

Aus Eins mach Zwei

Sichere Übertragung einer bewährten Füllcharakteristik von einem Einfach- auf ein Zweifachdruckgießwerkzeug

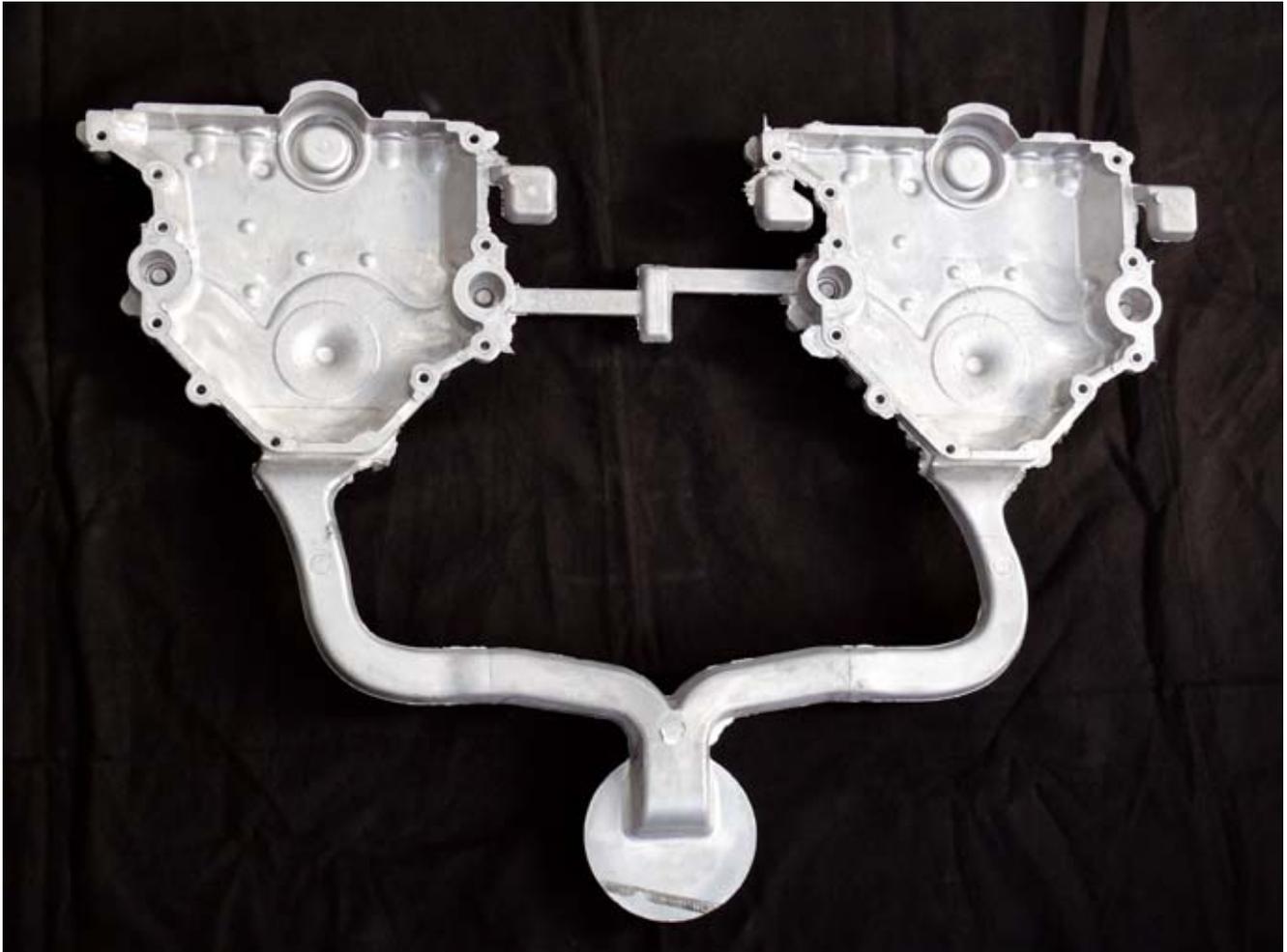


FOTO: MAGMA

VON RUDOLF SEEFELDT UND JÖRG C. STURM, AACHEN, SOWIE ALEXANDER PAWLOWSKI, KÖLN

Die Anforderungen an die Produktivität und Robustheit des Fertigungsablaufes für qualitativ hochwertige Druckgussteile steigen ständig. Gleichzeitig erfordern die wirtschaftlichen Zwänge eine treffsichere Planung von Formkonzept und Fertigungsprozess. Grundlagen für die Zuverlässigkeit der Planungen sind heute Erfahrungen aus bereits durchgeführten Projekten wie auch die Modellierung des Fertigungsablaufes auf der Grundlage der physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Dabei wird die Übertragbarkeit von Erfahrungen auf neue Projekte mit zunehmender Kom-

plexität der Druckgussbauteile immer schwieriger und damit fragwürdiger.

Ein neuartiger Ansatz auf der Basis der autonomen rechnerischen Optimierung erlaubt es, Erfahrungen, die bei einem bereits bestehenden Gießprozess mit guter Gussteilqualität gewonnen wurden, virtuell nachzubilden und als Optimierungsziel für die Auslegung neuer Formen zu nutzen. Hierbei wird die Gießprozesssimulation eingesetzt, um ein virtuelles Versuchsprogramm für die Werkzeugauslegung durchzuführen. Das Programm lernt autonom, also selbstständig, durch „trial and error“ und sucht nach den besten Konzepten für Gießlauf- und Schnittgestaltung oder Gießbedingungen, um die erfolgreiche Praxis der Vorläuferprojekte auf das neue Gussteil zu adaptieren.

Wirtschaftliche Potentiale des Druckgießens

Die oben beschriebene Methode soll am Beispiel eines Übergangs von einem bereits in Produktion befindlichen Einfach- auf ein Zweifachwerkzeug für einen Stirndeckel verdeutlicht werden. Hierbei soll die bewährte Füllcharakteristik des Einfachwerkzeuges beim Zweifachwerkzeug eingestellt werden. Das Beispiel besitzt eine besondere Bedeutung für die Praxis, weil sich gerade beim Übergang vom Einfachwerkzeug auf ein Zweifachwerkzeug substantielle nachhaltige Kosteneinsparungen erzielen lassen. Klassische Maßnahmen zur Prozessoptimierung des Einfachwerkzeuges führten bei Weitem nicht zu vergleichbaren Produktivitätssprüngen.

Ein bereits mit der neuartigen Optimierungsmethode durchgeführtes Pilotprojekt weist das enorme Einsparungspotential aus. So können beim Einsatz eines Zweifachwerkzeuges gegenüber einem Einfachwerkzeug, bezogen auf die einzelnen Kostenarten, Einsparungen zwischen 20 und 40 % erzielt werden (Bild 1).

Bezieht man die Einsparungen auf ein Gussteil, dann lassen sich die höchsten Einsparungspotentiale bei der Wartungsumlage erzielen. Es folgen die Einsparung an Energie zum Betreiben der Anlage und die Verbrauchsreduzierung von Verschleißteilen, wie Gießkammer und -kolben (Bild 2). Gleichzeitig steigt mit der Erhöhung der Zahl der Gussteile pro Abguss das Fertigungsrisiko erheblich. Daher muss eine hohe Prozesssicherheit für die einzelne Druckgusszelle (Maschine, Entgratpresse, Roboter und Ofen) gewährleistet sein. Die Umstellung von Einfach- auf Mehrfachwerkzeuge zwingt zu einer geänderten Gießlaufgestaltung, die häufig zu Qualitätsunterschieden bei den Gussteilen eines Abgusses führt. Dieses Qualitätsproblem tritt insbesondere bei unsymmetrischen Gussteilen auf, bei denen die Formnester im Werkzeug mit gleicher Orientierung eingeformt sind und jeweils über einen separaten Zulauf gefüllt werden. Dieses Risiko lässt sich mit der im Folgenden vorgestellten Methodik auf der Basis der autonomen rechnerischen Optimierung reduzieren.

Autonome rechnerische Optimierung

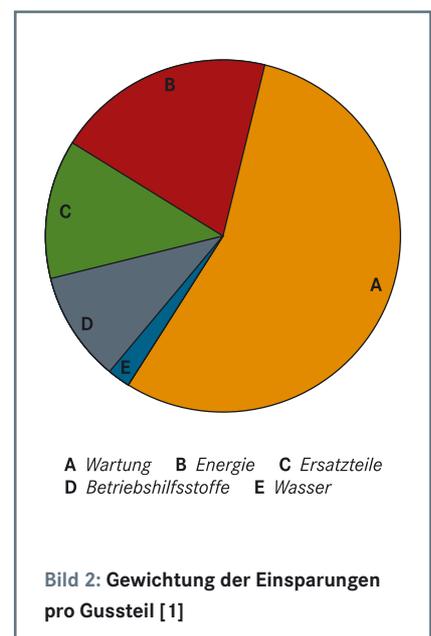
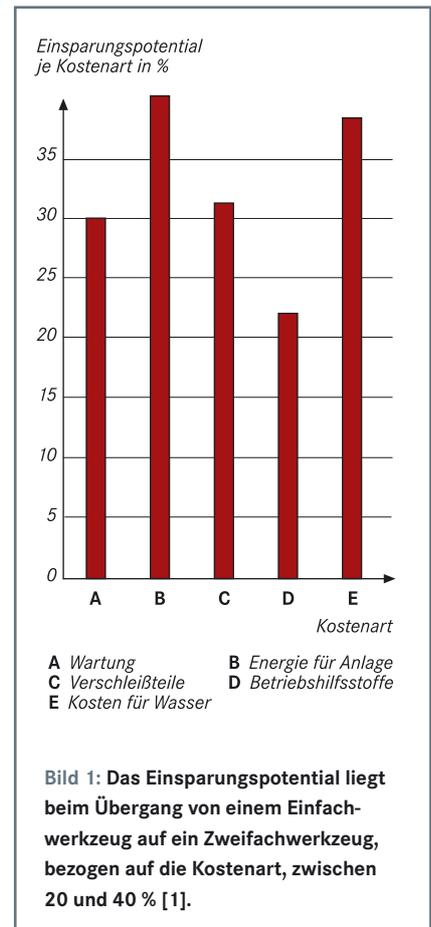
Die autonome rechnerische Optimierung mit dem Programm MAGMAfrontier bietet einen neuartigen Zugang zur Lösung schwieriger fertigungstechnischer Fragestellungen. Magmasoft-Simulationsrechnungen mit variierenden Prozess- und Designbedingungen werden als Experimentierfeld genutzt. Die Optimierung läuft selbstständig, also autonom ohne weiteren Eingriff von außen, ab. Dabei können mehrere Optimierungsziele (z. B. Gussteilqualität, Produktivität, Materialverbrauch) gleichzeitig verfolgt werden. Um die gewünschten Optimierungsziele positiv zu beeinflussen, sind sowohl Fertigungsgrößen (z. B. Gießbedingungen, Werkstoffe, Formtemperierung) als auch Geometrien

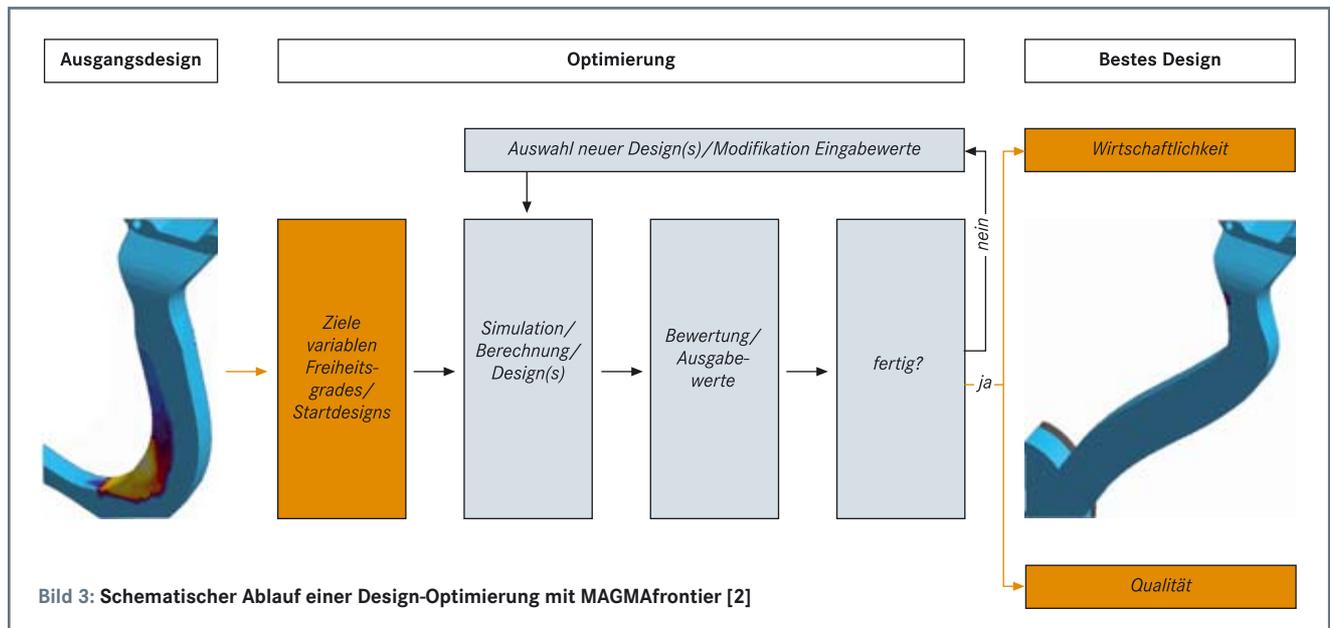
(z. B. Gießlaufdesign, Anschnittdimensionierung, Lage und Dimension der Kühlkanäle) variierbar. Dabei können Fertigungsrestriktionen (z. B. Zykluszeiten, Sprühbedingungen, Formkonzept) berücksichtigt werden.

Bild 3 zeigt den schematischen Ablauf einer Design-Optimierung mit MAGMAfrontier. Die Grundlage bildet eine Startsequenz von unterschiedlichen Designs auf der Basis der statistischen Versuchsplanung. Im Folgenden werden für eine vorgegebene Anzahl von Generationen, jeweils mit einer bestimmten Anzahl von Designs, gießtechnische Simulationen durchgeführt. Im Anschluss an jede Simulation werden die Ergebnisse ausgewertet und abhängig vom erzielten Resultat neue Designs nach genetischen Prinzipien festgelegt [2]. Nach einer hinreichenden Anzahl von Optimierungen werden in der Regel gute Kompromisse für die jeweiligen Einzelziele gefunden [3]. Die Praxis zeigt, dass Geometrieänderungen häufig den größten Einfluss auf die angestrebten Optimierungsziele haben.

Die wichtigste Aufgabenstellung für die erfolgreiche Definition eines Optimierungsproblems ist die Festlegung der Qualitätskriterien für das angestrebte Optimierungsziel. Allein für die Auslegung eines Gießlaufs kann der Praktiker aus dem Stand eine Vielzahl von Optimierungszielen nennen, die er meist gleichzeitig anstrebt:

- > Übertragung der Füllcharakteristik eines erfolgreich im Einsatz befindlichen Einfachwerkzeuges auf ein Mehrfachwerkzeug;
- > Einstellung eines gleichartigen und gleichzeitigen Füllens der Formnester bei Mehrfachwerkzeugen, abhängig von ihrer Position, dem Zulaufsystem und den Gießparametern;
- > Vermeiden von Ablösungen der Schmelze im Gießlauf wie auch von Gaseinschlüssen im Gussteil;
- > Optimierung der Laufquerschnitte hinsichtlich einer wirkungsvollen Nachspeisung;
- > Minimierung des Laufvolumens zur Reduzierung des Kreislaufmaterials;
- > Vermeiden von Kaltlauf im Gussteil;





> Auslegen von Temperiersystemen zur Reduzierung der Erstarrungszeit des Laufs oder zur Verkürzung von Zykluszeiten.

Der Alltag zeigt, dass die Werkzeugauslegung viele dieser Zielsetzungen zwar qualitativ berücksichtigt, der Praktiker sich aber in der weiteren Optimierung auf wenige primäre Ziele konzentrieren muss. Daher endet diese Art der Optimierung häufig dann, wenn die primären Fragestellungen befriedigend gelöst wurden. Die Lösung noch bestehender Nachteile in den anderen Zielen wird entweder über Prozessoptimierungen im Betrieb weiterver-

folgt oder aber auf eine Nachfolgeform verschoben.

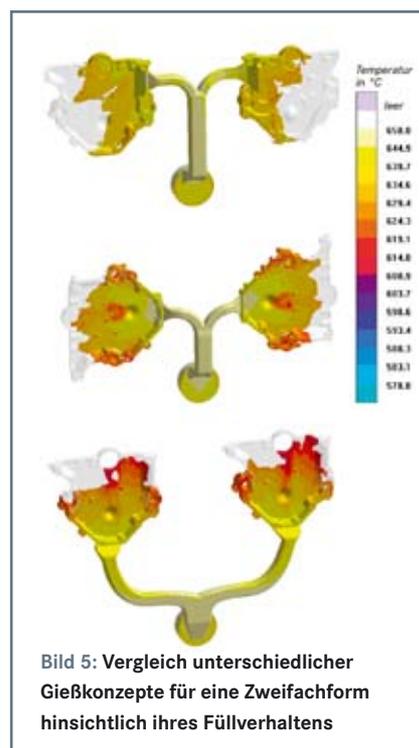
Die gießtechnische Optimierung unterstützt diese Vorgehensweise und hat das Potential, viele dieser Ziele, die häufig im Konflikt miteinander stehen, gleichzeitig systematisch zu verfolgen und zu berücksichtigen. Der entscheidende Vorteil dieser Vorgehensweise ist die quantitative Information über den Einfluss der variierten Fertigungsbedingungen, die auch zu Sensitivitätsstudien genutzt werden können. Der Fachmann lernt also aus den optimierten Ergebnissen über den „Tellerrand“ des aktuellen Bauteils hinaus. Dies soll im Folgenden dargestellt werden.

Übertragung der Füllcharakteristik des Einfachwerkzeuges auf das Zweifachwerkzeug

Die Fertigungspraxis des Stirndeckels mit dem Einfachwerkzeug hatte gezeigt, dass die Qualität des Gussteils im Wesentlichen von der Gestaltung des Gießlauf- und Anschnittsystems abhängt. Das hohe Qualitätsniveau des in der Produktion befindlichen Einfachwerkzeuges wurde durch die Erfahrung der Praktiker nach mehreren Änderungen mit einem leicht schräg gestellten Zulauf und einem speziell gestalteten Anschnitt erreicht (Bild 4). Für die Konzeption des geplanten Zweifachwerkzeuges war es daher wünschenswert, die Füllcharakteristik des Einzelwerkzeuges für beide Formnester wieder annähernd vergleichbar einzustellen.

Die Umstellung vom Einfach- auf das Zweifachwerkzeug zwingt allerdings zu einer geänderten Zulaufgestaltung. Eine Studie zu verschiedenen Gussteilanordnungen und unterschiedlich gestalteten Zuläufen (Bild 5) zeigt, dass sich die Füllbilder aller Formnester aufgrund der verschiedenen Fließwege der Schmelze bzw. der Ausrichtung des Gießstahles beim Durchtritt durch den Anschnitt unterscheiden. Jedes Formnest weist so eine eigene Füllcharakteristik auf. Das Füllen der einzelnen Nester entspricht nicht mehr der des Einfachwerkzeuges.

Für das Erzielen einer gleichen Gussteilqualität ist jedoch ein gleichartiges Füllen in den beiden Nestern zwingende Voraussetzung, sie sollte der des erfolgreichen Einzelwerkzeuges entsprechen. Für den Stirndeckel sollte deshalb die autonome Optimierung genutzt werden, um ein Gießsystem zu konstruieren, das die beim Einfachwerkzeug vorliegende Füllcharakteristik auf das Zweifachwerkzeug über-



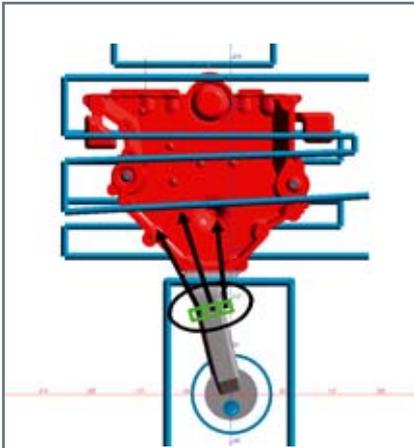


Bild 6: Ermittlung von charakteristischen Merkmalen für das Füllverhalten des Gussteils am Einfachwerkzeug für drei Auswertebereiche (grün)

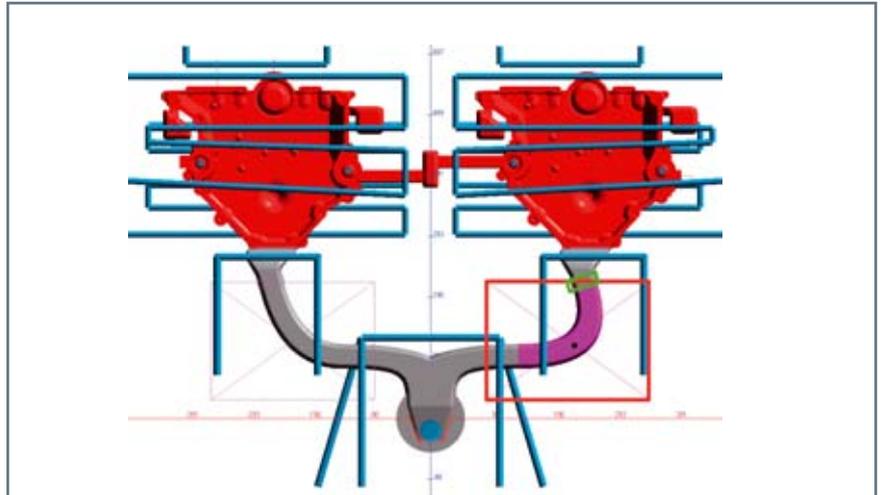


Bild 7: Geometrie der Zweifachform mit parametrisiertem Laufabschnitt (violett), Auswertebereich zur Feststellung von Ablösungen der Schmelze (rot) und Auswertebereiche zur Analyse der Geschwindigkeiten und Richtungen der Schmelze (grün)

trägt. Dazu wurde zunächst das Füllverhalten des Einfachwerkzeugs erfasst, indem der aktuelle Prozess in der Produktion genau analysiert und anschließend im Simulationsprogramm nachgebildet wurde.

Zur Charakterisierung des Formfüllens wurden im Berechnungsmodell am Ende des Laufs (Bild 6) an drei nebeneinander

liegenden Auswertebereichen (grüne Markierung) Informationen zu Geschwindigkeit und Richtung der Schmelze ermittelt und bewertet. Diese Größen dienen später an den gleichen Stellen als Qualitätskriterium für die autonome rechnerische Optimierung der Geometrie des Gießlaufes für das Zweifachwerkzeug. Mathematisch aus-

gedrückt war es also das Ziel, die Abweichungen der im Einfachwerkzeug ermittelten Größen von denen des Zweifachwerkzeugs zu minimieren.

Im Zweifachwerkzeug wurden die beiden Formnester nebeneinander in der gleichen Lage wie im Einfachwerkzeug platziert. Bild 7 zeigt den parametrisierten

Laufabschnitt eines der Gießläufe (violett hervorgehoben). Oberhalb des Laufabschnitts erkennt man den speziell gestalteten Anschnitt und ein kurzes Stück des angrenzenden Zulaufs, das bei beiden Formnestern unverändert vom Zulauf des Einfachwerkzeuges übernommen wird. Daraus ergeben sich zwangsläufig eine unterschiedliche Gestalt der Läufe zur Gießkammer und ein unterschiedliches Füllbild. In einem Auswertebereich (rot dargestellt) wird die jeweilige Geometrie des Laufs auf Ablösungen der Schmelze untersucht. Grün dargestellt sind die Auswertebereiche, an denen die Geschwindigkeiten und Richtungen analysiert werden.

Zur Beeinflussung des Formfüllens wird der Lauf zwischen der Verteilung nach der Gießkammer und dem Anschnittsegment parametrisch modelliert. Seine Gestalt kann mit zwei unabhängigen und zwei abhängigen Parametern in weiten Bereichen durch das Optimierungsprogramm modifiziert werden (Bild 8).

Die autonome rechnerische Optimierung erfordert eine größere Anzahl von einzelnen Rechenläufen, damit der Optimierungsalgorithmus durch statistische Methoden neue Sätze von Designvariablen (also hier Laufgeometrien) generieren kann. Zur Verkürzung der Berechnungszeiten sollten die Modelle nur so groß wie für eine zuverlässige Simulation erforderlich gehalten werden. Für den Stirndeckel bietet es sich deshalb an, das Projekt in zwei Einzelmodelle zu zerlegen. Sie dienen zur separaten Optimierung des rechten bzw. linken Zulaufs. Darüber hinaus wird nur der anschnittnahe Teil des Gussteiles in der Simulation berücksichtigt. Dies reicht hier zum Übertragen der

charakteristischen Merkmale des Formfüllens aus.

Mit beiden Teilmodellen wird je eine Optimierung durchgeführt. Dabei werden die am Einzelwerkzeug ermittelten Werte für die Geschwindigkeit der Schmelze und ihre Richtung als Optimierungsziel vorgegeben. Zusätzlich wurde ein weiteres Qualitätskriterium genutzt, mit dem Ablösungen der Schmelze bzw. Rückströmungen im Lauf erkannt werden. Hierfür steht in dem Simulationsprogramm ein spezielles Kriterium zur Bestimmung von Bereichen eingeschlossener Luft zur Verfügung. Ziel der Optimierung war es, die Bereiche, in denen das Kriterium eingeschlossene Luft aufzeigt, durch Geometrieänderungen des Laufs zu minimieren (Bild 9) [4, 5].

Die Ergebnisse der autonomen Optimierungsläufe können mit unterschiedlichen Auswertewerkzeugen bewertet werden. Das so genannte Pareto Set zeigt die Berechnungen an, die von keiner anderen der berechneten Variationen in allen Optimierungszielen übertroffen werden. Diese Designs bilden demnach den besten Kompromiss in Bezug auf die Erfüllung aller Optimierungsziele. Die graphische Auswertung zeigt die Lage der verschiedenen Designs in Bezug auf die unterschiedlichen Optimierungsziele (Bild 10). Sie kann genutzt werden, um die für die jeweilige Situation beste Lösung unter den guten Designs zu finden.

Für den rechten Lauf wurden 106 verschiedene Alternativen in ca. 39 h und für den linken 97 Variationen in ca. 36 h berechnet. Beim rechten Lauf wurden 19 gute Kompromisse gefunden sowie ein Laufdesign, das alle Optimierungsziele in gleicher Weise gut erfüllt. Beim linken

Lauf wurden 14 gute Kompromisse und zwei Designs ermittelt, bei denen die Optimierungsziele in gleicher Weise gut erfüllt werden. Alle Simulationen wurden auf einer handelsüblichen Zweiprozessor-Workstation durchgeführt.

Das Kompletmodell des Stirndeckels ergibt sich aus den beiden ausgewählten Laufdesigns aus den Optimierungsläufen der Teilsysteme. Die abschließende Simulation des vollständigen Modells dient zur Verifikation der Optimierungsergebnisse, weil bei sehr starken geometrischen Unterschieden der Läufe Wechselwirkungen auftreten können. Ziel war es, die Zulässigkeit der Vorgehensweise der getrennten Optimierung der beiden Laufabschnitte zu bestätigen.

Die Simulation des Komplettsystems zeigt in beiden Nestern ein vergleichbares Füllmuster des Einfachwerkzeuges (Bild 11). Deutlich wird die Asymmetrie in der Laufgestaltung, die sich ausschließlich aus den Optimierungsrechnungen ergeben hat.

Das Zulaufsystem wurde in der Praxis realisiert (Bild 12). Das Gussteil wurde von Anfang an mit der sehr guten Qualität des Einfachwerkzeuges aus dem Zweifachwerkzeug gegossen.

Erfahrungen aus der Praxis

Die hier beschriebene Methodik beim Übergang von einem Einfach- zu einem Zweifachwerkzeug wurde erfolgreich im Druckgusswerk der Ford-Werke GmbH, Köln, eingesetzt. Bereits in einem Pilotprojekt wurde mit Hilfe der autonomen rechnerischen Optimierung auf Antrieb eine praxisgerechte Werkzeugauslegung, verbunden mit deutlichen Kosteneinsparungen, erreicht. Der zeitliche Aufwand für die gesamte Optimie-

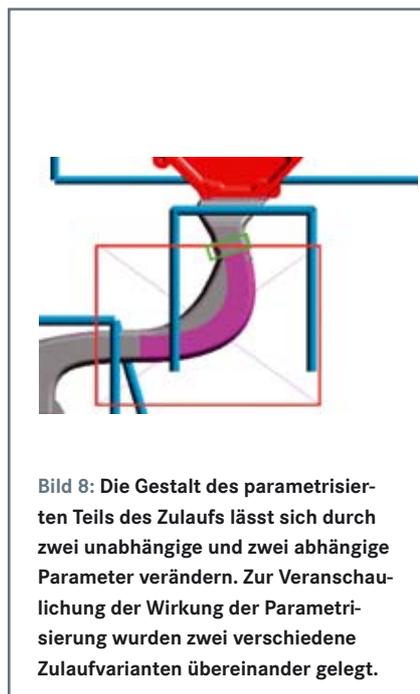


Bild 8: Die Gestalt des parametrisierten Teils des Zulaufs lässt sich durch zwei unabhängige und zwei abhängige Parameter verändern. Zur Veranschaulichung der Wirkung der Parametrisierung wurden zwei verschiedene Zulaufvarianten übereinander gelegt.

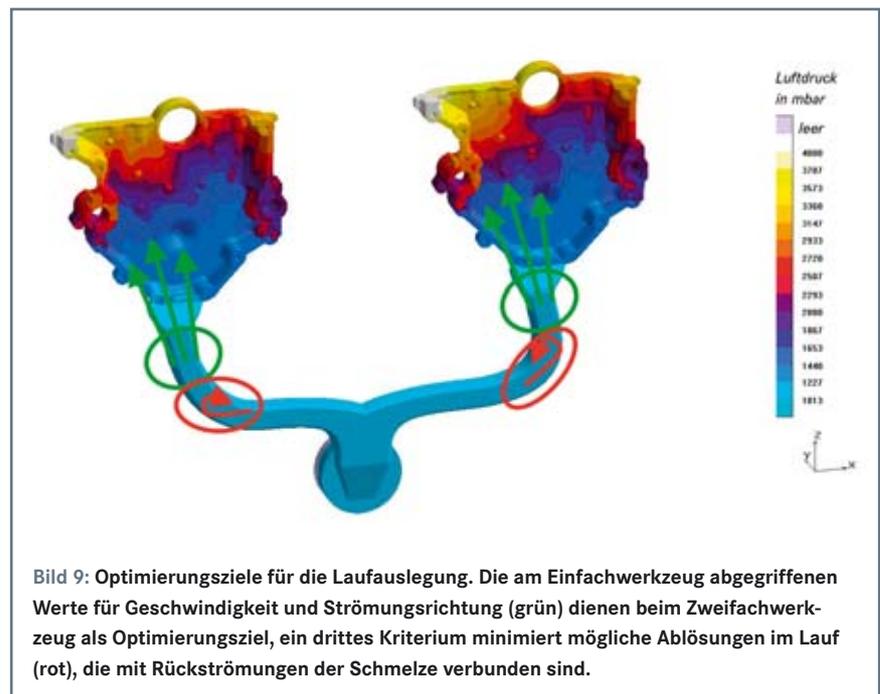


Bild 9: Optimierungsziele für die Laufauslegung. Die am Einfachwerkzeug abgegriffenen Werte für Geschwindigkeit und Strömungsrichtung (grün) dienen beim Zweifachwerkzeug als Optimierungsziel, ein drittes Kriterium minimiert mögliche Ablösungen im Lauf (rot), die mit Rückströmungen der Schmelze verbunden sind.

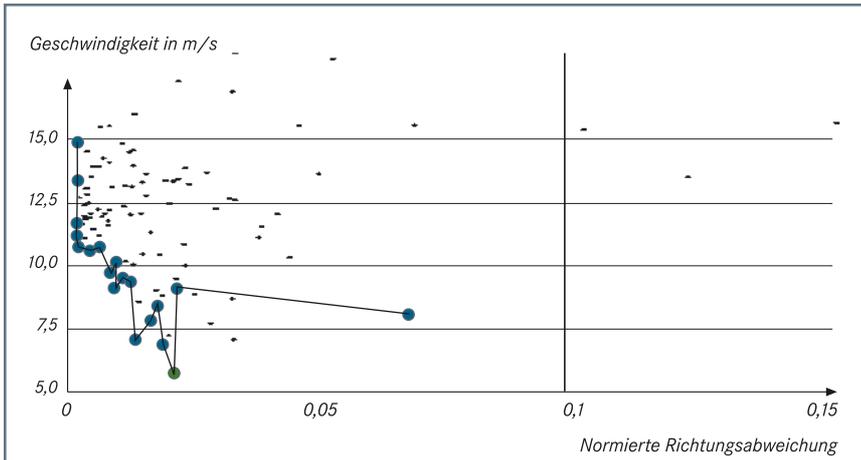


Bild 10: Auswertung der Gießlaufoptimierung – Darstellung der Ergebnisse für zwei Optimierungsziele für die Optimierung des rechten Laufs. Das Pareto Set (blaue Punkte) liegt am linken bzw. unteren Rand, weil bei beiden Optimierungszielen ein Minimum angestrebt wird. Beim grün hinterlegten Design werden alle Optimierungsziele in gleicher Weise gut erfüllt.

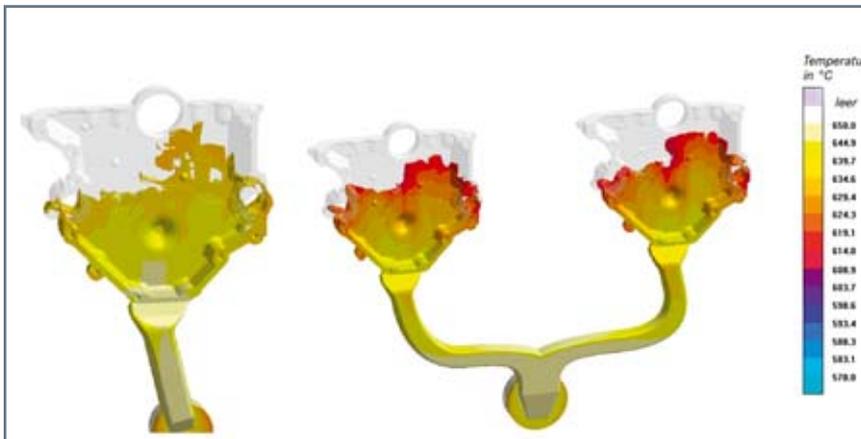


Bild 11: Die im Zweifachwerkzeug realisierte Geometrie des Laufsystems führt zu einem Füllbild, das nahezu dem des Einfachwerkzeugs entspricht.

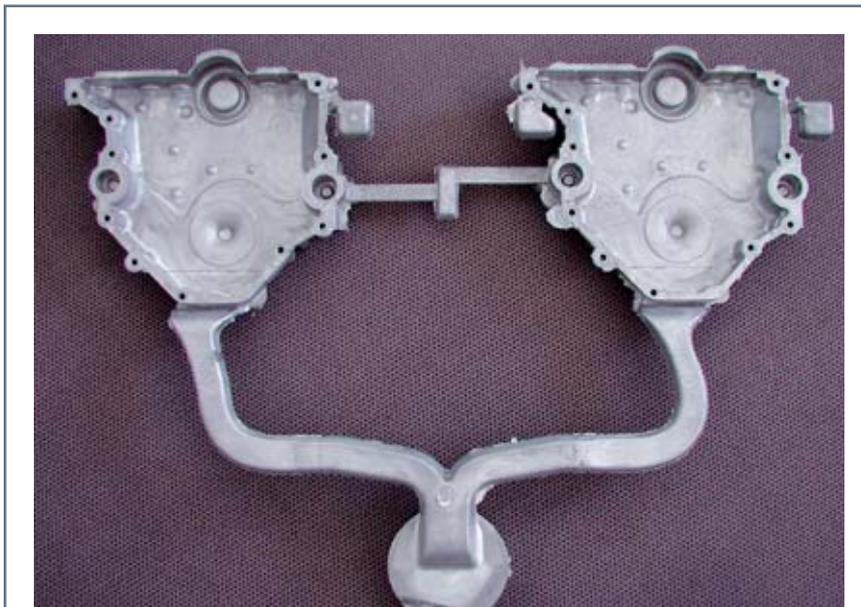


Bild 12: Realisierung des optimierten Gießlaufes für das Zweifachwerkzeug – die im Rechenmodell ermittelten Gießläufe wurden in das Werkzeug übertragen.

Die Fertigung betrug insgesamt etwa zwei Wochen. Er liegt damit deutlich unter dem Zeitaufwand für jede Art von Änderungen oder Gießversuchen, wie sie heute Stand der Technik sind. Aufwändige iterative Feinabstimmungen der Anschnitt- und Zulaufgeometrie mussten auf Grund präziser Simulationsergebnisse auch beim Stirndeckel nicht vorgenommen werden, so dass die Startphase gegenüber der des Einfachwerkzeuges erheblich verkürzt werden konnte. Kosten für Modifikationen des Großwerkzeuges entstanden erst gar nicht. Das bereits mit dem Einfachwerkzeug erreichte hohe Qualitätsniveau konnte durch die gezielte Übertragung der beim Einfachwerkzeug gewonnenen Füllcharakteristik mittels autonomer Optimierung auf die Zweifachform übertragen und in Verbindung mit weiteren Maßnahmen noch übertroffen werden. Das Fertigungsrisiko wurde durch den Einsatz rechnerischer Simulation vermieden.

Zusammenfassung

Die Wettbewerbssituation zwingt zur kontinuierlichen Kostensenkung. Die größten Einsparungen lassen sich erzielen, wenn die Zahl der Gussteile pro Abguss erhöht wird. Damit verbunden steigt bei konventioneller Vorgehensweise allerdings das Fertigungsrisiko. Liegt eine bereits bewährte Gießtechnik vor, können die daraus gewonnenen „Erfahrungen“ mittels rechnerischer Simulation erfasst und als Optimierungsziele für die autonome Optimierung des Mehrfachwerkzeuges genutzt werden.

Das Beispiel des Stirndeckels zeigt, wie die Füllcharakteristik eines Druckgussteils mit Hilfe dieser innovativen Methodik von einem Einfachwerkzeug auf ein Zweifachwerkzeug mit Erfolg und ohne Risiko übertragen werden kann. Die rechnerische Optimierung von Werkzeuggestaltung und Gießtechnik entwickelt sich zu einem leistungsfähigen Werkzeug für den Praktiker.

Dipl.-Ing. Rudolf Seefeldt und Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Magma GmbH, Aachen, sowie Dipl.-Ing. Alexander Pawlowski, Köln

Literatur:

- [1] Ford – interne Mitteilung*.
- [2] Giesserei 91 (2004) Nr. 2, S. 48-49.
- [3] Giesserei 92 (2005) Nr. 3, S. 38-49.
- [4] Sturm, J. C.: Optimierung von Gießtechnik und Gussteilen. Symposium Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, 5.-7. November 2003, Bremen.
- [5] Kokot, V.; Bernbeck, P.: What is a good gating system or quantifying quality – but how? In Proceedings of the XX. MCWASP-Conference, France, 2006.

* Mit freundlicher Genehmigung der Ford-Werke GmbH, Köln