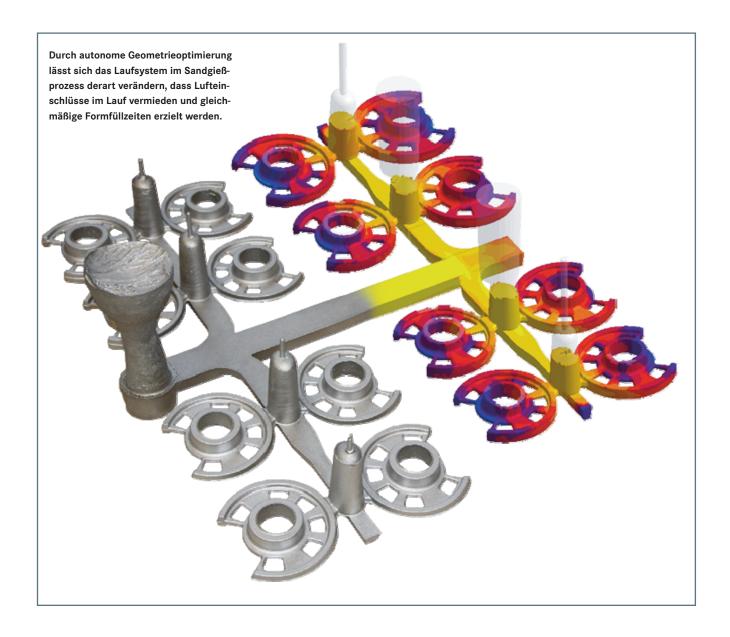
Systematische Optimierung von Gießlaufsystemen für das Schwerkraft-Aluminiumsandgießen



VON GEORG WILHELM DIECKHUES, OLPE, HARTMUT ROCKMANN UND JÖRG CHRISTIAN STURM, AACHEN

ntwicklungsprozesse in der Gießerei sind ständig steigenden Wettbewerbsanforderungen unterworfen. Die Gießer müssen sich und ihre Fertigung immer schneller verbessern. Dies gilt insbesondere für leistungsfähige anlagenintensive Kundengießereien mit einer großen Anzahl von Neuteilen pro Jahr. Die He-

rausforderung ist, technisch verlässliche und wirtschaftlich erfolgreiche Gießprozesse in immer kürzerer Zeit auslegen zu müssen.

Der Entwicklungsablauf für ein Neuteil ist bisher in der Gießerei oft noch durch die Faktoren "Erfahrung" sowie durch "Versuch und Irrtum" geprägt. Dabei hat sich die Gießprozesssimulation als zuverlässiges Werkzeug zur methodischen Gussteilentwicklung etabliert. Sie ersetzt umfangreiche Probeabgüsse mit immer wieder-

kehrenden gießtechnischen Änderungen – eine Methodik, die aus Zeit- und Kostengründen in Kundengießereien weitgehend vermieden werden muss. Nur zur abschließenden Überprüfung der gewählten Fertigungstechnik wird ein Probeabguss durchgeführt. So lässt sich auch die notwendige Anlagenverfügbarkeit bei ständig wechselndem Programm und relativ kleinen Losgrößen deutlich verbessern.

Die Gießsimulation liefert Erkenntnisse über die zuvor genau festgelegten Parameter des Prozesses. Gießtechnische Abläufe müssen wegen der Vielzahl von Einflussgrößen und der teilweise nicht vermeidbaren Schwankungen jedoch immer in einem Fertigungsfenster der bestimmenden Parameter betrachtet werden. Je größer dieses Fertigungsfenster ist, umso prozesssicherer und wirtschaftlicher erfolgt die Herstellung qualitativ hochwertiger Gussteile. Die Erfahrung des Fachmanns ist auch bei intensiver Nutzung von Simulationsergebnissen erforderlich.

Würde man stets alle denkbaren Einflussgrößen auf einen Gießprozess systematisch untersuchen, ergäbe sich ein unvertretbar hoher experimenteller und ebenso rechentechnischer Erprobungsaufwand. Mit der autonomen Optimierung wurden Verfahren entwickelt, die eine hohe Aussagefähigkeit bei einer begrenzten Anzahl von Versuchen am Bildschirm besitzen, da die Software aus bereits durchgeführten virtuellen Experimenten (Simulationen) lernen kann. Aufgabe ist es, den optimalen Arbeitspunkt für die Gießtechnik zu finden, ein robustes Fertigungsfenster zu ermitteln und letztendlich daraus allgemeine Standards für die Gießtechnik abzuleiten.

Neben der anwendungsgerechten Auslegung der Speisungstechnik mit der Kontrolle des Wasserstoffgehaltes stellt die Minimierung der Oxidbildung schmelzflüssiger Werkstoffe bei der Verarbeitung von Aluminiumlegierungen die größte Herausforderung dar. Die starke Oxidationsneigung des Aluminiums führt dazu, dass freie metallische Oberflächen im Kontakt mit dem Luftsauerstoff permanent irreversible Aluminiumoxidlagen ausbilden. Wird beim vergleichsweise langsamen Strömen beim Schwerkraftgießen die Füllfront turbulent, können erhebliche Mengen an Oxiden gebildet werden. Diese prägen sich in vielen Fällen als Oberflächengussfehler aus, können aber auch zu inneren Fehlern führen, die dann die Gefügestruktur empfindlich stören und die Bauteileigenschaften

KURZFASSUNG:

Die Steigerung der Anlagenverfügbarkeit ist ein wichtiges Kriterium zur kontinuierlichen Kostensenkung in Kundengießereien. Dabei spielt die Reduzierung des Musterungsaufwandes bei Neuteilen eine große Rolle. Am Beispiel der autonomen Optimierung des Gießsystems beim Aluminiumschwerkraftgießen wurde gezeigt, dass heutige Simulationswerkzeuge eine deutliche Reduzierung der Anzahl von realen Versuchen bewirken. Ein erheblicher Zeit- und Kostenaufwand zur Ermittlung geometrisch angepasster Laufsysteme sowie eines optimalen, technisch verlässlichen Prozessfensters kann dadurch eingespart werden. Auf der Basis gießereispezifischer Randbedingungen kann die autonome Optimierung dem Gießereifachmann eine Reihe von Entscheidungskriterien liefern, die vor dem Hintergrund konkreter Zielstellungen im Hinblick auf Qualität und Fertigungseffizienz eine anwendungsgerechte Auslegung der Prozesse ermöglicht.

Das Beispiel der Optimierung eines Laufsystems im Aluminiumsandgießverfahren zeigt, wie der Gießer mittels dieser innovativen Methodik aus virtuellen Versuchen lernen und die Ergebnisse zur Ableitung von allgemeinen Standards für seine Fertigung nutzen kann. Neben der eigentlichen Lösung der Optimierungsaufgabe wird durch die virtuelle Optimierung auch die Auswertung von Ergebnissen vereinfacht und der Einfluss von einzelnen Parametern auf die Zielsetzung dargestellt. So können Zusammenhänge im Prozess besser verstanden werden. Die rechnerische Optimierung von Gießtechnik und Fertigungsparametern entwickelt sich damit zu einem immer leistungsfähigeren Werkzeug für den Praktiker und wird in der Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen.

entsprechend negativ beeinflussen [1-3]. Nachfolgend wird anhand eines konkreten Fallbeispiels beschrieben, wie die Maßnahmen zur Minimierung oxidationsbedingter Fehler mit den Mitteln numerischer Simulationstechniken systematisch unterstützt werden können. Zu diesem Zweck wurde ein fehleranfälliges Gießlaufsystem einer Serienmodelleinrichtung für die Fertigung im vollautomatischen Sandgießprozess mit dem Optimierungswerkzeug von Magmasoft untersucht, welches die autonome Geometrieoptimierung von Laufsystemen ermöglicht. Die numerisch berechneten Lösungsvorschläge wurden in die praktische Anwendung übertragen und im Serienprozess in der neu errichteten Sandgussfertigung bei der Ohm & Häner Metallwerk GmbH, Olpe, angewendet.

Autonome Optimierung des Gießprozesses

Die Gießprozesssimulation berechnet jeweils den vom Fachmann definierten Status quo. Die Bewertung, ob das Gießsystem oder die Prozessbedingungen zu guten Ergebnissen führen können, erfordert in den meisten Fällen spezifisches Expertenwissen. Darüber hinaus muss auch die Lösung für eine Optimierung vom Fachmann kommen.

Der Vorteil des Gießens – das schnellste und wirtschaftlichste Verfahren für die endkonturnahe Fertigung – ist auch sein größter Nachteil: Alles passiert gleichzeitig und ist miteinander gekoppelt. Änderungen einzelner Parameter beeinflussen gleichzeitig viele Qualitätsmerkmale wäh-

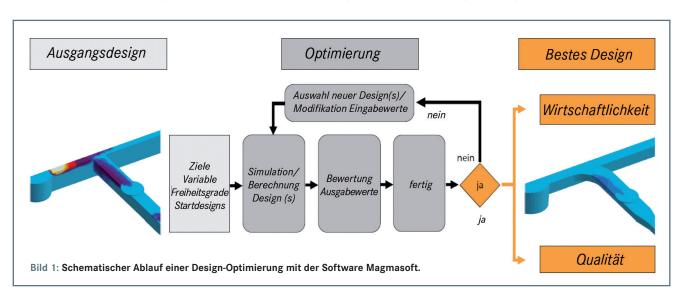




Bild 2: Designvarianten von Gießläufen für ein Al-Sandgussteil. Ziel der rechnerischen Optimierung war die Vergleichmäßigung der Formfüllzeiten und die Vermeidung von Lufteinschlüssen im Lauf (farbige Bereiche deuten auf Ablösungen hin, deren Folge Verwirbelungen und Gaseinschlüsse sein können) – die beste Variante rechts.

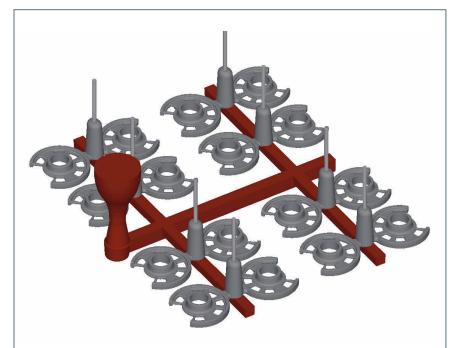


Bild 3: Ausgangssituation für die Gießtechnik: 16-fach-Traube mit zentralem Hauptlauf und rechtwinklig abzweigenden Seitenläufen, an die die jeweiligen Gussteile angebunden sind.



Bild 4: Durch eingespülte Oxide verursachter typischer Oberflächenfehler am Gussteil, der erst nach dem Strahlen sichtbar wird.

rend des Prozesses. So hat z. B. die Änderung der Gießtemperatur im Aluminiumsandgießverfahren nicht nur einen Einfluss auf das Erstarrungsverhalten: sie verändert die Fließfähigkeit der Schmelze, sie kann zu Kaltlauf führen, die Wasserstoffaufnahme und die metallurgische Konstitution der Schmelze werden beeinflusst. Hier bietet sich die autonome Optimierung als Ausweg an, um die günstigsten Fertigungsbedingungen festzulegen. Sie nutzt das Simulationsprogramm als virtuelles Versuchsfeld und ändert Gießbedingungen oder Gießtechnik, um das vorgegebene Ziel möglichst optimal zu erreichen. Dabei werden einzelne Größen unabhängig voneinander geändert und können entsprechend bewertet werden. Autonome Optimierungswerkzeuge bilden die klassische Vorgehensweise des Gießers ab, nämlich den besten Kompromiss auf Basis physikalischer Berechnungen zu finden. Bild 1 zeigt den schematischen Ablauf einer Designoptimierung mit der Software Magmasoft. Die Startsequenz von zu berechnenden Designs erfolgt auf Basis der statistischen Versuchsplanung. Im Folgenden werden für eine vorgegebene Anzahl von Generationen gießtechnische Simulationen durchgeführt. Im Anschluss an jede Simulation werden die Ergebnisse ausgewertet und abhängig vom Ergebnis neue Designs nach genetischen Prinzipien festgelegt.

Die autonome rechnerische Optimierung bietet damit einen neuartigen Zugang zur Lösung schwieriger fertigungstechnischer Fragestellungen. 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 zu erreichen, können sowohl Fertigungsparameter (z. B. Gießbedingungen, Werkstoffe, Prozesszeiten etc.) als auch Geometrien (z. B. Gießlaufdesign, Anschnittdimensionierung, Position und Größe von Speisern und/oder Kühlkörpern etc.) variiert werden. Im Bereich des Schwerkraftgießens findet sich eine Reihe von Anwendungsbeispielen [4]. Hier ist vor allem die Optimierung der Speisertechnik zu nennen [5], aber auch die Geometrie von Gießläufen und Anschnitten wird vermehrt mit dieser Technologie ausgelegt [6-10].

Bei der selbsttätig ablaufenden Optimierung definiert der Anwender vor Durchführung der Simulationen die Freiheitsgrade (z. B. Gießtemperatur von – bis oder Laufdimensionen von – bis), seine Optimierungsziele und die Fertigungsrestriktionen (nicht-variable Größen). Das Optimierungsprogramm durchläuft mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) automatisch eine erste Reihe von Simulationen [11].

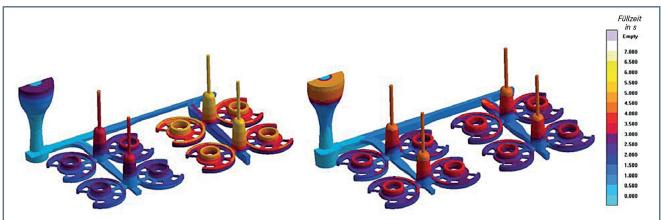


Bild 5: Vergleich der Gießzeitunterschiede zwischen einem schlechten (links) und einem guten Laufdesign (rechts). Die Füllzeiten zwischen den Gussteilen, die an den ersten Querlauf angebunden sind, unterscheiden sich links von denen vom zweiten Querlauf um mehrere Sekunden, während im optimalen Fall ein sehr gleichmäßiges Formfüllen erfolgt.

Im Anschluss an die Berechnung der ersten und jeder weiteren Generation von virtuellen Versuchen werden die vom Anwender vorgegebenen Ziele durch das Programm eigenständig überprüft. Abhängig von der Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse mit den gewählten Zielfunktionen entwirft ein "genetischer Algorithmus" neue Varianten der Gießtechnik. Dies geschieht nach dem Vorbild der Evolution durch "Vererbung", "Kombination" oder "Mutation": Für jede gießtechnische Variante wird entschieden, ob sie verworfen oder verändert wird - oder ob sie mit einer bereits vorhandenen oder neuen Variante kombiniert wird. Dies wird so lange wiederholt, bis durch eine weitere Veränderung keine wesentliche Verbesserung mehr erzielt wird. Wie beim biologischen Vorbild läuft dieser Vorgang über mehrere (Berechnungs-)Generationen ab - es wird dabei stets eine größere Anzahl von Simulationen durchgeführt.

Im konkreten Simulationsablauf werden also jeweils Gießbedingungen oder die gewählten parametrisch konstruierten Geometrieelemente automatisch variiert. Anschließend erzeugt das Programm eine neue Vernetzung, definiert die neuen Anfangs- und Randbedingungen und rechnet die neuen Designs automatisch durch. Auch die Bewertung der "Qualitätskriterien" erfolgt automatisch. Nach einer hinreichenden Anzahl von Optimierungen werden in der Regel gute Kompromisse für die jeweiligen Einzelziele gefunden. Die Praxis zeigt, dass Geometrieänderungen häufig den größten Einfluss auf die angestrebten Optimierungsziele haben.

Bild 2 zeigt verschiedene Designvarianten von Gießläufen für ein Aluminiumsandgussteil, die im Laufe der rechnerischen Optimierung in Erwägung gezogen wurden. Dargestellt sind beispielhaft vier Designvarianten, geprüft wurden 200 Versionen. Ziel der Optimierung war es, ne-

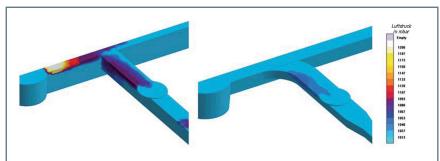


Bild 6: Vergleich der Strömungsverhältnisse für unterschiedliche Gießlaufdesigns am Beispiel der Menge an eingeschlossener Luft. In allen nicht blau dargestellten Bereichen des Gießsystems wird eingeschlossene Luft vorhergesagt.

ben einer Vergleichmäßigung der Formfüllzeiten Lufteinschlüsse im Lauf zu vermeiden. Die farbig markierten Bereiche deuten auf Ablösungen hin, durch die sich Verwirbelungen und Gaseinschlüsse bilden. Die beste gefundene Variante (rechts) weist in dieser Hinsicht keinen kritischen Bereich auf.

Als Grundsatz für eine zielsichere virtuelle Optimierung mit möglichst wenig Aufwand gilt, dass Klarheit über das Ziel der Optimierung besteht, d. h., Fehlerursachen im Vorfeld weitgehend geklärt sein müssen. Eine DoE-Sequenz vor der eigentlichen Optimierung hilft, sich auf wesentliche Einflussfaktoren zu beschränken [8]. Aufgrund der Vielfalt der Einflussgrößen (und natürlich der Grenzen des Simulationsmodells) ist es oftmals einfacher und schneller, Teilbereiche zu optimieren, da das Ziel konkreter vorgegeben werden kann und die Variationen übersichtlich bleiben. Erst wenn keine befriedigende Lösung gefunden wird, wird das "Spielfeld" für die Optimierung erweitert.

Die wichtigste Aufgabenstellung für die erfolgreiche Definition eines Optimierungsproblems ist daher 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, wie z. B.:

- > Übertragung der Füllcharakteristik eines erfolgreich im Einsatz befindlichen Modells auf ein Gießsystem mit ähnlichen oder gleichen Anforderungen;
- > Einstellung eines gleichartigen und gleichzeitigen Füllens der Formnester bei Mehrfachmodellplatten abhängig von ihrer Position, dem Laufsystem und der Gießparameter;
- Vermeiden von Ablösungen isolierter Schmelze im Gießlauf wie auch von Gaseinschlüssen im Gussteil;
- > Optimierung der Laufquerschnitte hinsichtlich einer wirkungsvollen Nachspeisung;
- Minimierung des Laufvolumens zur Reduktion des Kreislaufmaterials und
- > Vermeiden von Kaltlauf im Gussteil usw.

Entscheidender 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 die Problemstellung des aktuellen Bauteils hinaus. Dies unterstützt auch

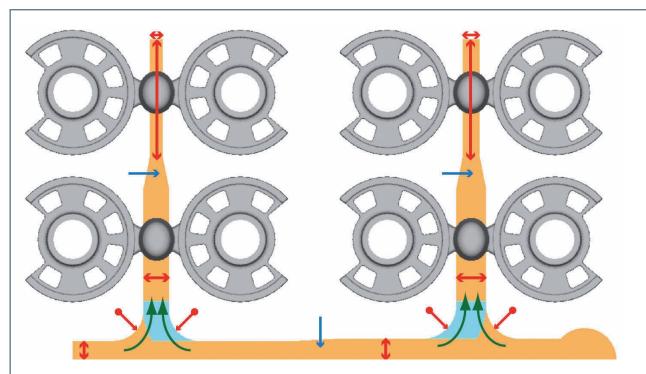


Bild 7: Darstellung der Freiheitsgrade in der Optimierung am CAD-Modell. Variable Laufparameter: Laufrichtung des Übergangs Hauptzu Querlauf (grüne Pfeile), Querschnitte von Haupt- und Querläufen in zwei Stufen, Länge der Querläufe (rote Pfeile); festgelegte Größen: Position der Laufabstufung, Länge des Hauptlaufs (blaue Pfeile).

Tabelle 1: Designvariablen und feste Größen für die Optimierung)	
Variable Randbedingungen	Größe und Raum
Laufrichtung des Übergangs Haupt- zu Querlauf	in Fließrichtung, gegen Fließrichtung
Querschnitte der Haupt- und Querläufe	je 8 Varianten
Länge der Querläufe	je 4 Varianten
Radien Übergang Haupt- zu Querläufen	0-120 mm in 5-mm-Schritten (x 4)
Feste Randbedingungen	
Position der Verjüngung in den Läufen	
Länge des Hauptlaufes	
Legierung	AlSi9Cu3
Gießtemperatur	750 °C
Formstoff	Grünsand
Gasdurchlässigkeit	60 cm ³ /min

die Anstrengungen zur Standardisierung von Gießtechnik und Fertigungsparametern, denen bei der Nutzung moderner Produktionsanlagen eine immer größere Bedeutung zukommt.

Das Projekt

Ausgangssituation und Aufgabenstellung

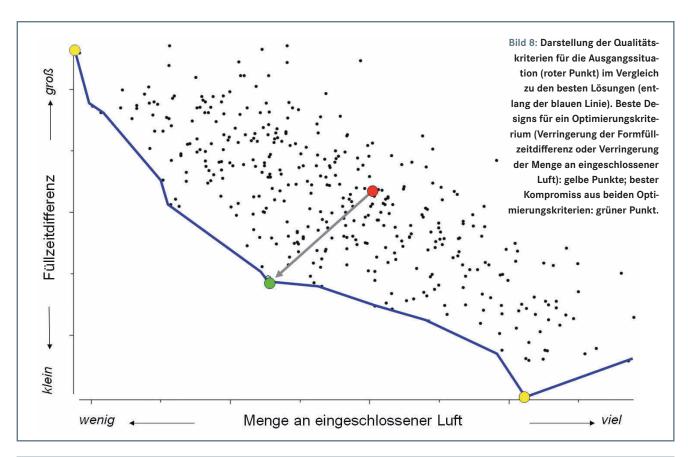
Um eine ökonomische Fertigung zu erreichen, werden Maschinenformmodelle in der Serienfertigung immer mit möglichst vielen Bauteilen belegt. In vielen Fällen kommt es dabei zu einer asymmetrischen Anordnung der Bauteile in Bezug auf den Eingusstrichter, da dessen Position nicht beliebig verändert werden kann. Sobald mehr als zwei Modelle auf einer Modellplatte angeordnet werden, unterliegen nicht mehr alle Kavitäten den gleichen geometrischen Bedingungen bei der Versorgung mit Schmelze. Aufgrund unterschiedlicher Fließlängen in den Laufsystemen sind die jeweiligen Füllzeiten und thermi-

schen Verhältnisse beim Füllen der Formnester stark unterschiedlich. Hinzu kommt, dass das Laufsystem in den meisten Fällen nicht strömungstechnisch optimiert ist.

Es kommt im Bereich von Abzweigungen und Querschnittsübergängen oftmals zu Unterdruckverhältnissen und starken Turbulenzen. Luft wird angesaugt und sehr viel freie Schmelzeoberfläche entsteht. Beides führt zu einer intensiven Oxidation. Die entstehenden Oxide werden zu einem großen Teil in die Formhohlräume eingespült. Dort lagern sie sich dann als Agglomerate an den Formoberflächen an oder werden in die Metallmatrix als Fehlstelle eingebunden.

Oberflächlich abgelagerte Oxide bilden Fehlstellen, die in vielen Fällen erst nach dem Strahlen der Bauteile sichtbar werden, also nicht unmittelbar nach der Herstellung des Gussteiles erkannt werden können.

Für die grundsätzlichen Untersuchungen zur autonomen Optimierung von Laufsystemen zur Vermeidung strömungsbedingter Gussfehler wurde ein relativ einfaches Gussteil herangezogen. Betrachtet wurde eine Serienmodelleinrichtung für die Aluminiumsandgussfertigung mit tongebundenen Sandformen, hergestellt auf einem modernen HWS-Formautomaten mit Impulsverdichtungstechnologie. Es handelt sich um eine Modellplatte mit einer 16-fach-Belegung (Bild 3). Das kernlos herstellbare Bauteil ist ein Lagerschild für eine Maschinenbauanwendung mit einem Abguss-



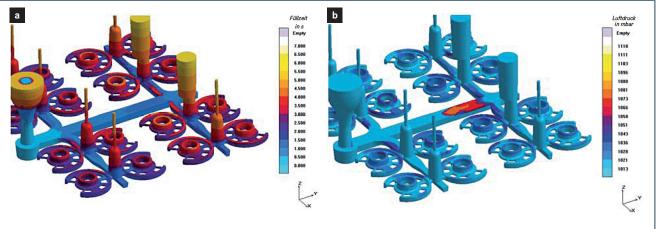


Bild 9: Darstellung der Füllzeiten (a) und der Menge an eingeschlossener Luft im Laufsystem (b) für das Design, das dem besten Kompromiss unter allen Varianten entspricht.

gewicht von 0,23 kg, gegossen im Werkstoff AlSi9Cu3 (226).

Die Bauteile sind in der Ausgangskonfiguration gleichmäßig in achsensymmetrischer Anordnung auf der Modellplatte verteilt und jeweils paarweise an Seitenläufe angebunden, die von einem zentralen Mittellauf versorgt werden. In der Serienproduktion trat an den Bauteilen eine Vielzahl von Oberflächenfehlern auf, die erst nach dem Strahlen sichtbar wurden und eindeutig auf eingespülte Oxide zurückgeführt werden konnten (Bild 4). Der Fehler wurde zunächst in einer durchschnittlichen Häufigkeit von 20 bis 30 % praktisch an Bauteilen aus allen vorhandenen Formnestern festgestellt. Dabei zeig-

ten einige Formnester eine höhere Anfälligkeit für Oberflächenfehler als andere.

Ziel der Optimierung war die Beseitigung des aufgetretenen Fehlers durch Anpassung des Laufsystems unter Beibehaltung der Bauteilanordnung auf der Modellplatte.

Vorgehensweise

Eine notwendige Voraussetzung für die Optimierung sind klare Qualitätskriterien, die die Software automatisch bewerten kann. Dabei ermöglicht die Software, mehrere Kriterien gleichzeitig zu untersuchen. Für die Auslegung des Gießsystems boten sich zwei Kriterien an, die auf der einen Seite ein balanciertes Gießsystem sicherstellen

und auf der anderen Seite ein möglichst turbulenzarmes Formfüllen gewährleisten. Unterschiede in den Füllzeiten der einzelnen Formnester können als ein Maß für die Gleichmäßigkeit des Füllens der Form betrachtet werden. Die Menge an eingeschlossener Luft steht in direktem Zusammenhang mit Turbulenzen während des Formfüllens. Als Optimierungsziele sollten daher die Differenz in der Füllzeit zwischen den einzelnen Formnestern und gleichzeitig die gesamte Menge an eingeschlossener Luft für die Formfüllung minimiert werden (Bilder 5 und 6).

Als Freiheitsgrade werden bei der Optimierung im Gegensatz zur "herkömmlichen" Simulation nicht nur fixe Werte, son-

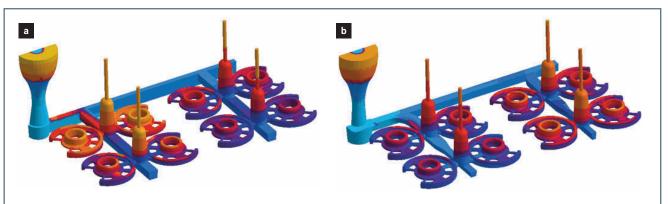


Bild 10: Ausgangssituation und Optimum am Beispiel der Gießzeitunterschiede. Die Unterschiede zwischen minimaler und maximaler Gießzeit in einem Formnest wurden von mehr als 4 s (a) auf 1,5 s (b) reduziert. Als Laufsystem wurde ein Kompromiss gewählt, der minimale Füllzeitunterschiede und kleinste Volumina an eingeschlossener Luft in den Teilen sicherstellt.

dern auch Variablen definiert, die die Software automatisch modifizieren kann. Hierzu wurde in Magmasoft ein parametrischer Gießlauf erstellt, der es der Software möglich macht, selbstständig Änderungen vorzunehmen und in der Simulation zu überprüfen. Im Detail konnte die Software Laufquerschnitte und Querschnittsverjüngungen sowohl für den Haupt- als auch den Querlauf verändern.

Zusätzlich wurden die Übergänge vom Hauptlauf in die Ouerläufe verrundet und waren im Radius variabel. Hierdurch konnten auch Gießläufe untersucht werden, bei denen die Verrundungen für die beiden Ouerläufe sowohl mit als auch entgegen der Hauptströmungsrichtung orientiert waren (Bild 7 und Tabelle 1).

Während der Optimierung wurden die Position der Gussteile und die Gießbedingungen als fix angenommen (Tabelle 1). Die Aufstellung eines Versuchsplans und die Kombination von verschiedenen Freiheitsgraden führte zu 196 verschiedenen Designs, die alle berechnet wurden. In der Praxis ist der Aufwand für eine solche Vielzahl an einzelnen Experimenten mit gießtechnischen Variationen natürlich niemals durchführbar, allerdings zeigt die Erfahrung, dass es bei komplexen Geometrien



Bild 11: Realer Abguss mit dem autonom optimierten Gießsystem. Der charakteristische Oberflächenfehler durch Oxideinspülungen konnte durch den gewählten Optimierungsansatz erfolgreich beseitigt werden.

durchaus zu mehreren Optimierungsschleifen kommen kann, die sich je nach Kostensatz der automatischen Formanlage in Bemusterungskosten von insgesamt mehreren Tausend Euro niederschlagen können.

Bewertung der Ergebnisse

Die von der Software eigenständig auf Basis der Qualitätskriterien durchgeführten Änderungen am Gießsystem lassen sich auf unterschiedliche Weise bewerten. Ein geeignetes Werkzeug hierzu ist das so genannte Scatter-Diagramm, in dem die Ergebnisse für alle Designs in Bezug auf die gewählten Qualitätskriterien aufgetragen werden. Bild 8 zeigt ein solches Diagramm. Darin wird die Ausgangssituation im Vergleich zu den besten Lösungen dargestellt. Die Ergebnisse aller Simulationen können in unterschiedlichster Weise miteinander verglichen werden. Das Beispiel des Vergleichs der Ergebnisse von Füllzeitdifferenzen und Menge an eingeschlossener Luft in der Schmelze während des Formfüllens für alle Simulationen zeigt, dass die optimalen Lösungen, die sich durch die sogenannte Pareto-Front darstellen lassen (blaue Linie), zu deutlichen Verbesserungen im Vergleich zur Ausgangssituation (roter Punkt) führen. Es existiert natürlich nicht nur ein bestes Laufsystem als Optimum. Der Fachmann muss jetzt entscheiden, welches Merkmal für die Aufgabenstellung wichtiger ist - die Verringerung der Füllzeitdifferenz oder der Menge an eingeschlossener Luft. Es können entweder die besten Designs für ein Merkmal (gelbe Punkte) oder der "beste Kompromiss" aus beiden Kriterien (grüner Punkt) gewählt werden. Die besten Designs für ein Qualitätsmerkmal reduzieren die Menge an eingeschlossener Luft bezogen auf den Ausgangszustand in der gesamten Gießtraube um 30 %, während die Füllzeitdifferenz von 4 s auf 1.5 s reduziert werden kann. In diesem Fall wurde der klassische Kompromiss gewählt, der gute Ergebnisse für ein ausbalanciertes Gießsystem aufwies und gleichzeitig geringe Turbulenzen zeigte (Bild 9). Die Füllzeiten der einzelnen Formnester unterscheiden sich maximal um 1,5 s. Gleichzeitig konnten Lufteinschlüsse in den Gussteilen fast eliminiert werden.

Das Potential der Optimierung wird in Bild 10 deutlich. Am Beispiel der Gießzeitunterschiede vom realen Ausgangszustand im Vergleich zu dem optimierten besten Kompromiss lässt sich die Verbesserung der Formfüllverhältnisse klar darstellen.

Praktische Umsetzung und Ableitung von Designregeln

Nach Abschluss der durchgeführten Optimierung und der detaillierten Auswertung wurde eine Entscheidung hinsichtlich der praktischen Umsetzung getroffen. Wie unter dem Gliederungspunkt "Projektbeschreibung" ausgeführt, wurde hierbei der Kompromiss ausgewählt, der beide primären Optimierungsziele – Minimierung der Füllzeitdifferenz und geringe eingeschlossene Luftmenge – gleichermaßen berücksichtigt. Das bestehende Anschnittsystem wurde analog zu dem im Optimierungsansatz gefundenen Design geändert. Die entsprechenden Anpassungen der Modelleinrichtung erfolgten auf Basis der abgeleiteten Daten, die unmittelbar aus der Simulationssoftware exportiert wurden.

Die geänderte Modelleinrichtung kam ohne vorherige Erprobung unmittelbar für ein Produktionslos zum Einsatz und wurde somit einem direkten Praxistest unterzogen (Bild 11). Die charakteristischen oxidbedingten Fehler konnten an den Bauteilen fortan nicht mehr festgestellt werden. Durch die berechneten umfangreichen Änderungen des Laufsystems und die damit erzielte Vergleichmäßigung der Formfüllbedingungen sowie die Reduzierung der freien Oberfläche konnten offensichtlich die In-situ-Bildung von Oxiden verringert und deren Ablagerungen in den Oberflächen vermieden werden.

Die Ableitung allgemeiner Designregeln stellt im Hinblick auf die angestrebte Standardisierung von Gießsystemen einen weiteren Nutzen dar, der aus dem Projekt der autonomen Optimierung gezogen werden konnte. Dieses Regelwerk besitzt nicht notwendigerweise einen allgemeingültigen Charakter und ist immer vor dem Hintergrund der individuell zur Anwendung kommenden verfahrensbedingten Randbedingungen (Eingusstrichter, Gießhöhe, Gießtemperatur etc.) zu betrachten. In diesem Rahmen sind die Regeln dann aber auf vergleichbare Zustände übertragbar. Im vorliegenden Fall konnten grundsätzliche Richtlinien erarbeitet werden, die sich auf die wesentlichen Bereiche der geometrischen Auslegung von Laufsystemen bezie-

- > Abstufungsverhältnisse im Hauptlauf sowie in den Nebenläufen;
- > Abmessungsverhältnisse von Hauptund Nebenläufen;
- > Radienauslegung im Bereich von Abzweigungen und
- > Radienorientierung in Bezug auf die Strömungsrichtung.

Auf der Grundlage der abgeleiteten Regeln wurden weitere Modelleinrichtungen erfolgreich ausgelegt, die eine ähnliche oder gleiche Mehrfachbelegung aufweisen und so direkt im Hinblick auf eine Serienfertigung bemustert werden konnten, ohne dass zusätzliche Optimierungsaufwendungen erforderlich waren.

Dr.-Ing. Georg Wilhelm Dieckhues, Ohm & Häner Metallwerk GmbH, Olpe, Dipl.-Ing. Hartmut Rockmann und Dr.-Ing. Jörg Christian Sturm, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Literatur:

[1] Campbell, J.: Castings. 2. Aufl. Elsevier, 2004.

[2] AFS Transactions (1999) Nr. 107, S. 287-294.

[3] Crepeau, P. N.: Molten aluminum contamination: gas, inclusions, and dross. Proceedings, 5th International Conference on Molten Aluminum Processing, 1995, USA. Des Plaines: AFS Inc.

[4] Sturm, J. C.: Optimierung von Gießtechnik und Gussteilen. Symposium Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, 5.-7. November 2003, Bremen.

[5] Giesserei 91 (2004) Nr. 10, S. 22-30. [6] Giesserei 91 (2004) Nr. 2, S. 48-49.

[7] Kokot, V.; Bernbeck, P.: What is a good gating system or quantifying quality – but how? Proceedings, XX. Mcwasp-Conference, Frankreich, 2006.

[8] Giesserei 94 (2007) Nr. 4, S. 34-42.
[9] Giesserei 95 (2008) Nr. 9, S. 36-45.
[10] Hahn, I.; Sturm, J. C.: Autonomous optimization of casting processes and designs. Proceedings, 69th World Foundry Congress, 16.-20. Oktober 2010, Hangzhou, China.
[11] Egner-Walter, A.; Hahn, I.; Simon, W.: Verkürzung des Entwicklungsprozesses von Gussteilen durch Einsatz von virtueller DoE. 5. VDI-Tagung Gießtechnik im Motorenbau, 10./11. Februar 2009, Magdeburg.