

Bild 1: Ablaufschemata: eindimensionale Suche (links), Versuchsplanung (Mitte), automatische Optimierung (rechts).

# Automatische Optimierung in der Gießprozesssimulation

VON INGO HAHN UND JÖRG C. STURM, AACHEN

Mehr als 20 Jahre nach der Einführung von Simulationssoftware für Gießereien in der Branche hat sich die Gießprozesssimulation zu einem akzeptierten Werkzeug für die Prozess- und Konstruktionsgestaltung entwickelt. Die Ergebnisse aus der Simulation spiegeln jeweils den aktuellen Stand der Technik und ihrer Anwender wider. Dabei bewertet der Anwender, ob die ge-

wählte Gießtechnik oder entsprechende Prozessparameter zu einem guten Ergebnis führen.

Aufgrund der Vielzahl an Faktoren, die die Qualität von Gussteilen beeinflussen, und der komplexen Wechselwirkungen von Physik, Metallurgie und Gussteilgeometrie ist empirisches Wissen nach wie vor die wichtigste Quelle, auf der eine „optimierte Fertigungstechnik“ basiert. Die Gießprozesssimulation kann Erfahrung quantifizieren und stellt daher mehr als nur einen definierten „Zustand“ oder einen

Entwurf auf den Prüfstand. Sie liefert Einblicke in die Ursache von Problemen. Jedoch kann eine einzelne Simulation dem Experten nicht aufzeigen, wie robust sein Entwurf ist und ob er unter den gegebenen Bedingungen das Optimum darstellt. Um den Einfluss verschiedener Parameter auf den Gießprozess zu bestimmen, müssen systematisch Varianten berechnet werden. Dies bedeutet, dass der kontinuierliche Verbesserungsprozess bei der Simulation auch das Prinzip von Versuch und Irrtum beinhaltet. Nur hier wird vom Pro-

gramm selbsttätig mit Hilfe entsprechender Optimierungsalgorithmen nach einer Lösung gesucht.

Um den experimentellen Aufwand zu reduzieren und Versuche effizient zu planen, wurden statistische Verfahren entwickelt. Das Ziel dieser Versuchsplanung (engl. „Design of Experiments“, DoE) ist es, wertvolle Informationen mit möglichst wenig Stichproben zu ermitteln [1, 2]. Die Verfahren kommen dann zum Einsatz, wenn der Einfluss mehrerer Parameter auf ein vorliegendes Ergebnis untersucht werden soll. Sie werden in großer Breite bei realen Experimenten angewendet und bieten auch erhebliche Vorteile, wenn sie in Verbindung mit Simulationsläufen eingesetzt werden [3].

Obwohl die Anwendung von DoE-Verfahren einen wichtigen Schritt bei der Entwicklung eines robusten Gießprozesses darstellt, legt der Gießer sein Augenmerk darüber hinaus auch auf bestimmte technische oder wirtschaftliche Zielsetzungen. Dafür ist ein Optimierungsansatz mit wenig Interaktion mit dem Simulationsprogramm notwendig.

Die Kombination von Simulationssoftware mit einem Optimierungsprogramm ermöglicht die automatische Analyse einer Vielzahl von verschiedenen Varianten im Hinblick auf die vom Fachmann definierten Ziele (z. B. geringe Porosität bei gleichzeitig geringem Anteil an Kreislaufmaterial). Basierend auf den Ergebnissen erstellt die Software neue Varianten und analysiert sie.

Die automatische Optimierung nutzt das Simulationswerkzeug sozusagen als virtuelles Experimentier- oder Prüffeld. Durch Veränderung der Gießtechnik, z. B. der Anschmittauslegung oder der Prozessparameter, versucht die Software den optimalen Prozess zu finden, um die gewünschten Ziele zu erreichen. Verschiedene Parameter können gleichzeitig und unabhängig voneinander ausgewertet werden. Virtuelle Optimierungswerkzeuge kombinieren den klassischen Ansatz der Gießerei-Ingenieure, den „besten Kompromiss“ zu finden, mit bewährter Physik und Mathematik. Durch die Entwicklung entsprechender Optimierungsalgorithmen und Nutzung mit der Simulation wird der Bedarf an Testläufen zur Identifizierung des optimalen Prozessfensters reduziert. Eine detaillierte Auswertung zahlreicher Prozessparameter und deren einzelner Auswirkungen auf die Gestaltung eines robusten Prozesses wird möglich.

Mit der Weiterentwicklung von Software und Hardware haben sich die Antwortzeiten von Simulationsprogrammen kontinuierlich verbessert. Hierbei bieten die Parallelisierung der Software und die Verfügbarkeit von Multiprozessor- oder

## KURZFASSUNG:

Mehr als 20 Jahre nach der Einführung von Simulationssoftware für Gießereien in der Branche hat sich die Gießprozesssimulation zu einem akzeptierten Werkzeug für die Prozess- und Konstruktionsgestaltung entwickelt. Die Gießprozesssimulation spiegelt stets den aktuellen Stand der Technik und ihrer erfahrenen Anwender wider. Der Anwender entscheidet abschließend, ob Gießtechnik oder Prozessparameter zu einem akzeptablen Ergebnis führen. Auch die Vorschläge für optimierte Lösungen müssen vom Anwender vorgegeben werden.

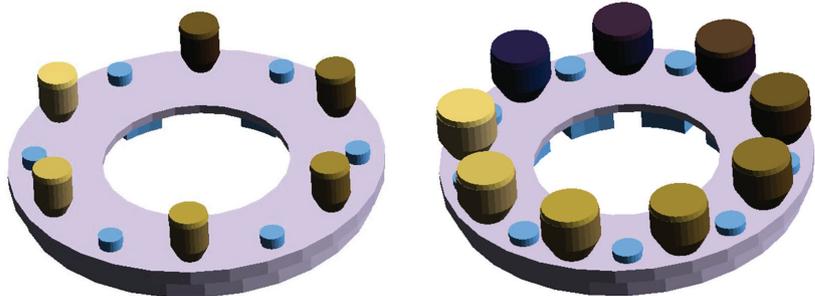
Einer der größten Vorteile des Gießprozesses ist gleichzeitig auch die größte Hürde bei der Durchführung von Verbesserungen: Alles geschieht gleichzeitig und ist gekoppelt. Änderungen an einem einzigen Prozessparameter wirken sich im Prozess auf viele Merkmale aus, die die Gussqualität bestimmen. Die auf mehrere Ziele gleichzeitig ausgerichtete selbsttätig ablaufende (oder: automatische) Optimierung liefert einen vielversprechenden Ansatz.

Die automatische Optimierung nutzt das Simulationswerkzeug als virtuelles Experimentierfeld und ändert die Füllbedingungen, die Anschmittauslegung oder die Prozessparameter, um auf diese Weise die optimale Route zum angestrebten Ziel zu finden. Verschiedene Parameter können geändert und mehrere Ziele unabhängig voneinander ausgewertet werden. Automatische Optimierungswerkzeuge verwenden den klassischen Ansatz der Gießerei-Ingenieure, um den besten Kompromiss zwischen diesen Zielen zu finden. Dadurch wird nicht nur der Bedarf an Testläufen zur Identifizierung des optimalen Prozessfensters weiter reduziert, sondern es wird eine detaillierte Auswertung zahlreicher Prozessparameter und deren einzelne Auswirkungen auf die Gestaltung eines robusten Prozesses möglich.

Prinzipiell kann man alles, was simuliert werden kann, auch optimieren. Dennoch ist Optimierung kein Ersatz für Prozess-Know-how und Fachwissen. Entgegen üblicher Annahmen muss auch der zukünftige Simulationsanwender die Ziele und insbesondere die Qualitätskriterien, die zum Erreichen der Ziele erforderlich sind, kennen. Die Fragen, die einem Programm gestellt werden, müssen einfach und klar sein, z. B.: Welche Gießtechnik ist am besten geeignet? Die Beantwortung dieser Frage erfordert quantitative Lösungen.

Das Prinzip von Versuch und Irrtum wird so nicht mehr im Betrieb, sondern am Computer praktiziert. Der Gießer legt seine Ziele für die Optimierung fest und kann die bestmögliche Lösung auswerten. Er erhält auch quantitative Informationen bezüglich der Empfindlichkeit, mit der der Gießprozess auf einzelne Prozessparameter reagiert und kann somit die Robustheit seiner Entwürfe beurteilen.

Der vorliegende Bericht liefert einen Überblick zum Stand der Technik bei der automatischen Optimierung anhand von ausgewählten Beispielen aus der Industrie.



**Bild 2: Versuchsplanung am Beispiel eines ringförmigen Stahlgussteils – aus der Variation einzelner Prozessparameter kann eine deutlich unterschiedliche Gießtechnik resultieren.**

Multikernrechnern Potentiale für die drastische Reduzierung von Rechenzeiten. Ein virtueller Gießversuch kann daher oft schon innerhalb weniger Minuten abgeschlossen sein und bietet so die Voraussetzung für eine Optimierung.

## Von der eindimensionalen Suche zur automatischen Optimierung

Durch aufeinanderfolgende Versuche, Prüfungen und schrittweise Verbesserungen einzelner Parameter werden akzeptable



**Bild 3:** Nabe einer Windenergieanlage – drei Konfigurationen mit verschiedenen Speisergrößen und Kühlleisenmustern. Die Kombination der Kühlleisen führt zu einer riesigen Anzahl möglicher Muster.

Fertigungsbedingungen erreicht. Niemand weiß, ob dieser Kompromiss ein echtes Optimum darstellt und wie robust das Prozessfenster hierfür ist.

Ein Beispiel macht das Problem deutlich: Für die Entwicklung der Gießtechnik eines Sandgussteils werden das Anschnittsystem, Speiser, Kühlleisen und Isolierungen in einer ersten Version vom Gießer ausgelegt. Dieser auf Erfahrung basierende Ansatz wird anschließend mit einer Simulation ausgewertet. Probleme werden identifiziert, was zu einer gießtechnischen Verbesserung führt. Dieser Vorgang wird

so oft wie nötig wiederholt, bis die gewünschte Gussqualität erreicht ist (**Bild 1**) [4, 5].

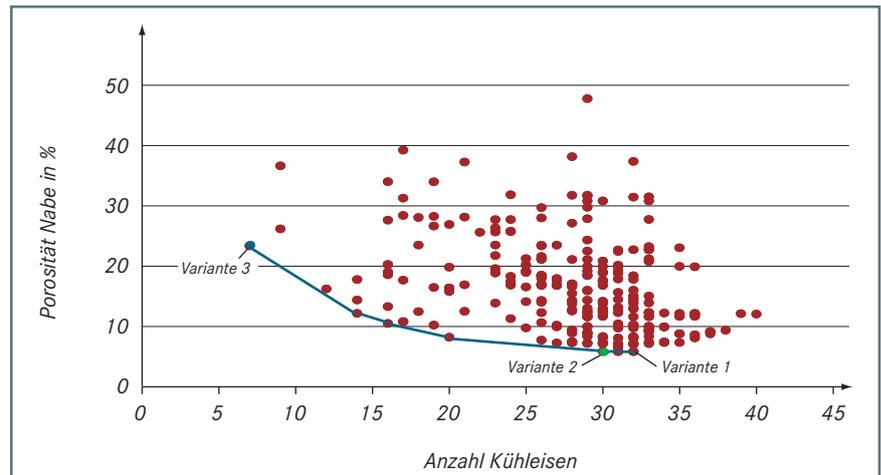
Die eindimensionale Suche (links in Bild 1) ist der Standardvorgang für die Optimierung eines Gießprozessentwurfs. Charakteristisch ist hier eine begrenzte Anzahl an Versuchen – mit dem Risiko, am Ende in einer Sackgasse zu landen. Vorgeschlagene Lösungen werden in der Regel nicht im Hinblick auf ihre Grenzen geprüft. Die eindimensionale Suche birgt einen weiteren Nachteil: Die Möglichkeit, erworbenes Wissen vom aktuellen Projekt zu neuen

Projekten zu übertragen, wird durch eine zunehmende Gussteil- oder Prozesskomplexität begrenzt.

Die Anforderungen an Produktivität und Robustheit des Produktionsprozesses steigen stetig an. Aus wirtschaftlicher Notwendigkeit ist eine präzise Planung des Gießkonzepts und des Herstellungsprozesses erforderlich. Es liegt nahe, bewährte Methoden der Versuchsplanung (DoE) auch im Bereich der Simulation zu nutzen. Bei der Versuchsplanung (**Bild 1** Mitte) werden in einem virtuellen Versuchsplan reale Experimente durch eine Reihe von Si-

mulationsläufen ersetzt. Ziel einer DoE ist es, die Auswirkungen der einzelnen Prozessparameter auf den Gießprozess zu bewerten, um danach sein Verhalten an jedem weiteren möglichen Arbeitspunkt vorherzusagen. Es erfordert eine bestimmte Mindestanzahl von virtuellen Abgüssen, um herauszufinden, welche Parameter die endgültigen Ziele, z. B. Gussqualität oder Herstellungskosten, beeinflussen. Um dies zu erreichen, werden die Parameter in dem Versuchsplan in einem realistischen Bereich variiert. Bei der Versuchsplanung stehen alle Parameterkombinationen zu Beginn des Prozesses bereits fest.

Der Anwender definiert die oberen und unteren Grenzwerte und die Schrittweite für jeden variierten Prozessparameter. So kann zum Beispiel die Gießtemperatur einer Aluminiumlegierung im Bereich zwischen 680 °C und 720 °C in Zehn-Grad-Schritten variiert werden. In einem anderen Beispiel könnten Anzahl und Größe von Speisern auf einem ringförmigen Stahlgussteil variieren (**Bild 2**). Dieses Beispiel verdeutlicht, dass aus der Variation einzelner Prozessparameter eine deutlich unterschiedliche Gießtechnik resultieren kann. In Bild 2 links sind sechs recht kleine Speiser auf der Oberfläche des Rings verteilt, während in der rechten Darstellung neun Speiser verwendet werden, die auch ein-



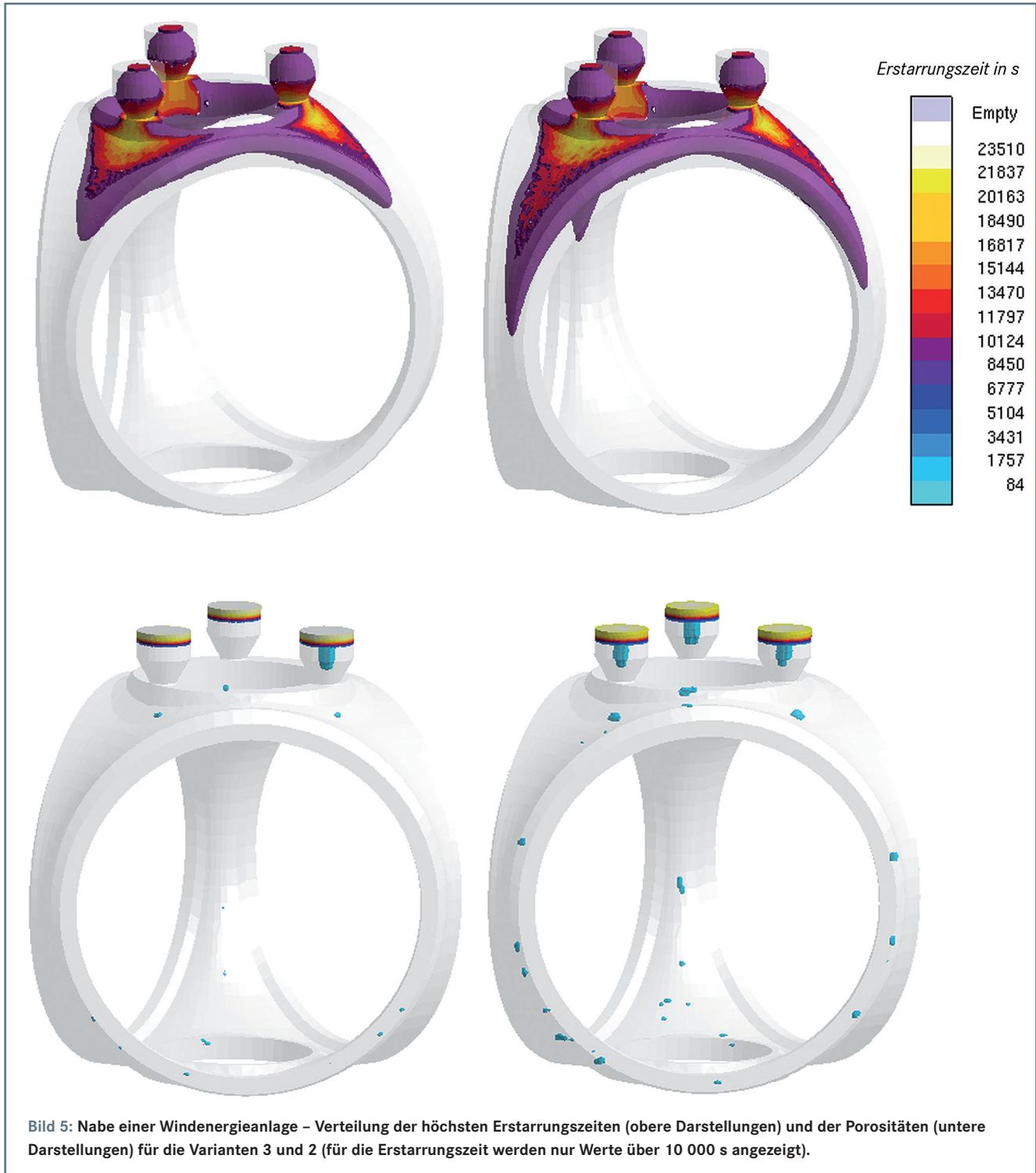
**Bild 4:** Porosität in der Nabe einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Kühlleisen. Die blaue Linie verbindet Gießprozessvarianten, die eine geringe Schwindung mit einer möglichst geringen Anzahl von Kühlleisen kombinieren.

zeln wesentlich größer als die Speiser in der linken Darstellung sind.

Der Versuchsplan wird basierend auf statistischen Regeln aufgestellt, danach werden die Simulationen gestartet. Der Optimierungsalgorithmus ermöglicht die automatische Durchführung einer Reihe von Simulationen ohne Eingriff des Anwenders. Voraussetzung für geometrische Variationen ist hierbei, dass die zu verändernden Teile des Simulationsmodells durch para-

metrische Geometrien definiert sind und dass diese automatisch geometrisch verändert werden können. Außerdem muss die Software in der Lage sein, die Geometrie für jede vorgeschlagene geometrische Änderung innerhalb von Sekunden neu zu vernetzen.

Nachdem alle Simulationen beendet wurden, kann der Anwender die Ergebnisse anhand seiner Ziele auswerten. Er kann schnell herausfinden, welche Parameter



den größten Einfluss auf die Ziele haben, also im vorliegenden Falle auf die Porositäten im Stahlgussteil. Basierend auf den Ergebnissen einer virtuellen DoE kann eine effiziente Optimierung der Ziele erreicht werden.

Je weniger über das Verhalten des Gießprozesses bekannt ist, desto wichtiger ist es, den vorstellbaren Bereich der Parameteränderungen abzudecken. Der Anwender hat die Möglichkeit, durch sein Fachwissen über den Gießprozess schneller zu einer guten Entscheidung zu kommen. Der Einsatz von Erfahrungswissen in Kombi-

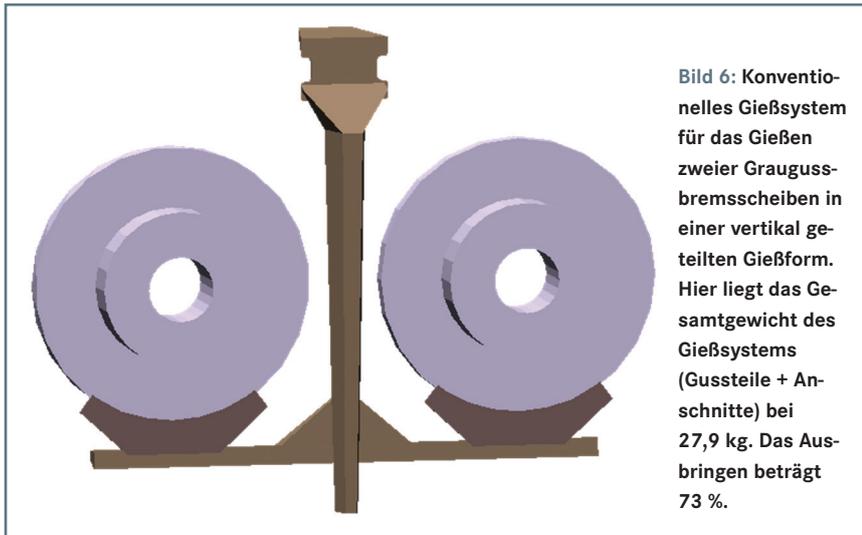
nation mit den mathematisch basierten Methoden der virtuellen DoE führt schnell zu Ergebnissen, selbst wenn eine große Zahl von Variablen berücksichtigt werden muss.

**Automatische rechnergestützte Optimierung**

Zur Durchführung einer automatischen Optimierung legt der Anwender nicht nur die Freiheitsgrade für die Prozessparameter, sondern auch die Ziele fest. Dies geschieht vor Durchführung der Simulatio-

nen. Mehrere, oft sogar widersprüchliche Ziele können gleichzeitig verfolgt werden (z. B. Gussqualität, Produktivität, Materialverbrauch).

Das Optimierungsprogramm führt zu Beginn automatisch eine erste Sequenz (oder: erste Generation, vgl. Bild 1 rechts) von Simulationen durch. Im Anschluss daran wertet das Programm die Ergebnisse automatisch gemäß den vom Anwender festgelegten Zielen aus. Danach erzeugt ein genetischer Algorithmus abhängig von den Simulationsergebnissen und den ausgewählten Zielen neue Varianten des Gieß-



**Bild 6: Konventionelles Gießsystem für das Gießen zweier Graugussbremscheiben in einer vertikal geteilten Gießform. Hier liegt das Gesamtgewicht des Gießsystems (Gussteile + Anschnitte) bei 27,9 kg. Das Ausbringen beträgt 73 %.**

prozesses. So werden beispielsweise Anschnitte und Speiser variiert. Dieses Verfahren folgt den Regeln der Evolution: Jedes Mal wird entschieden, ob eine Konstruktion behalten, verworfen oder geändert wird – oder ob sie mit einer bereits berechneten oder neuen Konstruktion kombiniert wird. Dieser Prozess wird wiederholt, bis Konstruktionsänderungen nicht mehr zu weiteren Verbesserungen führen. So wie in der biologischen Welt findet dieser Prozess über eine Reihe von Generationen statt.

Um die gewünschten Ziele zu erreichen, können Prozessparameter wie Gießtemperatur, Legierungselemente, Vorwärmen der Form, aber auch Geometrien (Anschnitt, Speiserauslegung) variiert werden. Die automatische Optimierung ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Ermittlung der optimalen Prozessgestaltung für jeden Gießprozess. Das Simulationsprogramm unterstützt den Entwicklungsprozess in einer Gießerei, da die Methode ohne Einschränkungen einsetzbar ist. In den letzten Jahren wurde die

automatische Optimierung für viele Bereiche der Gießertechnologie bereits genutzt. Einige typische Anwendungsfälle werden nachfolgend vorgestellt [6, 7, 8].

### Optimierung der Gießtechnik zur Herstellung der Nabe einer Windenergieanlage

Die Nabe einer Windenergieanlage muss die hohen statischen und dynamischen Lasten der Rotorblätter aufnehmen und diese auf die Welle übertragen. Eine hohe Gussteilqualität ist erforderlich. Die Optimierung des Gießprozesses zielt daher in erster Linie darauf ab, einen robusten Gießprozess unter Vermeidung von Gießfehlern zu erreichen. Daneben soll die Optimierung die Potentiale für eine Reduzierung der Fertigungskosten aufzeigen. Primäre Zielfunktion der hier betrachteten automatischen Optimierung ist jedoch die Verringerung der im Gussteil auftretenden Porositäten.

Im vorliegenden Fall wird die Gießtechnik für eine Nabe mit 5 t Gewicht optimiert.

Drei Speiser befinden sich oben auf dem Gussteil, direkt über den kritischen Bereichen mit der größten Masseanhäufung. Die optimale Kombination eingesetzter Kühlleisen für einen Erstarrungsablauf mit minimaler Fehleranzeige soll durch automatische Optimierung ermittelt werden (Bild 3).

Insgesamt können maximal 40 Kühlleisen an definierten Stellen der Gussteiloberfläche verteilt werden. Um von der vorgegebenen Symmetrie des Gussteils zu profitieren, werden die Kühlleisenkonfigurationen an den drei Rotorblattaussparungen gleich belassen. Dies verringert die Anzahl zu kombinierender Kühlleisen auf 20. Ein weiterer Freiheitsgrad ist die Größe (Modul) der drei Speiser – auch hier wird angenommen, dass die drei Speiser immer das gleiche Modul haben.

Der Optimierungsalgorithmus berücksichtigt durch geschickte Kombination von Freiheitsgraden 260 von mehr als 3 Mio. theoretisch möglichen Varianten (Bild 4). Man erkennt, dass es unter diesen Randbedingungen nicht möglich ist, ein absolut fehlerfreies Gussteil zu erreichen. Mit 32 Kühlleisen kann das Gussteil mit der geringsten Porosität (Variante 1) hergestellt werden. Die Gießtechnik hat jedoch immer noch Bereiche mit Porositätsanzeigen. Eine sehr gute Qualität kann mit 30 Kühlleisen erreicht werden (Variante 2). Die Verwendung einer größeren Anzahl von Kühlleisen führt nicht zur Reduzierung der Porosität im Gussteil.

In Bild 5 wird Variante 2 mit derjenigen verglichen, bei der die geringste Anzahl an Kühlleisen zum Einsatz kommt (Variante 3). Bei Variante 2 konzentrieren sich die zuletzt erstarrten Bereiche im oberen Teil des Gussteils, nahe den Speisern. Die Erstarrung in Variante 3 ist im Vergleich nachteilig – bei Variante 2 treten wesentlich weniger Porositäten auf als bei Variante 3.



**Bild 7: Bremscheibe mit stromlinienförmigem Anschnittsystem, drei mögliche Varianten.**



Bild 8: Vergleich des Formfüllens der Bremsscheiben: konventionelles (oben) gegenüber optimiertem stromlinienförmigen Gießsystem (unten).

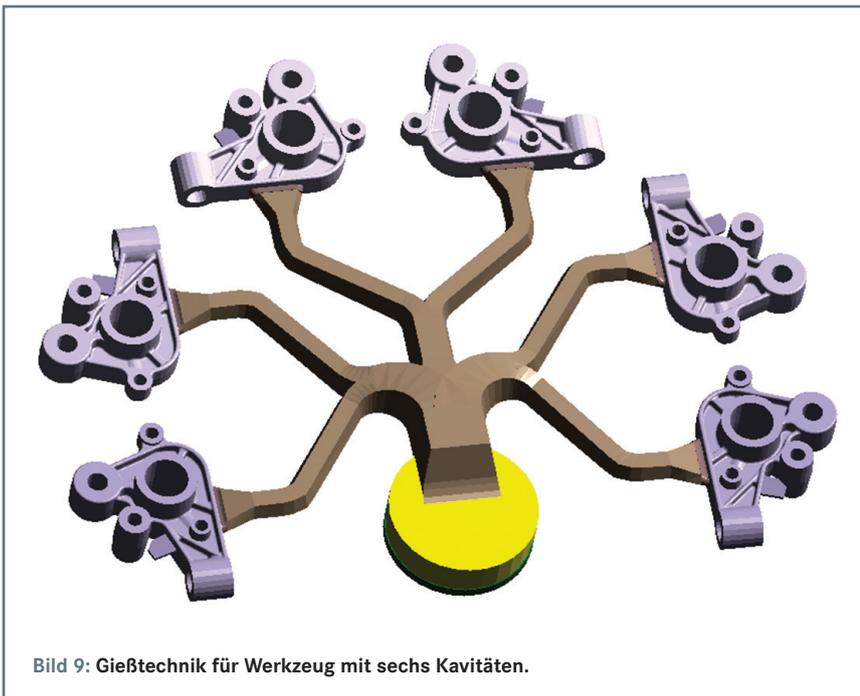


Bild 9: Gießtechnik für Werkzeug mit sechs Kavitäten.

**Optimierung des Formfüllens einer Bremsscheibe im Disamatic-Prozess**

Im Disamatic-Prozess werden Gussteile in Großserien hergestellt. Als Folge der hohen Produktivität ist die Forderung nach einem möglichst hohen Ausbringen vor-

rangig – das Gewicht des Gießsystems ist von hohem Interesse. Gleichzeitig müssen die Gussteile den erforderlichen Qualitätsanforderungen genügen.

Es hat sich gezeigt, dass die derzeit weit verbreiteten Gießsysteme ein beachtliches Verbesserungspotential aufweisen [8]. In Bild 6 ist eine typische Anordnung für die

Herstellung von zwei Bremsscheiben zu sehen. Für Bremsscheiben aus Gusseisen mit Lamellengraphit ist die in einem solchen System erreichte Gussteilqualität ausreichend. Das Gewicht der Gießläufe bietet Raum für Verbesserungen.

Um das Gewicht des Gießsystems zu reduzieren, wurde ein sogenanntes strömungsoptimiertes Anschnittsystem eingeführt [8]. Hierbei werden Umlenkungen oder scharfe Richtungsänderungen weitestgehend vermieden. Abgewinkelte Gießläufe werden durch bogenförmige Geometrien ersetzt und Blindläufe werden vermieden. Bild 7 zeigt eine Auswahl verschiedener möglicher Geometrien für ein druckloses System.

Das Ziel dieses Optimierungsprojekts war es, optimale Abmessungen für das Gießsystem zu ermitteln, sodass einerseits das Gussteilgewicht reduziert werden kann und andererseits die Qualität des Formfüllens verbessert wird. Als Mindestanforderung soll zumindest die Qualität der Standardauslegung erreicht werden.

Die Geometrie dieses Gießsystems wird beschrieben durch:

- > Gießlaufabmessungen,
- > Krümmung des Gießlaufs,
- > Verbindungspunkt von Einguss und Gießlauf,
- > Eingussabmessungen, -querschnitt,
- > Anschnittabmessungen und -position.



Bild 10: Drei verschiedene Varianten des Gießsystems.

Alles in allem werden die Freiheitsgrade von zehn verschiedenen Geometrieparametern berücksichtigt. Wesentliches Ziel der Optimierung ist die Reduzierung des Gießsystemgewichts. Zur Bewertung der Prozessqualität werden zwei verschiedene Qualitätskriterien untersucht:

- > Ausmaß der Verwirbelung im Schmelzestrom,
- > Menge der eingeschlossenen Luft, die mit der Schmelze in die Gussteilkavität befördert wird.

160 Simulationen wurden bei der automatischen Optimierung durchgeführt. Als Ergebnis wurde die Auslegung eines stromlinienförmigen Anschnittsystems von der Software vorgeschlagen. Bild 8 zeigt einen Vergleich des Formfüllens der Bremsscheiben mit dem konventionellen Gießsystem und dem optimiertem stromlinienförmigen Gießsystem. Der Umfang der Verwirbelungen ist in beiden Fällen vergleichbar. Die Analyse zeigt, dass das stromlinienförmige Gießsystem zu weniger Lufteinschlüssen im Gussteil führt. Das Volumen sowie die Masse des Gießsystems wurden durch die Optimierung jeweils um 18 % reduziert. Das Ausbringen mit dem stromlinienförmigen Anschnitt beträgt 77 % gegenüber 73 % bei der konventionellen Gießtechnik.

### Gleichmäßiges Formfüllen mit minimalem Lufteinschluss beim Druckgießen

Die kleineren Gussteile werden beim Druckgießen in Mehrfachformen gegossen. Zum Erreichen einer homogenen Produktqualität soll ein möglichst gleichzeitiges Füllen der Formnester unter Vermeidung lokaler Geschwindigkeitsspitzen erreicht werden.

Die Wahl des Verlaufs der Querschnitte für die sechs Gießläufe (Bild 9) wird bisher durch den Gießer basierend auf Erfah-

rung und bewährten Tabellen getroffen, hier ist sie Aufgabe des Optimierungsprogramms. Zu diesem Zweck wird die Geometrie im Simulationsprogramm Magmasoft dreidimensional parametrisch modelliert. Bild 10 zeigt beispielhaft einige mögliche Auslegungen des Laufsystems.

Für jede Variante steht nach der Simulation die Füllzeit der einzelnen Formnester zur Verfügung. Dies ist die Zeitspanne, die vom Beginn der ersten Phase bis zum vollständigen Füllen der jeweiligen Kavität vergangen ist. Als Zielfunktion sollte das Optimierungsprogramm durch Wahl der Laufquerschnitte die Füllzeitunterschiede in den einzelnen Formnestern so gering wie möglich halten.

Neben dem Erreichen eines gleichmäßigen Formfüllens sollte auch die Bildung von Lufteinschlüssen in den Gussteilen möglichst minimiert werden. Hierzu kann die Intensität des Kontaktes von Schmelze mit Luft als Maß für die Turbulenz der Schmelzeoberfläche und damit der Menge an eingeschlossener Luft ausgewertet werden.

Bild 11 zeigt den Wert für den Luftkontakt in den Formnestern über der berechneten Füllzeitdifferenz für 486 berechnete Varianten. Die im Vergleich als „gut“ bewerteten Varianten liegen im linken unteren Bereich des Diagramms, wo ein homogenes Formfüllen bei gleichzeitig kleinstmöglichem Luftkontakt festgestellt wurde. Die eingezeichnete blaue Linie kennzeichnet die nach den Zielfunktionen besten Varianten. Der beste Kompromiss zwischen beiden Zielen (gleichmäßige Füllzeit und minimaler Luftkontakt) ist die in dem Diagramm grün markierte Variante. Das letztendlich gewählte Optimum ergibt sich nach Gewichtung der beiden Ziele durch den Gießer.

Bild 12 zeigt das Füllen des Formhohlraumes zu zwei verschiedenen Zeitpunkten für das entsprechende Laufsystem. Die Formnester werden gleichzeitig gefüllt – man kann hier von einem wirklich gleichmäßigen Formfüllen sprechen.

Bei der Optimierung von Druckgießprozessen ist es unerlässlich, zu jeder untersuchten Geometrievariante die Schusskur-

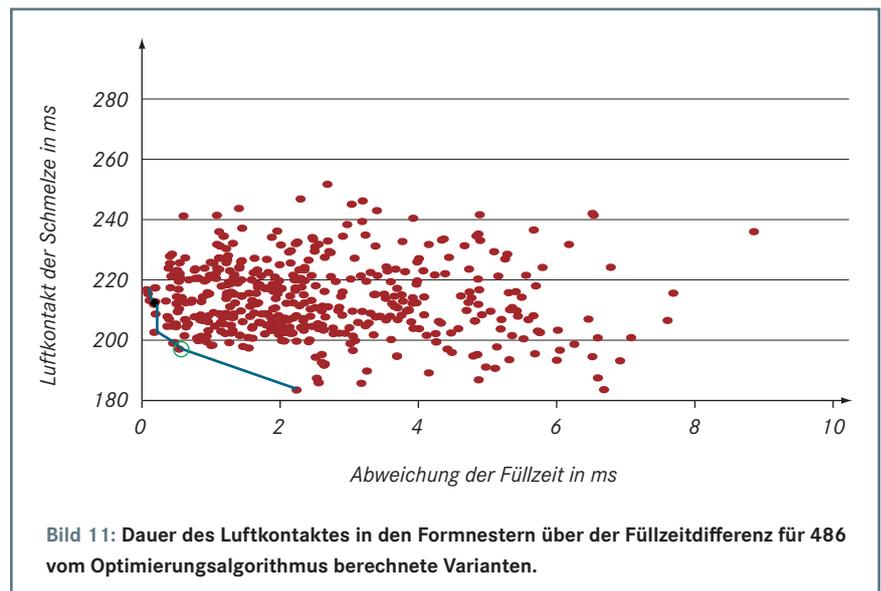
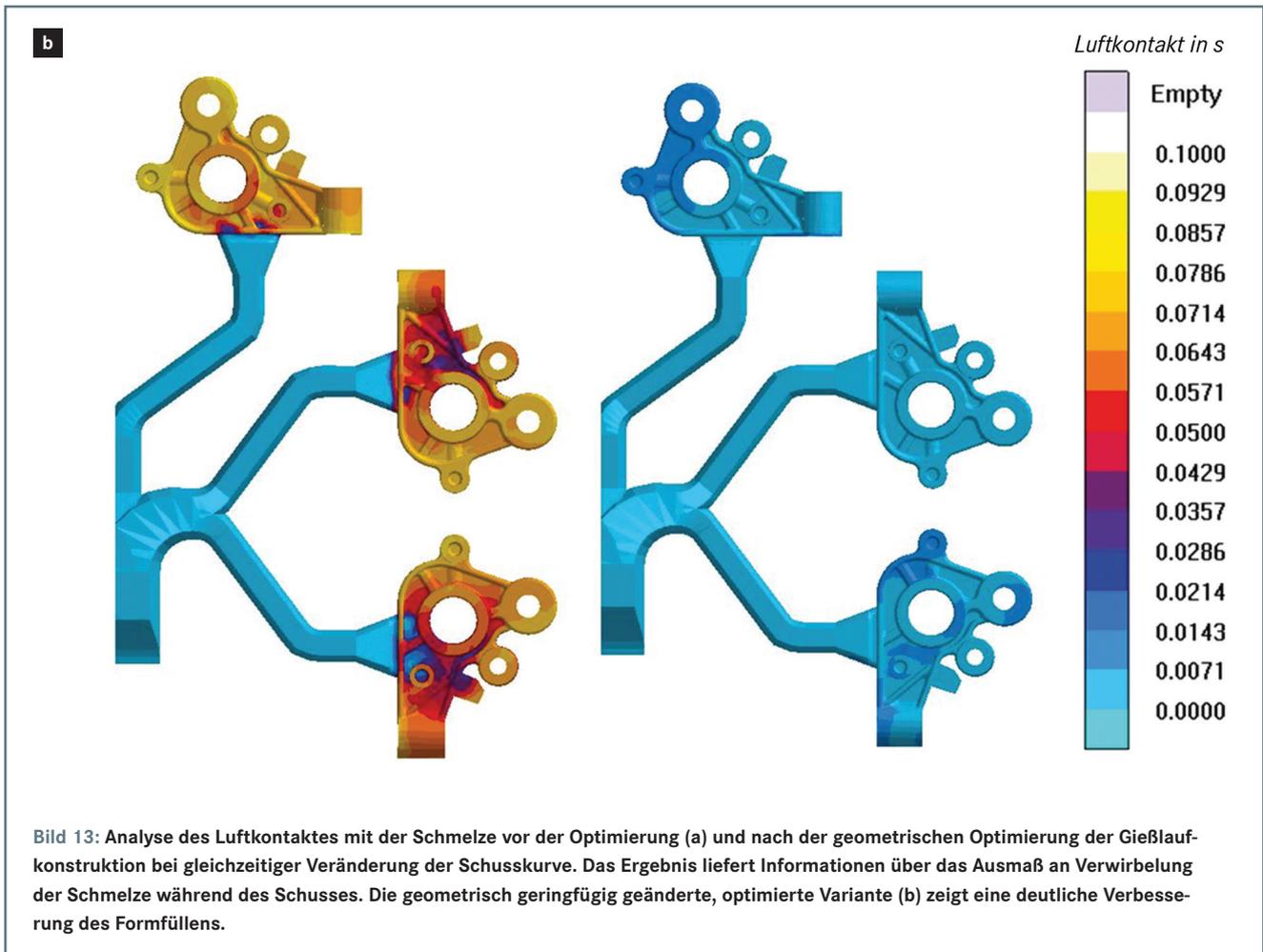
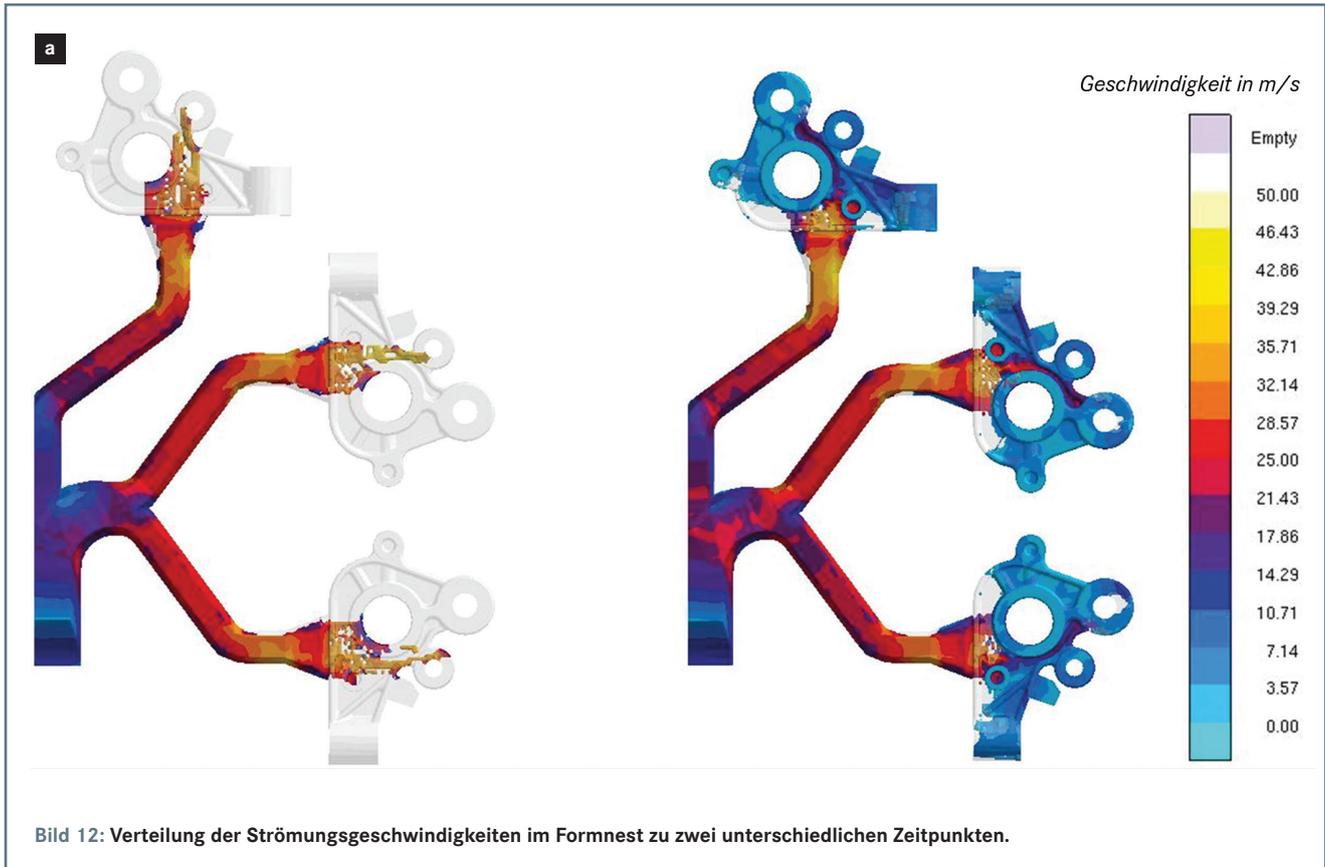


Bild 11: Dauer des Luftkontaktes in den Formnestern über der Füllzeitdifferenz für 486 vom Optimierungsalgorithmus berechnete Varianten.



ve anzupassen. Die Anpassung des Umschaltzeitpunktes und der Geschwindigkeit des Gießkolbens in der zweiten Phase erfolgt ebenfalls im Vorfeld jeder einzelnen Simulation automatisch durch die Software. In **Bild 13** ist die durch die Optimierung erzielte Verbesserung des Luftkontaktes zu sehen.

### Zusammenfassung

Die automatische Gießprozessoptimierung ist eine attraktive Alternative zur klassischen empirischen Optimierung von Gießtechnik und -prozessen. Es werden wertvolle Informationen bezüglich der Sensitivität der Prozessparameter verfügbar. Dies hilft dem Fachmann, einen robusten Gießprozessentwurf bereits weitgehend vor

dem ersten realen Abguss auszulegen. Gute Gussteile werden in der Gießerei produziert. Die Anwendung virtueller Methoden bietet die Möglichkeit, dies gleichzeitig effizient und wirtschaftlich zu bewerkstelligen. Der zukünftige Weg für Gießprozessentwürfe ist vorbestimmt.

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

### Literatur:

- [1] Montgomery, D. C.: *Design and analysis of experiments*. 4. Auflage, John Wiley and Sons, 1997.
- [2] Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; Hunter, J. S.: *Statistics for experimenters*. John Wiley and Sons, 1978.
- [3] Egner-Walter, A.; Hahn, I.; Simon, W.: Ver-

- kürzung des Entwicklungsprozesses von Gussteilen durch Einsatz von virtueller DoE*. 5. VDI-Tagung „Gießtechnik im Motorenbau“, 10./11. Februar 2009, Magdeburg.
- [4] Hahn, I.; Sturm, J. C.; Heisser, C.: *Design of experiments and casting process simulation*. AFS Proceedings 2010, American Foundry Society, Schaumburg, IL, USA.
- [5] *Giesserei 96* (2009) Nr. 7, S. 36-41.
- [6] *Giesserei 91* (2004) Nr. 10, S. 22-30.
- [7] *Giesserei 95* (2008) Nr. 9, S. 36-45.
- [8] Sturm, J. C.: *Optimierung von Gießtechnik und Gussteilen*. Symposium „Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung“, 5.-7. November 2003, Bremen.
- [9] Skov-Hansen, S.; Tiedje, N.: *Reduced energy consumption by using streamlined gating systems*. China Foundry Association Congress – 8, 2008, Shanghai, China.