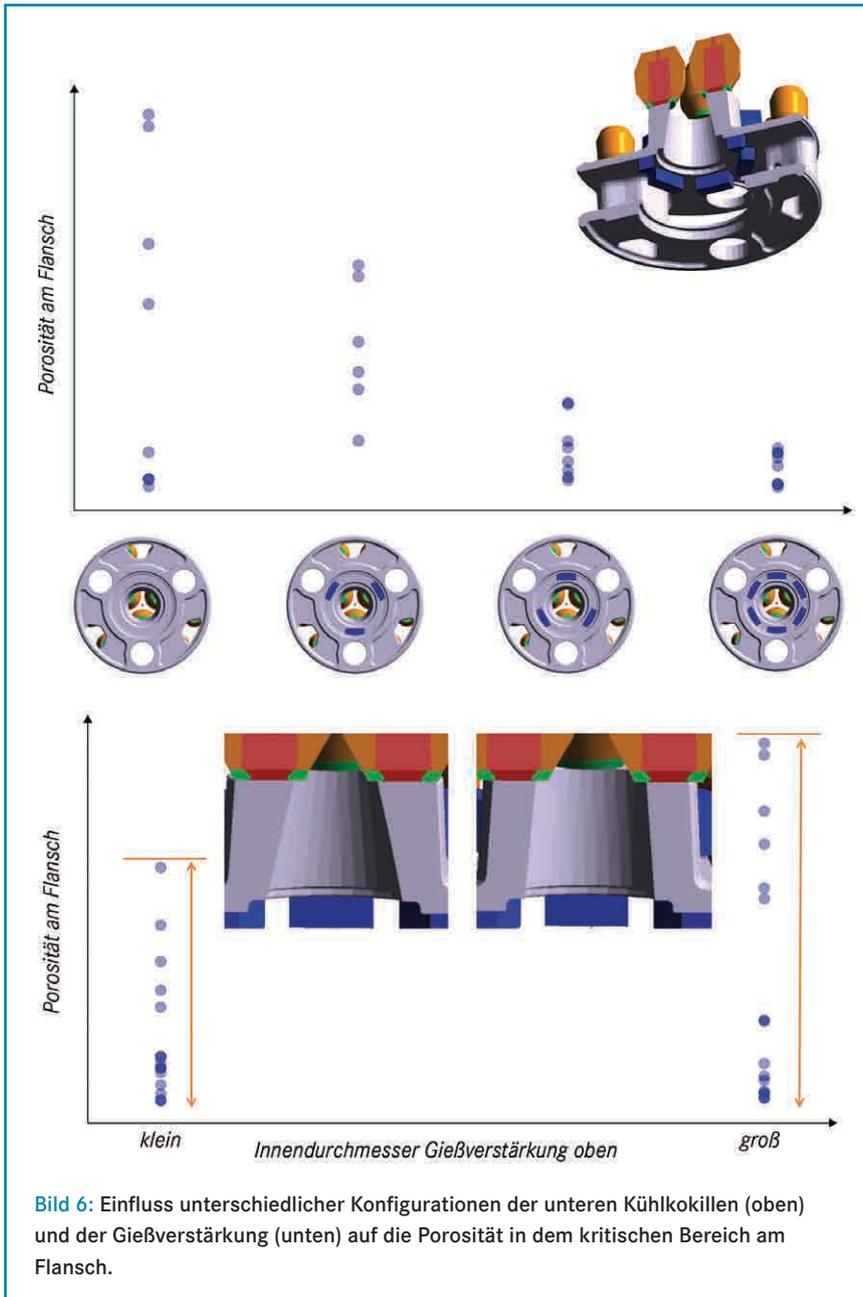
Aus dem virtuellen Versuchsplan wird deutlich, welche Fertigungsparameter signifikant für die Gussqualität sind und welche Veränderungen der Gießtechnik zu einer Verbesserung führen.

### Robuste Gießtechnik im Leichtmetall-Schwerkraftguss

Bei der Fertigung großer Stückzahlen kommt der Sicherstellung einer reproduzierbar guten Qualität eine besondere Bedeutung zu. Im Betrieb können Fertigungsparameter schwanken oder sich mit der Zeit verändern. Gießprozesse neigen aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen zu Prozessabweichungen. Externe Faktoren, z. B. verwendete Eingangsmaterialien, nehmen Einfluss auf den Abguss und verändern den sicheren Arbeitspunkt.

Virtuelle Experimente zeigen quantitativ, welchen Einfluss Prozessparameter auf die Gussqualität nehmen. Zusätzlich liefern sie jedoch wertvolle Informationen darüber, wie die Qualitätskriterien auf Schwankungen der Prozessparameter oder weiterer Einflussgrößen reagieren. Durch Einsatz des virtuellen Experimentierens kann also nicht nur der bestmögliche, sondern auch ein robuster Arbeitspunkt für einen Gießprozess gefunden werden.

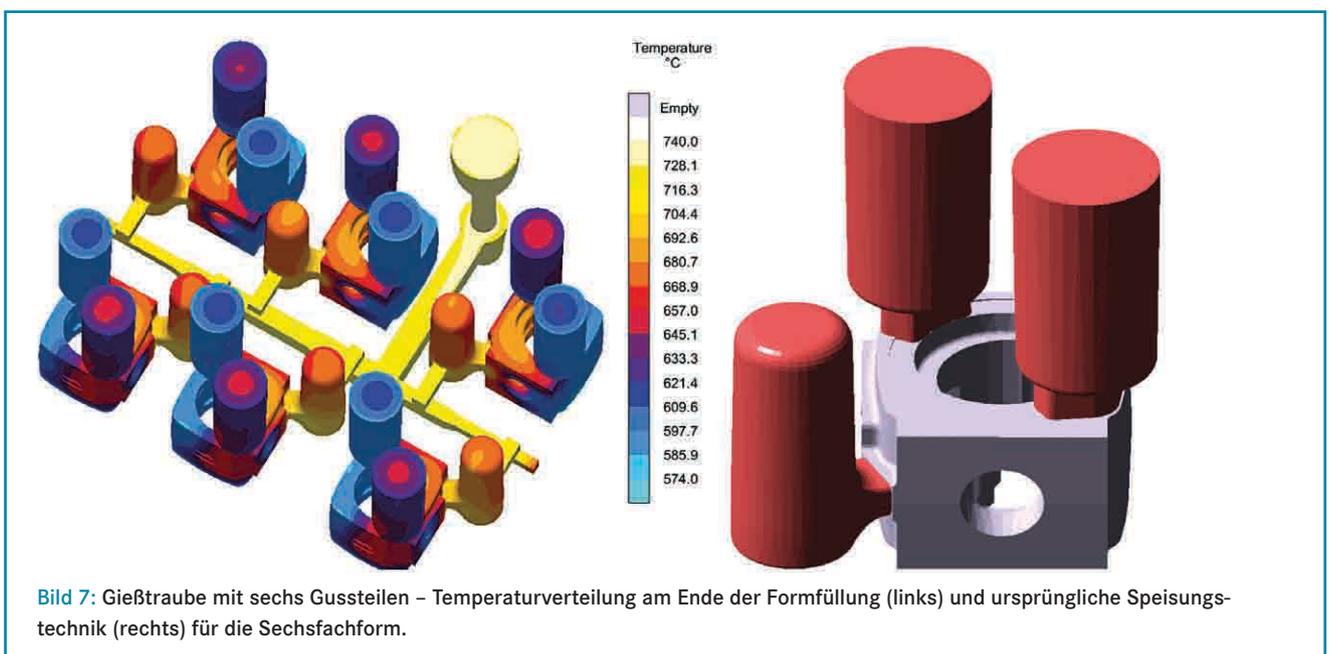
Beispielhaft wird dies für die Auslegung der Speisungstechnik eines Aluminium-Sandgussteils gezeigt. Das Gussteil

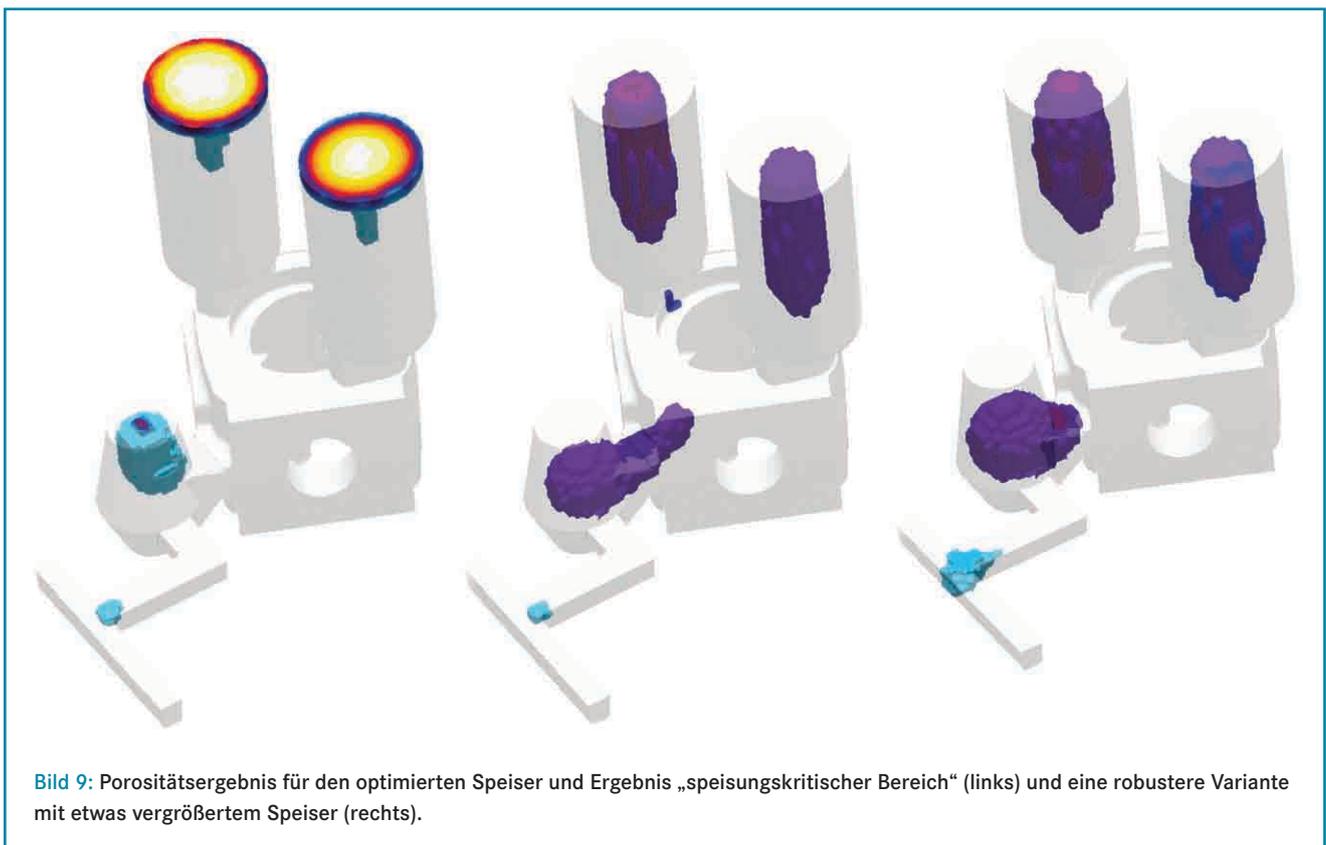
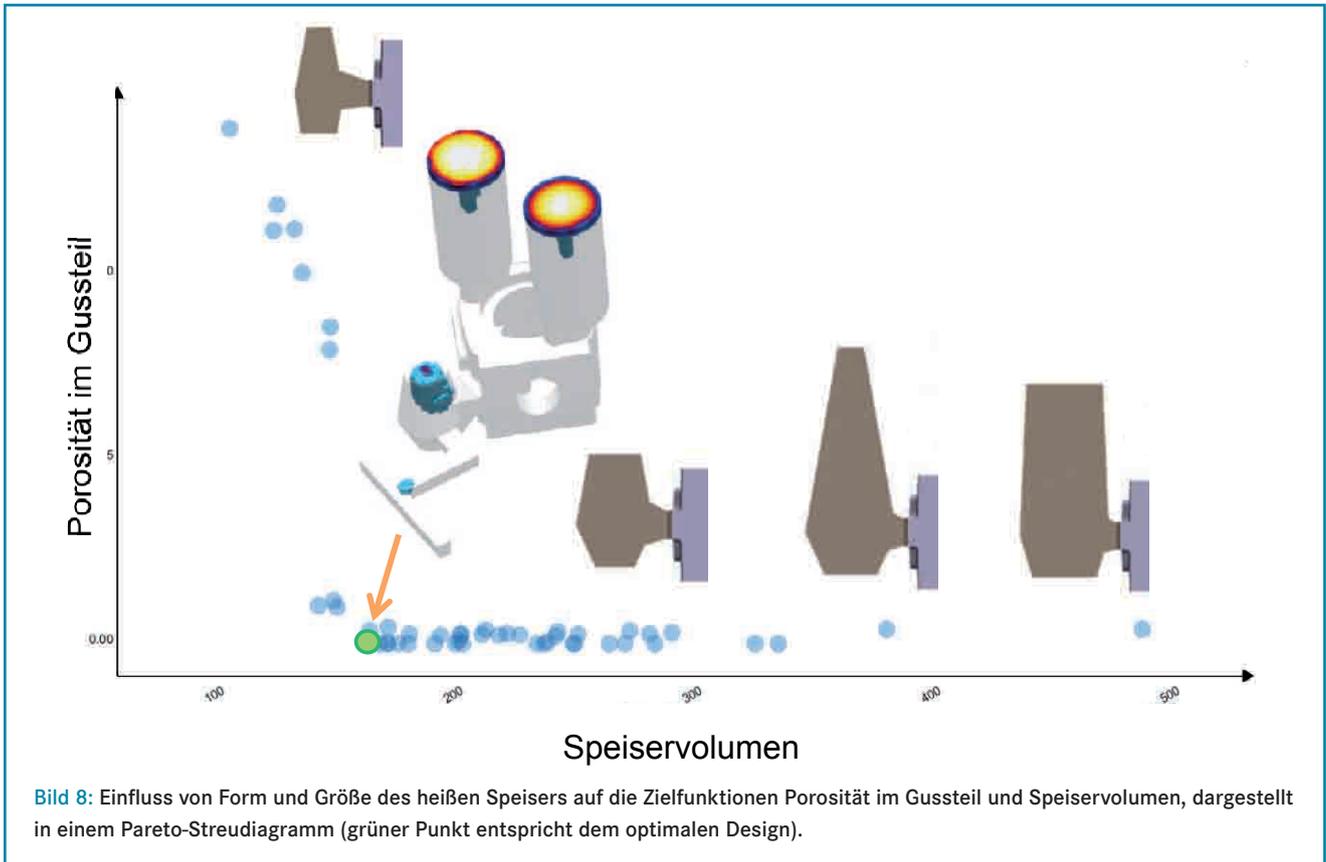


wird mit sechs Teilen auf der Modellplatte vergossen (Bild 7).

Nach der Formfüllung ist die Temperaturverteilung in den einzelnen Gussteilen erwartungsgemäß sehr unterschiedlich. Jedes Teil in der Gießtraube wird beim Abguss jeweils durch einen direkt angelegten heißen Speiser mit Schmelze versorgt. Auf jedem Teil sind jeweils noch zwei weitere kalte Speiser. Für die Optimierung von Form und Größe des heißen Speisers wurden die Speisergeometrien in MAGMA<sup>5</sup> parametrisiert und eine automatische Optimierung mit den beiden Zielfunktionen „Minimiere Porosität im Gussteil“ und „Minimiere Speiservolumen“ durchgeführt. Insgesamt wurden 45 virtuelle Abgüsse (Formfüllung und Erstarrung) in weniger als 8 h berechnet. In Bild 8 ist für alle Experimente die berechnete Porosität im Gussteil über dem benötigten Speiservolumen in einem Streudiagramm aufgetragen. Die hinsichtlich beider Zielfunktionen eindeutig beste Variante zeigt für die vorgegebenen Prozessparameter ein porositätsfreies Gussteil mit niedrigem Speiservolumen (grüne Markierung). Bild 8 zeigt auch, dass es eine Reihe weiterer Varianten gibt, das Teil porositätsfrei zu vergießen (horizontale Punkteschar). Diese würden dann aber zu einer Verschlechterung des Ausbringens führen und wären kostenaufwendiger.

Die gefundene Variante liefert optimale Qualität für alle sechs Teile der Gießtraube bei größtmöglicher Kosteneinsparung – unter der Voraussetzung, dass alle an diesem Arbeitspunkt vorgegebenen Prozessparameter eingehalten werden. Die berechneten porenfreien Versionen lassen jedoch nicht erkennen, wie robust die Fertigung in der Serie sein wird. Um das zu beurteilen, können in der Software ohne Neuberechnung



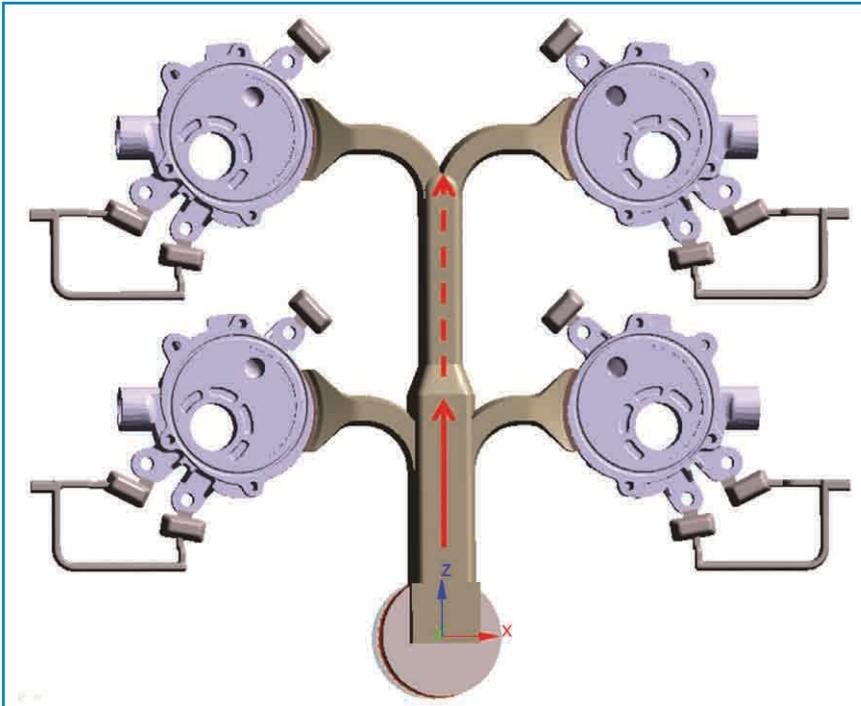


nachträglich beliebige weitere Qualitätsmerkmale berücksichtigt werden, die einen Rückschluss auf die Robustheit der Fertigungstechnik erlauben. Das Qualitätskriterium „speisungskritischer Bereich“ zeigt an, an welchen Stellen im Guss bis zuletzt Bedarf zur Nachspeisung besteht. Zieht sich

dieser Bereich in das Gussteil hinein, so besteht die Gefahr, dass bereits geringe Schwankungen der Prozessparameter zu Porosität im Teil führen können.

**Bild 9** zeigt links für das zunächst gefundene porositätsoptimierte Design des heißen Speisers die Porositätsanzeige

und den speisungskritischen Bereich. Erwartungsgemäß ist das Gussteil fehlerfrei, Porositätsanzeigen gibt es nur in den Speisern. Dagegen zieht sich die Anzeige des Kriteriums „speisungskritischer Bereich“ in das Gussteil hinein. Der Nutzer kann jetzt aus den gerechneten Varianten

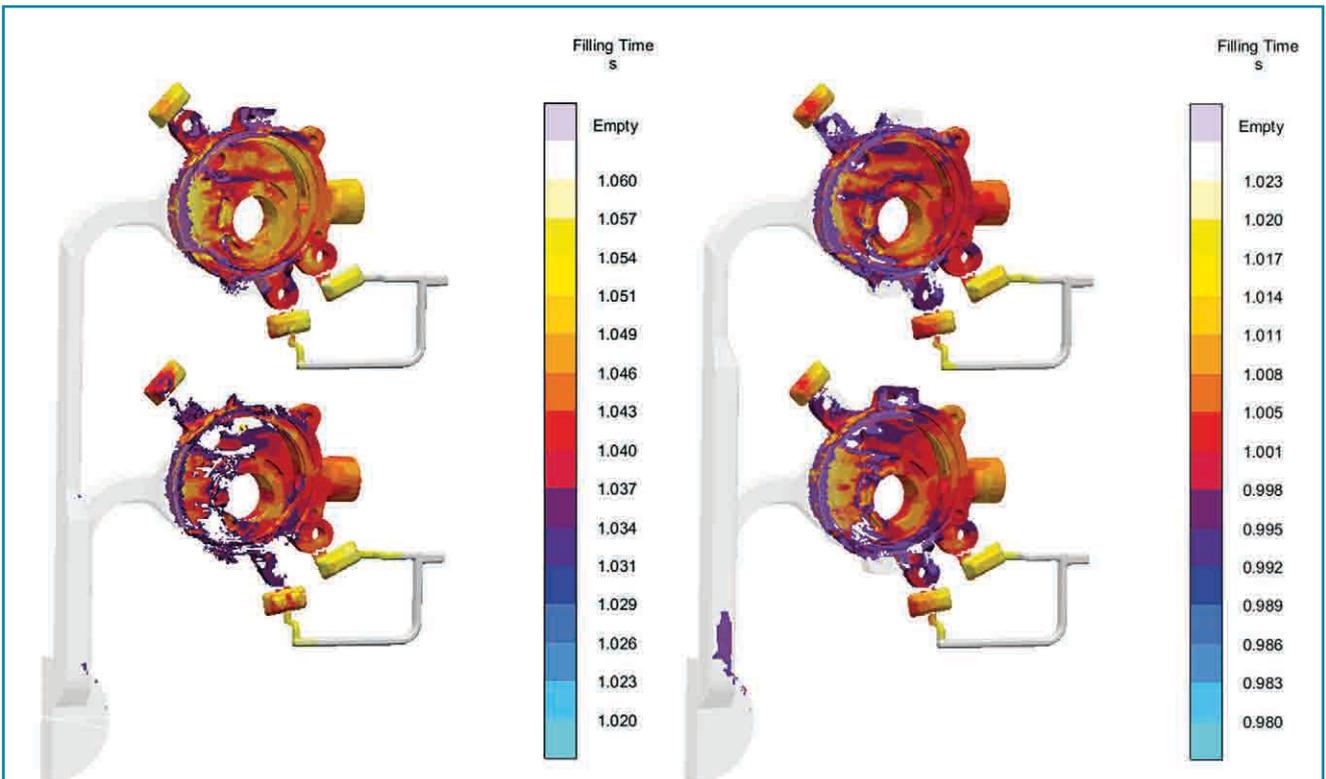


**Bild 10:** Vierfachform mit Verengung des Laufquerschnitts zwischen dem ersten und zweiten Abschnitt (siehe durchgängige bzw. gestrichelte Linie).

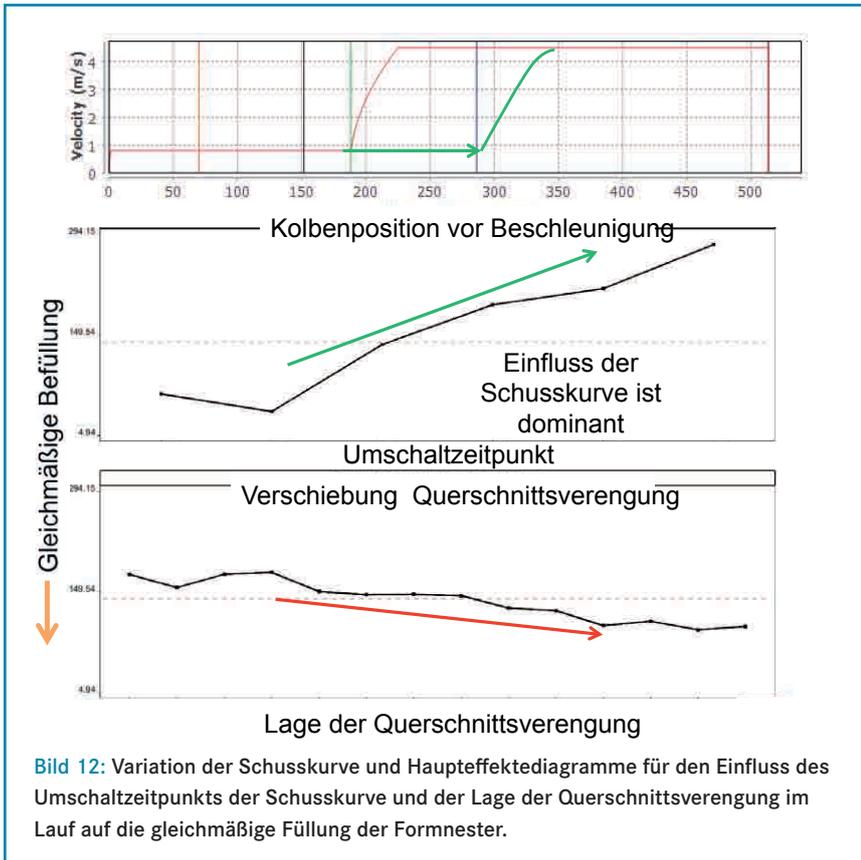
eine Speiservariante wählen, für die beide Kriterien unkritisch sind. In diesem Fall muss der Speiser gegenüber der zunächst optimierten Variante nur geringfügig vergrößert werden, um auch dieses Qualitätskriterium aus dem Gussstück in den Speiser zu verlagern (rechts). Die Gießtechnik ist damit robuster [3].

### Gekoppelte Auslegung von Laufdesign und Schussparametern im Druckguss

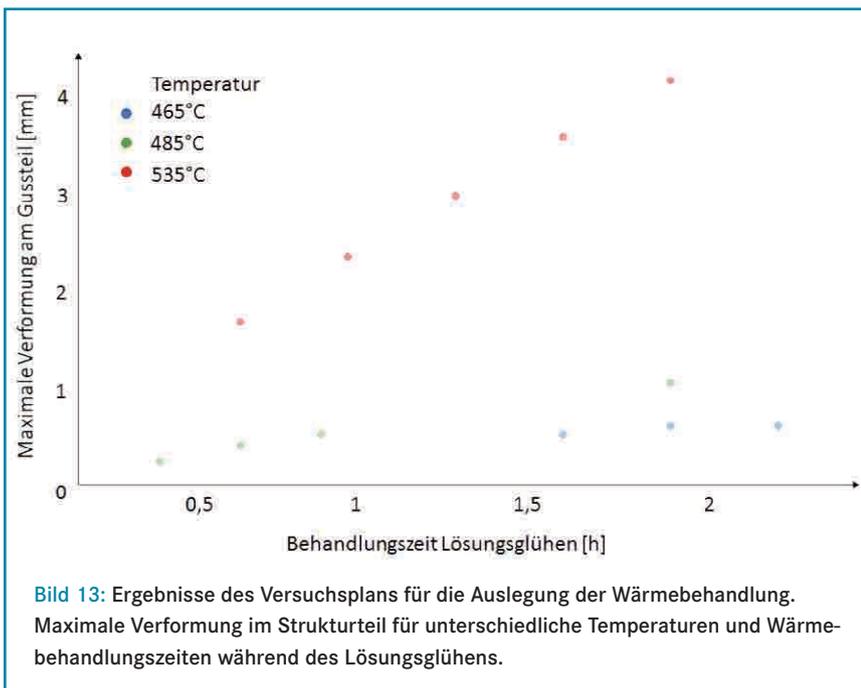
Da die geometrische Konzeption der Gießtechnik und die Einstellung der Prozessparameter beim Gießen voneinander abhängig sind, müssen der Formfüllverlauf und die Laufgeometrie im Druckguss für das zu vergießende Teil immer aufeinander abgestimmt werden. Beispielhaft wird hier die gleichzeitige Variation von Gießlaufdesign und Schusskurve und ihr Einfluss auf die Qualität der Formfüllung für eine Vierfachform bewertet. In der Regel verengt sich der Laufquerschnitt bei zunehmender Entfernung vom Einguss



**Bild 11:** Lokale Füllzeit für zwei virtuelle Abgüsse mit unterschiedlicher Lage der Querschnittsverengung. Dargestellt ist die Hälfte der symmetrischen Vierfachform.



**Bild 12:** Variation der Schusskurve und Haupteffektediagramme für den Einfluss des Umschaltzeitpunkts der Schusskurve und der Lage der Querschnittsverengung im Lauf auf die gleichmäßige Füllung der Formnester.



**Bild 13:** Ergebnisse des Versuchsplans für die Auslegung der Wärmebehandlung. Maximale Verformung im Strukturteil für unterschiedliche Temperaturen und Wärmebehandlungszeiten während des Lösungsglühens.

bzw. vom Gießkolben (Bild 10). Geometrisch wird das parametrisierte Laufsystem in diesem Beispiel dadurch verändert, dass die Position der Verengung zwischen dem erstem und zweiten Laufabschnitt über der Länge des Laufes verschoben wird.

Die Position der Querschnittsverengung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Füllverhalten der vier Kavitäten. Insbesondere kann durch diesen Parameter beeinflusst werden, ob die Formnester

gleichmäßig gefüllt werden, was eine wichtige Voraussetzung für eine reproduzierbare und durchgehend hohe Produktqualität ist.

Bild 11 zeigt die lokalen Füllzeiten für zwei unterschiedliche Varianten der Querschnittsverengung. Die Variante links hat deutlich unterschiedliche lokale Füllzeiten in den Kavitäten. Die klar bessere Variante rechts führt hingegen zu nahezu identischem Füllverhalten.

Um sowohl den Einfluss der geomet-

rischen Variation als auch die Gießkolbenbeschleunigung in der Schusskurve auf das Gießergebnis zu untersuchen, wurden gleichzeitig die Querschnittsverengung und der Umschaltzeitpunkt variiert. Es wurde ein virtueller Versuchsplan mit 98 Kombinationen zwischen den möglichen Extrempositionen automatisch generiert, berechnet und ausgewertet.

In Bild 12 ist oben der Geschwindigkeitsverlauf des Gießkolbens über dem Kolbenweg dargestellt. Der Beginn der Beschleunigungsphase liegt immer im Bereich zwischen der vertikalen grünen und blauen Linie. Die darunter dargestellten sogenannten Haupteffektediagramme zeigen den Einfluss des Beschleunigungszeitpunktes (oben) und der Querschnittsverengung (unten) auf die Gleichmäßigkeit der Formfüllung für alle Gießnester. Dieses Qualitätskriterium wird aus der Differenz der lokalen Füllzeiten berechnet. Je kleiner dieser Wert ist, umso ähnlicher ist das Füllverhalten der Kavitäten. Jeder Punkt in einem Haupteffektediagramm entspricht dem Mittelwert aller Messungen in den virtuellen Versuchen für einen bestimmten Beschleunigungszeitpunkt oder eine Querschnittsposition. Die Steigung der Linienverläufe ist ein Maß für die Signifikanz des jeweiligen Prozessparameters.

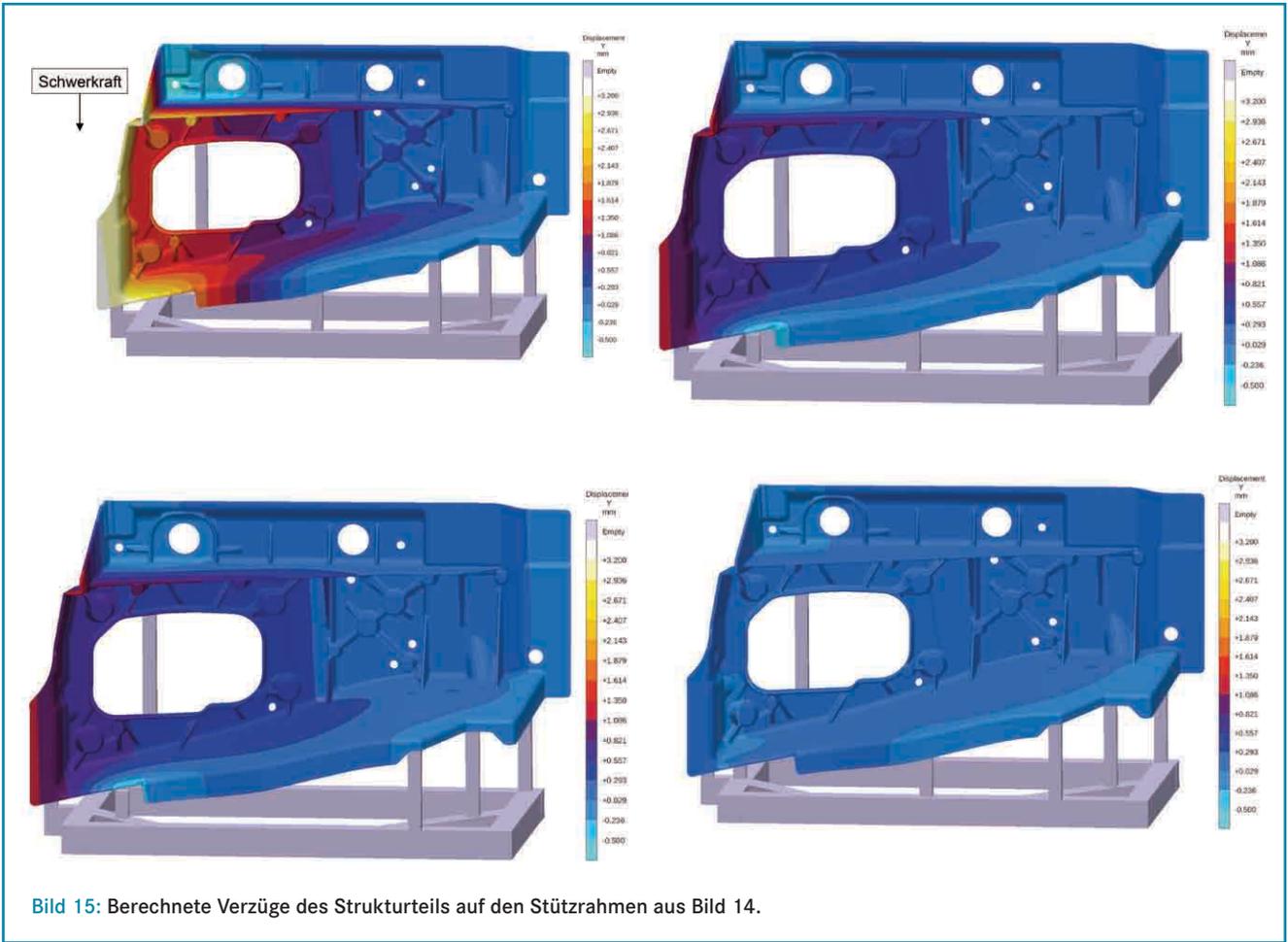
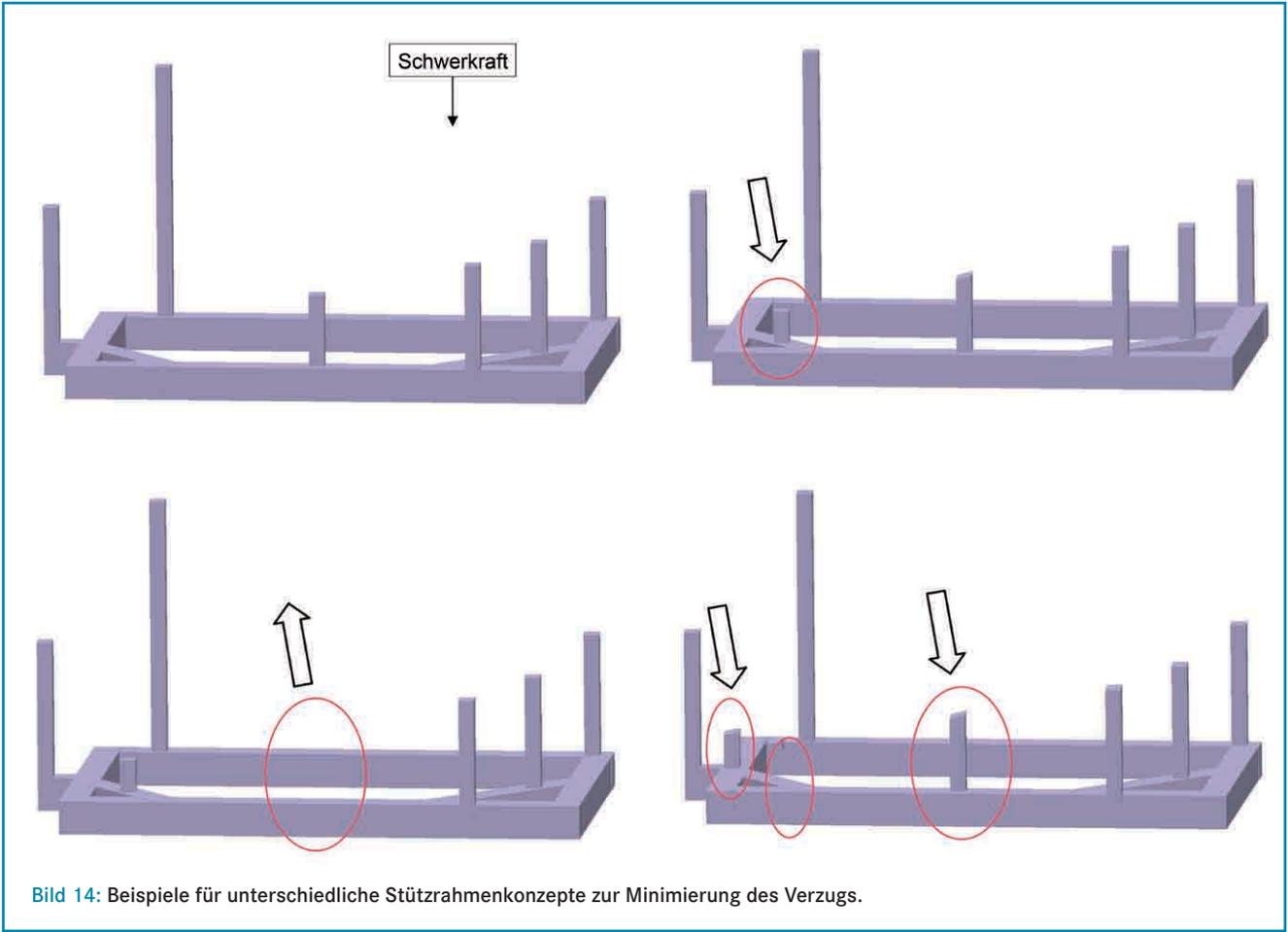
Die Auswertung zeigt, dass ein späterer Beginn der Beschleunigungsphase zu einer zunehmend ungleichmäßigeren Formfüllung in den vier Kavitäten führt. Der Einfluss der geometrischen Variation ist demgegenüber vergleichsweise schwach: Je höher die Querschnittsverengung liegt, umso gleichmäßiger ist die Formfüllung.

Das Beispiel zeigt, dass die Veränderung eines Fertigungsparameters stets Auswirkungen auf andere Prozessrandbedingungen oder konstruktive Entscheidungen für die Gussteil- oder Werkzeugauslegung hat.

### Optimierte Auslegung von Stützrahmen für die Wärmebehandlung von Strukturteilen

Die Gießprozess-Simulation erlaubt die Vorhersage von Eigenspannungen und Verzug für den gesamten Fertigungsprozess von Gussteilen inkl. der Wärmebehandlung. An einem Strukturteil wird aufgezeigt, dass virtuelles Experimentieren auch für die Auslegung der Wärmebehandlung genutzt werden kann. Zielsetzung ist, das Teil möglichst verzugsarm zu fertigen [4].

Das Lösungsglühen ist der erste Schritt der T6/T7 Wärmebehandlung von



Aluminiumbauteilen. Durch die geringen Festigkeiten nahe der Solidustemperatur und durch Einfluss der Schwerkraft besteht die Gefahr, dass sich dünnwandige Strukturteile nachhaltig plastisch verformen. **Bild 13** zeigt in einem virtuellen Versuchsplan die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Wärmebehandlungstemperaturen und -zeiten und dem berechneten Verzug des Teils auf. Minimale Verzüge werden für das Lösungsglühen bei 485 °C und 2 h vorausgesagt.

Das Strukturteil liegt dabei während der Wärmebehandlung auf einem Stützrahmen auf. Die geeignete Positionierung der Auflagepunkte ist von großer Bedeutung für die Formstabilität des Teiles. Daher sollte auf Basis der optimierten Wärmebehandlungsparameter der Verzug des Teiles durch eine Optimierung der Stützpositionen des Gestells weiter reduziert werden. Dafür wurden in einem virtuellen Versuchsplan unterschiedliche Alternativen für die Position der Stützstellen vorgegeben (**Bild 14**). **Bild 15** zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. Der Verzug in Schwerkraftrichtung im linken vorderen Bereich des Gussteiles beträgt bei Nutzung des ersten Stützrahmens (**Bild 15** oben links) 3,2 mm. Durch Hinzufügen einer weiteren Stützstelle ergibt sich bereits eine signifikante Verbesserung (**Bild 15** oben rechts). Die dritte Variante zeigt den Effekt der Wegnahme einer der beiden vorderen Stützen. Dies hat nur geringen Effekt auf den Verzug des Teiles (**Bild 15** unten links). Unter den gezeigten Varianten führt das Verschieben einer Stütze hier zum besten Ergebnis mit dem geringsten Verzug von unter 0,5 mm (**Bild 15** unten rechts).

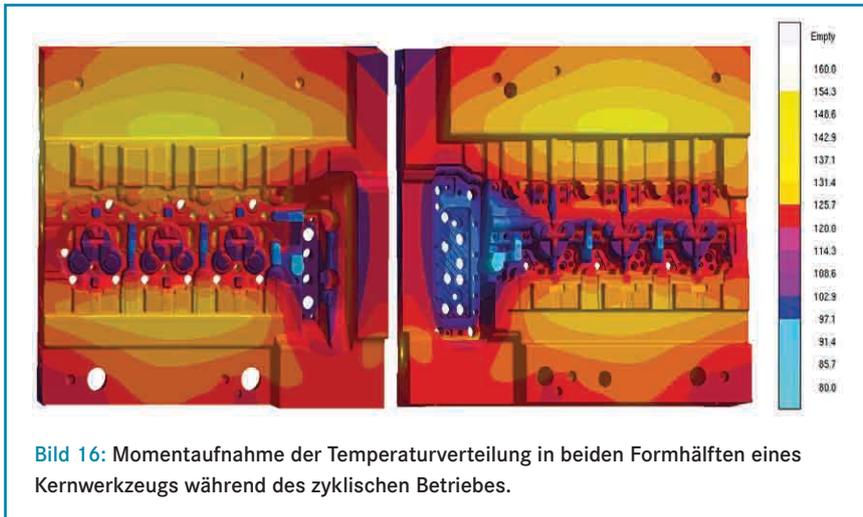
### Zielgerichtete Auslegung der Temperierung von Werkzeugen für die Kernfertigung

Werkzeugstandzeiten werden durch den Wärmehaushalt und die lokale thermische Einwirkung stark beeinflusst. Dies gilt auch für die Werkzeuge zur Fertigung anorganischer Sandkerne. Der Prozessablauf lässt sich durch die Simulation des Kernschießens, der Aushärtung und des thermischen Haushaltes der Werkzeuge vollständig erfassen.

**Bild 16** zeigt Temperaturen in beiden Hälften eines Kernwerkzeugs während des zyklischen Betriebes. In den dickwandigen Bereichen verbleiben sehr niedrige Temperaturen. Die damit verbundenen zyklischen Spannungen wirken sich negativ auf die Werkzeugstandzeit aus. Eine gleichmäßigere Temperaturverteilung kann durch eine gezielte Temperierung erreicht werden, die aus mehreren Heizelementen besteht. Jedes Heizelement beeinflusst die lokale Temperaturverteilung im Werkzeug während der zyklischen Fertigung individuell. Der Einfluss der einzelnen Heizelemente auf die Temperaturverteilung lässt sich nur durch eine aufwendige Reihe von realen Messungen herausarbeiten. Virtuelle Experimente sind daher das ideale Mittel, um bei einer Vielzahl möglicher Kombinationen der Heizparameter die individuelle Einflussnahme auf die Temperaturen während der Kernfertigung quantitativ zu ermitteln. Der Effekt der einzelnen Heizelemente kann einfach aus dem Haupteffektdiagramm abgelesen werden (**Bild 17**). In diesem Beispiel hat der Heizer Nr. 6 den stärksten Einfluss auf das betrachtete Thermoelement. Die entsprechende Linie ist sehr steil. Der Heizer Nr. 3 nimmt hingegen gar keinen Einfluss. Dies zeigt sich in der horizontalen Linie im Haupteffektdiagramm.

### Zusammenfassung

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass mit der umfassenden Integration der Möglichkeiten zum virtuellen Experimentieren und automatischen Optimieren in MAGMA<sup>5</sup> die Einstellung von robusten Prozessen und optimierten Lösungen für Gießtechnik



**Bild 16:** Momentaufnahme der Temperaturverteilung in beiden Formhälften eines Kernwerkzeugs während des zyklischen Betriebes.

und Fertigungsbedingungen bereits vor dem ersten Abguss möglich wird. Die Software sucht die bestmöglichen Bedingungen für Fertigungsparameter, für die Laufdimensionierung und Anschnittpositionen, aber auch für die Lage und Größe von Speisern und Kühlkokillen. Damit kann der Gießer die Simulationen als Versuchsfeld nutzen, um gleichzeitig unterschiedliche Qualitäts- und Kostenziele zu verfolgen.

Für diese neue Methodik wurden umfangreiche Möglichkeiten zur automatischen Variation von Geometrien durch parametrisches Konstruieren geschaffen und statistische Werkzeuge zur Versuchsplanung und genetische Algorithmen zur Prozessoptimierung in MAGMA<sup>5</sup> integriert. Die gemeinsame Auswertung der

Informationen aus den virtuellen Experimenten ermöglicht einen einfachen und schnellen quantitativen Vergleich zahlreicher Simulationsergebnisse. Damit werden Zusammenhänge zwischen Design- und Prozessvariablen, Qualitätskriterien und Zielvorgaben zusammengefasst und klar visualisiert.

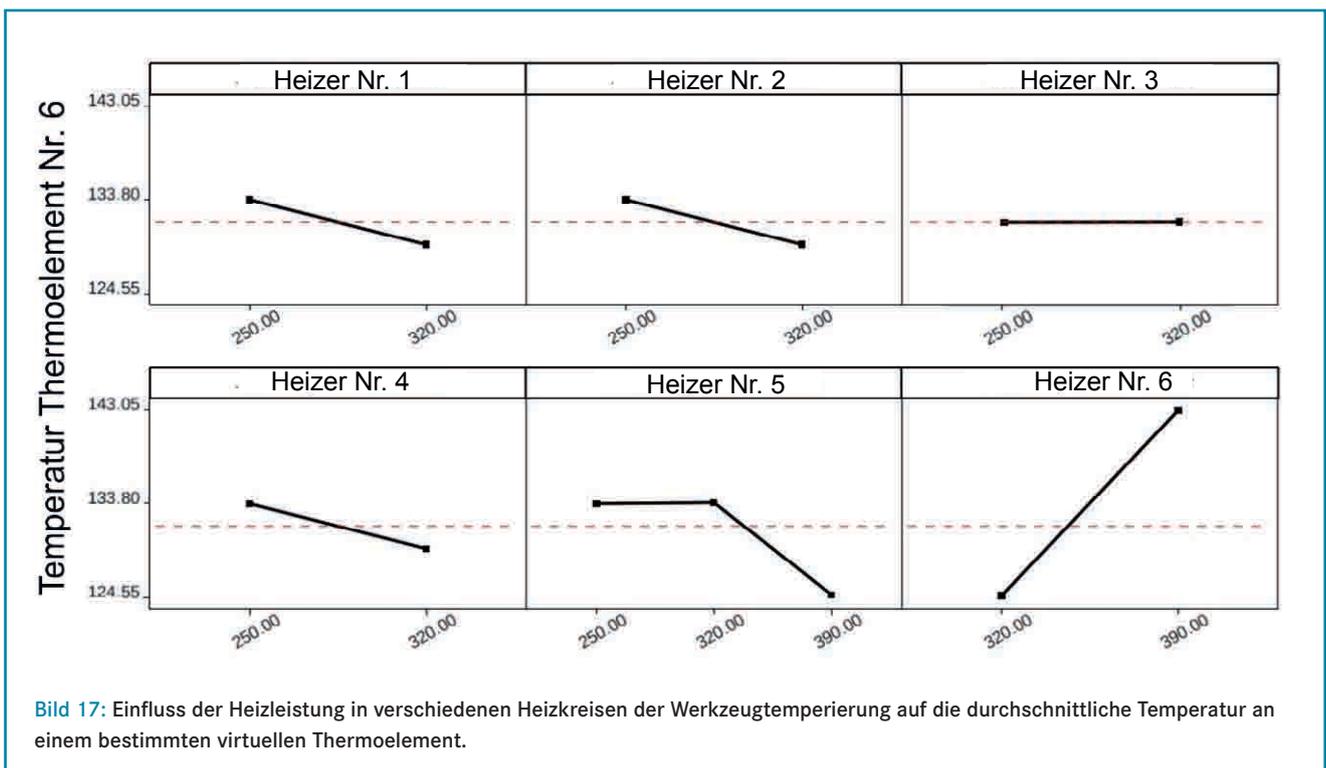
Unabhängig davon, ob in Zukunft ein einzelnes Projekt simuliert, ein virtueller Versuchsplan oder eine umfassende Optimierung durchgeführt wird: 30 Jahre nach der Einführung der Gießprozess-Simulation bieten diese leistungsfähigen Werkzeuge dem Fachmann eine ganz neue Methodik zur Verbesserung des Prozessverständnisses, zur Einstellung von robusten Fertigungsbedingungen und optimier-

ten gießtechnischen Lösungen für eine wirtschaftliche Gussteilkonstruktion und Fertigung.

**Literatur:**

- [1] Hahn, I., Sturm, J.C.: *Versuchspläne in der gießtechnischen Simulation*, GIESSE-REI 96 (2009), Nr. 7
- [2] Bramann, H., Pavlak, L.: *Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozess-Simulation*. GIESSE-REI 102 (2015), Nr. 2
- [3] Dieckhues, G., Gummersbach, T., Schmidt, D.: *Feeder Design for an Aluminium Sand Casting*, Vortrag auf dem Internationalen MAGMA User Meeting, Potsdam, Oktober 2014
- [4] Gaspers, H.J., Thorborg, J.: *Design Optimization of Heat Treatment Support Frames for Aluminium Alloy Structural Cast Parts using Virtual Experimentation*, European Conference on Heat Treatment (2015), Venice, 20.-22.05.2015

Dr.-Ing. Ingo Hahn und Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen



**Bild 17:** Einfluss der Heizleistung in verschiedenen Heizkreisen der Werkzeugtemperierung auf die durchschnittliche Temperatur an einem bestimmten virtuellen Thermolement.