

6. Ausblick

Aktuell wird die CO₂-Reduktion bei Fahrzeugen durch die drohenden Strafzahlungen hauptsächlich nur beim Fahrtrieb vorangetrieben. Gemäß Studien entstehen bis zu 30% der CO₂-Emissionen von Fahrzeugen in der Herstellungsphase und 70% in der Nutzungsphase. Deshalb wird in Zukunft für eine CO₂-Reduktion auch noch stärker die gesamte Prozesskette, d.h.: auch der Energieaufwand für die Herstellung der Komponenten in die Bilanz mit einbezogen werden müssen. Werkstoffe und Prozesse mit geringerem CO₂-Ausstoß sollten sich durchsetzen und die Entwicklung in diese Richtung noch stärker gefördert werden. Dabei sind unter anderem Kreislaufschließung, Reduktion von Material- und Energieeinsatz sowie die Vermeidung von Toxizitäten wesentliche Zielgrößen.

Eine wirksame CO₂-Reduktionsstrategie abzuleiten ist nur möglich, wenn die im Produktleben auftretenden Umweltauswirkungen erkannt und in Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden. Dazu muss der ganze Produktlebenslauf beurteilt werden [9].

Als Beispiel kann hier der Einsatz von Aluminium zur Gewichtsreduzierung dienen. Der Energieaufwand für ein Zylinderkurbelgehäuse aus Primär-Aluminium ist dreimal so hoch wie für ein Gehäuse aus Gusseisen [10]. Wenn man Sekundär-Aluminium einsetzt, wird die Bilanz gleich wesentlich besser und man benötigt deutlich weniger Fahrkilometer, um den höheren Energieaufwand bei der Herstellung zu kompensieren.

Nicht nur die Werkstoffauswahl, sondern auch das Giessverfahren selbst kann die CO₂-Bilanz wesentlich beeinflussen. Zum Beispiel kann die Wärmeenergie, die durch das Schmelzen im Kupolofen entsteht, im Sinne einer CO₂-Reduktion weiter genutzt werden. Das Maggi-Werk in Singen nutzt die Heißgase der benachbarten Giesserei von Georg Fischer Automobilguss in Singen, um Satteldampf für seine Produktionsanlagen zu erzeugen. So bleiben der Umwelt mehr als 11.000 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr erspart [11].

Literaturverzeichnis:

- [1] VDA, Broschüre „Handeln für den Klimaschutz“, Stand August 2009, 2. überarbeitete Auflage
- [2] EU (2009), Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, Europäische Union (EU) Strassburg, April 2009
- [3] EU (2007), Verordnung 2007/46/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge
- [4] B. Rohr: „Antriebsstrangvielfalt und Elektrifizierung: Herausforderungen und Chancen für die Automobilindustrie“, Vortrag am 31. Internationalen Wiener Motorensymposium 2010
- [5] M. Goede, H. Ferkel, J. Stieg: „Mischbauweisen Karosseriekonzepte – Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau“, Vortrag am 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2005
- [6] G. Rau: „Bionik und Guss – eine gute Kombination“, Aluminium Praxis, 10/2009, 10
- [7] R. Backhaus: „Kolben aus Stahl für Pkw-Dieselmotoren“, MTZ 12/2009
- [8] S. Obermaier, S. Kleiner, L. Zeipper, „SiMo1000 – Hochtemperaturbeständiger Gusseisenwerkstoff als Innovation der Georg Fischer Automotive AG“, Giesserei-Praxis, 7–8/2009, 236–242
- [9] D.A. Notter, M. Gauch, R. Widmer: „Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles“, Environmental Science & Technology, 9. Aug. 2010
- [10] E. Fritsche: „Vergleich der Energieeffizienz und CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Zylinderkurbelgehäusen aus Gusseisen oder aus Aluminiumlegierungen“, Giesserei-Rundschau, 56 (2009)
- [11] Presseinformation Georg Fischer vom 20.01.2009: „Maggi nutzt Abwärme von GF Automotive“, <http://www.georgfischer.com>

Kontaktadresse:

Georg Fischer Automotive AG, Marketing & Kommunikation
 CH-8201 Schaffhausen, Amsler-Laffon-Straße 9
 Tel.: +41 (0)52 631 2114, sinem.gizli@georgfischer.com
www.automotive.georgfischer.com

Verkürzung des Entwicklungsprozesses von Gussteilen durch Einsatz von virtueller Versuchsplanung

Reduction of Development Time of Castings by Application of Virtual Design of Experiments DoE



Dr.-Ing. Achim Egner-Walter,
 Leiter Advanced Engineering bei der MAGMA Gießereitechnologie GmbH in Aachen/D

Dr.-Ing. Ingo Hahn,
 Produktmanager Optimierung bei der MAGMA Gießereitechnologie GmbH in Aachen/D



Dipl.-Ing. Walter Simon
 Chassis MBB & Technical Specialist, FORD Werke AG, Köln

Kurzfassung

Der Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie bedarf einer kontinuierlichen Anpassung an immer schärfere Wettbewerbsbedingungen. Dazu gehört insbesondere die Verkürzung der Entwicklungszeiten. Möglich wurde dies durch den parallelen statt seriellen Ablauf von Arbeitsschritten sowie durch die Entwicklung und stetige Verbesserung von Simulationsprogrammen. Versuche mit Hardware als hauptsächlich Methode verbieten sich aus Zeit- und Kostengründen und können nur noch als abschließende Bestätigung eingesetzt werden. Die Simulation von Herstellungsprozessen und funktionalen Belastungen, gepaart mit dem Wissen erfahrener Ingenieure, ist hier die Lösung. Eine weitere Reduktion der Entwicklungszeit kann durch Übertragung von Methoden der statistischen Versuchsplanung (DoE) in die virtuelle Bauteil- und Prozessentwicklung erreicht werden. Mit ihrer Hilfe kann sehr effektiv der Einfluss einer Vielzahl von Geometrie- und Fertigungsparametern auf die Bauteilqualität untersucht werden.

In diesem Beitrag wird am Beispiel eines Aluminium-Kurbelgehäuses mit eingegossenen Laufbuchsen gezeigt,

wie mit Hilfe virtueller Versuchsplanung die Entwicklung eines Fertigungsprozesses effizient und kostengünstig ablaufen kann. Dabei werden u.a. die Kaltlaufneigung im Bereich der Buchse, die Eigenspannungen im Stegbereich sowie die Gefügeausbildung untersucht. Als wesentliche Einflussgrößen werden Geometrieparameter wie der Buchseninnendurchmesser und Prozessparameter wie Gießtemperatur, Zahl der Kühlkokillen oder Vorwärmtemperatur der Laufbuchsen berücksichtigt. Ergebnisse der virtuellen DoE sind die optimalen Geometrie- und Fertigungsparameter sowie das zulässige Prozessfenster.

1. Der Entwicklungsprozess gestern und heute

Der Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie ist gekennzeichnet von einer permanenten Verkürzung der Zeitspanne von einer ersten Produktidee bis zur Markteinführung. Aus ehemals 5 Jahren für diesen Vorgang sind bei im Markt führenden Firmen inzwischen Zeitspannen von 36 Monaten und weniger geworden. Möglich wurde dies einmal durch den parallelen statt seriellen Ablauf von Arbeitsschritten, weiterhin durch den Fortschritt in der Computertechnik und daraus resultierend die Entwicklung und stetige Verbesserung von Simulationsprogrammen.

Den nächsten großen Schritt in Richtung verkürzte Entwicklungszeiten für Gussteile bringt der sogenannte integrierte CAE-Entwicklungsprozess [1]. In diesem werden Bauteil und Fertigungsprozess simultan optimiert, **Bild 1**.

Der Vergleich mit dem konventionellen Entwicklungsprozess zeigt zum einen, dass die Fertigungssimulation deutlich früher stattfinden muss, damit die Ergebnisse direkt in die Prototypenherstellung einfließen können. Zum anderen reicht eine einzelne Fertigungssimulation nicht aus. Der Fertigungsprozess ist dann optimal, wenn er auf die geforderten Gussteileigenschaften ausgerichtet und robust ist, d.h. unkritisch hinsichtlich typischer Schwankungen in der Fertigung.

Der Nachweis eines robusten Fertigungsprozesses ist sehr schwierig, da die Gussteilqualität von einer hohen Zahl von Parametern beeinflusst wird. Würde man alle möglichen Einflussgrößen untersuchen, ergäbe sich ein immens hoher Erprobungsaufwand. Daher hat man bereits frühzeitig Verfahren entwickelt, die eine hohe Aussagefähigkeit bei begrenzter Anzahl von Versuchen besitzen. Ein solches Verfahren ist die Methode der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE), [2]. Diese Methode wird schon seit einiger Zeit bei praktischen Versuchen erfolgreich eingesetzt, bietet sich aber auch gerade für Simulationsrechnungen an.

In diesem Beitrag wird die Methode der statistischen Versuchsplanung (DoE) erstmals für die Entwicklung eines robusten Fertigungsprozesses eingesetzt. Am Beispiel des Gießens von Aluminium-Kurbelgehäusen mit eingegossenen Laufbuchsen aus Gusseisen werden exemplarisch die Einflüsse verschiedener Fertigungsparameter auf die Anbindung des Aluminiums an die Laufbuchsen, die Gefügequalität in den Verschraubungsbereichen sowie die Eigenspannungen im Stegbe-

reich untersucht. Aus den Ergebnissen werden die Parameter für einen bezüglich der gewählten Parameter robusten Gießprozess abgeleitet und die zulässige Schwankungsbreite der Parameter berechnet.

2. Simulation anstatt Versuch: Virtuelle Versuchsplanung als Werkzeug in der Gussteilentwicklung

Die statistische Versuchsplanung ist ein methodischer Ansatz, einen strukturierten Versuchsplan aufzustellen und mit statistischen Methoden auszuwerten. Das Ziel eines Versuchsplans ist es, mit einer minimalen Anzahl von Versuchen signifikante Abhängigkeiten von Parametern nachzuweisen. Mit einem Modellansatz können anschließend Regressionsgleichungen aufgestellt werden, mit denen sehr einfach durch Eingabe der Parameter die zugehörigen Ergebnisse berechnet werden können. Auf Basis der Regressionsgleichungen kann dann sehr schnell eine Parameteroptimierung vorgenommen werden.

Bei einer virtuellen Versuchsplanung wird diese Methodik auf die Simulation, in diesem Falle auf die Gießsimulation, angewendet. Dabei wird eine gewählte Zahl von Fertigungsparametern variiert. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen zeigen nicht nur die Stärke der Auswirkung jedes Parameters auf das Ergebnis, sondern auch noch mögliche Wechselwirkungen der Einflussgrößen untereinander. Mit Hilfe der Regressionsgleichungen und der darauf vorgenommenen Parameteroptimierung können die optimalen Fertigungsparameter ermittelt und gleichzeitig die Breite des Prozessfensters festgelegt werden.

Obwohl die Stärke der virtuellen DoE darin liegt, mit einer minimalen Anzahl von Berechnungen optimale Fertigungsparameter zu ermitteln, sollte nicht verschwiegen werden, dass sie eine leistungsfähige Hardware erfordert. Allerdings wurde die Simulationssoftware im Hinblick auf eine massiv parallele Nutzung auf sog. Clustern weiterentwickelt. Durch Kombination der Simulationssoftware mit einem Optimierungsprogramm ist es möglich, mehrere Varianten parallel zu berechnen und automatisch auszuwerten. Damit kann eine virtuelle Versuchsplanung für einen Gießprozess binnen 10 Tagen durchgeführt und ausgewertet werden.

3. Einsatz der virtuellen Versuchsplanung in der Entwicklung eines Aluminium-Kurbelgehäuses mit eingegossenen Laufbuchsen

Aluminium-Kurbelgehäuse mit eingegossenen Laufbuchsen sind nach wie vor in vielen Benzin- und auch Dieselmotoren zu finden. Ursachen hierfür sind das, gegenüber Kurbelgehäusen aus Eisenguss, geringere Gewicht sowie die geringere Wärmekapazität. Diese ermöglicht ein schnelles Warmfahren und damit geringere Emissionen des Triebwerks in dieser für die Einhaltung der Grenzwerte wichtigen Phase.

Obwohl vielerorts Erfahrungen in der Auslegung der Konstruktion und des Fertigungsprozesses vorliegen, ist die Entwicklung eines neuen Kurbelgehäuses keine Routine. Typische

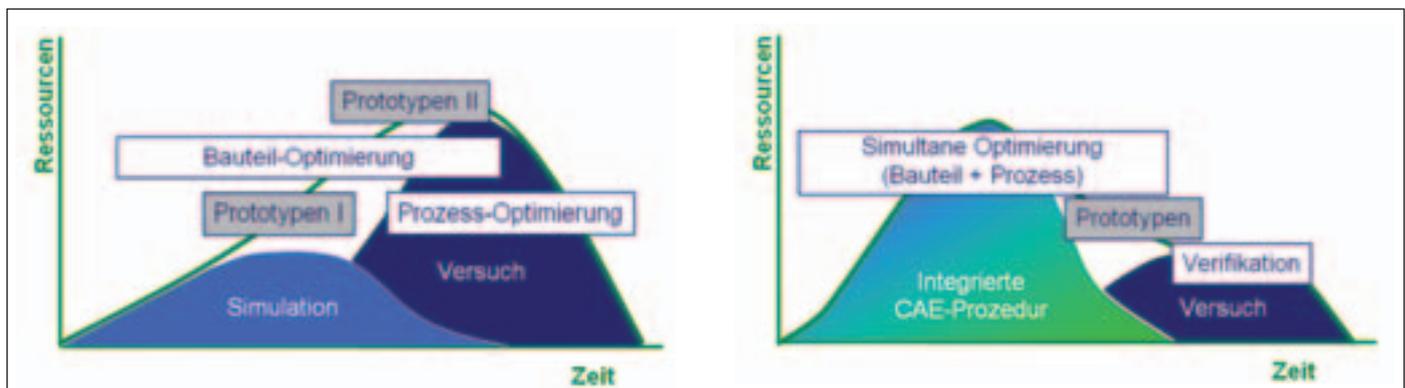


Bild 1: Verkürzung des Entwicklungsprozesses durch simultane Optimierung von Gussteil und Fertigungsprozess

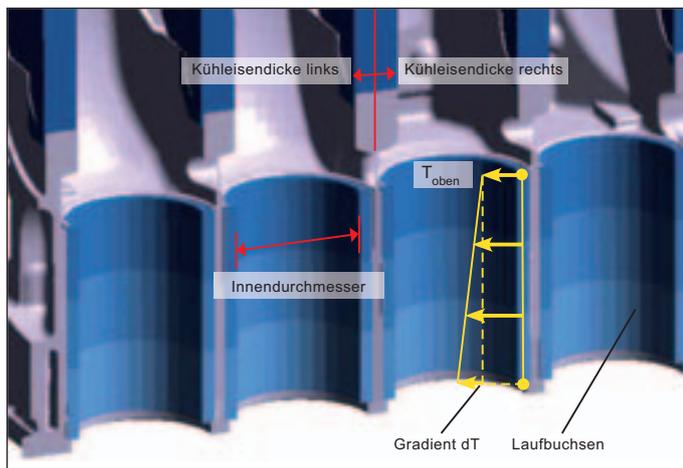


Bild 2: Variable Geometrie- und Prozessgrößen

Aufgabenstellungen sind die Gewährleistung einer guten Anbindung des Aluminiums an die Buchse, die Vermeidung von Steg-Rissen aufgrund von Eigenspannungen sowie die Gewährleistung eines feinen Gefüges in den kritischen Bereichen der Zylinderkopfverschraubung.

Im Folgenden wird für das existierende Kurbelgehäuse eines Ford-Motors gezeigt, wie mit Hilfe einer virtuellen DoE ein robuster Fertigungsprozess ausgelegt werden kann. Das Kurbelgehäuse wird im Sandpaket aus der Legierung AlSi8Cu3 gegossen. Um eine gute Anbindung des Aluminiums an die Buchse zu gewährleisten, werden die Buchsen vor dem Gießen vorgeheizt.

Die Vorgehensweise ist anfangs analog zur Definition einer „normalen“ Gießsimulation. Es wird das Geometriemodell mit Gussteil, Gieß- und Speisungssystem, Kernen, Kühlkokillen und Form benötigt. Wenn Geometrievarianten betrachtet werden sollen, müssen diese ebenfalls vorliegen. Anschließend wird der Gießprozess definiert.

3.1 Aufbau des Versuchsplans

Im ersten Schritt werden maßgebliche Qualitätsmerkmale festgelegt. Diese sind wie oben bereits beschrieben die Anbindung des Aluminiums an die Buchse, die Eigenspannungen im Stegbereich sowie die Gefügefinesheit in den Schraubenanbindungen. Im zweiten Schritt werden die als kritisch eingestuften Prozessgrößen bestimmt. In diesem Fall sind dies die Gießtemperatur, die Vorheiztemperatur der Buchsen und der Tempera-

turgradient über die Buchsenhöhe, die Buchsendicke sowie die Stegkühlungen links und rechts, **Bild 2**.

Um den Rechenaufwand überschaubar zu halten, werden nur die Randwerte der Prozessgrößen untersucht. Damit ergibt sich die in **Tabelle 1** dargestellte Simulationsmatrix mit 6 Variablen. Für eine vollständige DoE-Sequenz müssten $2^6=64$ Simulationen durchgeführt werden. Mit nur geringen Einschränkungen der Aussagekraft der DoE genügt in der Regel eine sogenannte „half-faktorielle“ Sequenz mit 32 Simulationen. Um eventuelle Nichtlinearitäten zu identifizieren, wird zusätzlich ein sog. Zentralpunkt eingeführt, in dem alle Variablen mit einem Mittelwert belegt werden. Insgesamt werden also 33 Gießsimulationen durchgeführt. Die Gießsimulationen werden mit Hilfe des Optimierungsmoduls MAGMAfrontier definiert und von diesem automatisch gesteuert und ausgewertet.

Parameter	Minimum	Maximum
Kühleisendicke links	0 mm	20 mm
Kühleisendicke rechts	0 mm	20 mm
Innendurchmesser d. Laufbuchsen	71 mm	79 mm
Vorheiztemperatur d. Buchsen am ob. Ende	200°C	400°C
Vorheiztemperatur d. Buchsen am unt. Ende	50°C	150°C
Gießtemperatur	680	720 °C

Tabelle 1: DoE-Matrix

In der Gießerei sind bei vergleichbarem Vorgehen für Prototypen und Auswertung ungefähr 3 Monate anzusetzen. Die Simulationen und Auswertungen können innerhalb von 10 Tagen durchgeführt werden. Somit können 90% der Zeit eingespart werden.

3.2 Definition von Auswertegrößen und Auswertebereichen der DoE

Das erste Qualitätsmerkmal ist die Anbindung des Aluminiums an die Laufbuchse. Diese wird schlecht, wenn die Schmelze während der Formfüllung zu erstarren beginnt und so zäh wird, dass sie die raue Oberfläche der Laufbuchsen nicht mehr vollständig benetzt. Dieser Zustand wird erreicht, wenn der Festkörperanteil in der Schmelze zu hoch wird. Die Grenze wird bei der vergossenen Legierung AlSi8Cu3 bei ca. 560 °C erreicht. Bei dieser Temperatur springt der Anteil erstarrter Schmelze von 30% auf 60%, **Bild 3**.

Das zweite Qualitätsmerkmal ist die Feinheit des Gefüges im Bereich der Schraubenanbindung. Als Maß für die Feinheit wird der sekundäre Dendritenarmabstand SDAS verwendet.

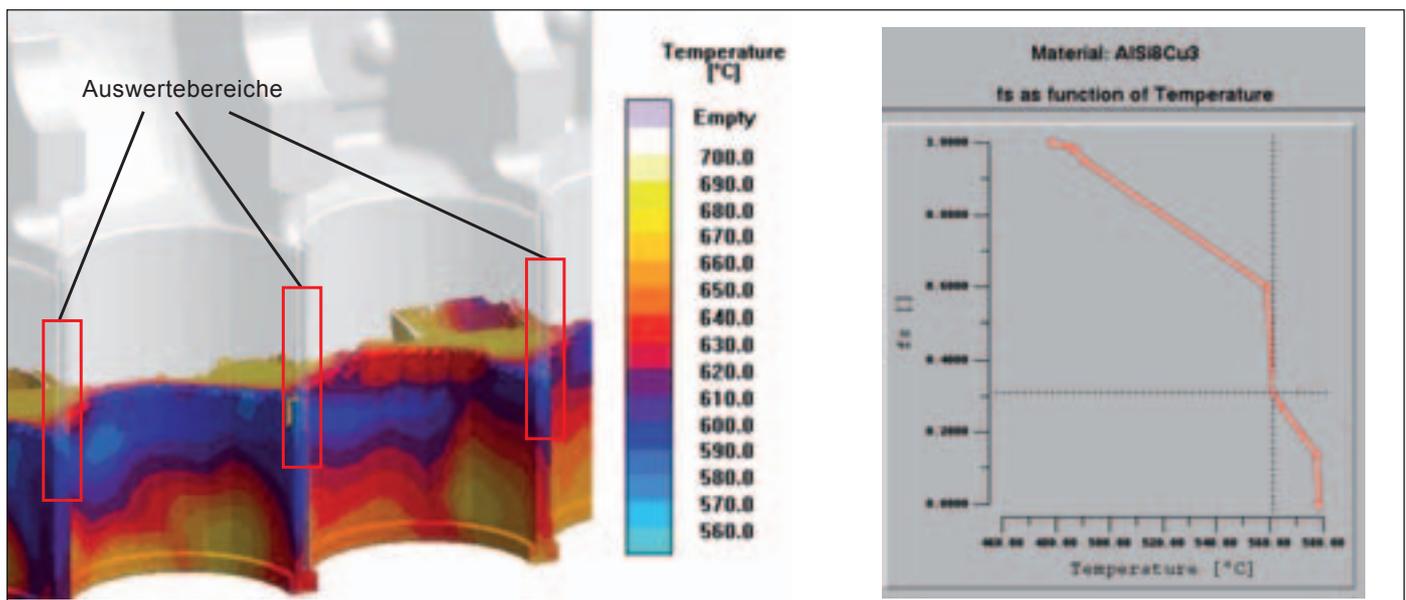


Bild 3: Beurteilung der Buchsenanbindung im Steg mit Hilfe des Temperaturfeldes während der Formfüllung (links). Die kritische Temperatur wird aus dem Erstarrungsverlauf der Legierung gewonnen (rechts).

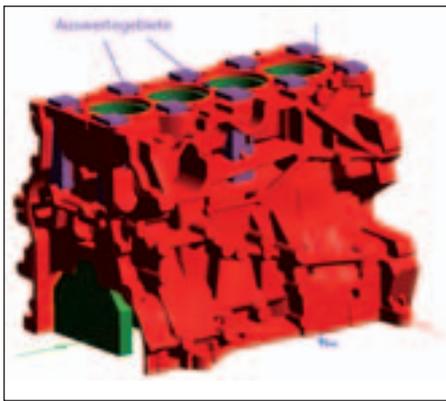


Bild 4: Definition der Auswertgebiete im MAGMASOFT®-Preprocessor

Der SDAS ist eine im Schlibbild gut messbare GefügekenngroÙe. Gleichzeitig ist der SDAS mit den lokalen Erstarrungsbedingungen, insbesondere den Erstarrungs- und Abkühlraten sowie den Temperaturgradienten an der Erstarrungsfront gekoppelt. Diese wiederum bestimmen Gefügecharakteristika wie die KorngröÙe oder die Ausprägung der Gasporositäten, die durch Wasserstoffausscheidungen aus der Schmelze entstehen.

Das dritte Qualitätsmerkmal sind die Eigenspannungen nach dem Gießen. Diese können direkt mit der Gießsimulation berechnet und mit der experimentell ermittelten Dehngrenze und Zugfestigkeit verglichen und bewertet werden.

Da die Ergebnisse, wie oben beschrieben, nicht im gesamten Gussteil sondern in bestimmten Bereichen ausgewertet werden, müssen diese für die Simulation in Form von Geometriebereichen festgelegt werden, **Bild 4**.

3.3 Auswertung der DoE

Im Rahmen der DoE wurden 33 MAGMASOFT®-Simulationen durchgeführt. Die konventionelle Auswertung aller dieser Berechnungen würde einen enormen Zeitaufwand bedeuten. Mit Hilfe von statistischen Methoden kann dieser Aufwand drastisch reduziert werden [3]. Die allgemeine Vorgehensweise bei der Auswertung von Simulationsrechnungen mit statistischen Methoden wird im Folgenden beschrieben.

Für eine erste Übersicht bietet sich das sog. Haupteffekte-Diagramm an, **Bild 5**.

Hier wird deutlich, welche EinflussgröÙen eine signifikante Wirkung auf die ErgebnisgröÙen haben. Nahezu waagrechte Linien bedeuten, dass der Parameter keine nennenswerte Wirkung bei der Variation in den betrachteten Grenzen hat, deutliche Steigungen der Geraden bedeuten eine signifikante Wirkung.

Die minimale Schmelzetemperatur während der Füllung des Stegbereichs wird ganz wesentlich durch die Vorheiztemperatur der Buchse sowie die Temperaturverteilung in der Buchse beeinflusst. Die Gießtemperatur hat hierauf (innerhalb des gewählten Bereichs von 680°C bis 720°C) nur wenig und die Stegkühlung sowie der Innendurchmesser der Buchse keinen Einfluss.

Der Dendritenarmabstand SDAS als Maß für die Qualität des Gefüges liegt im Stegbereich in dem für Sandgussteile typischen Wertebereich von 40 µm bis 80 µm. Der bewertete Mittelwert schwankt zwischen 55 µm und 75 µm. Er wird von den Kühlmaßnahmen im Stegbereich, der Gießtemperatur und der Vorheizung der Laufbuchsen stark beeinflusst. Der Innen-

durchmesser der Buchse sowie der Temperaturgradient in der Buchse haben dagegen nur geringen Einfluss auf den SDAS.

Die Eigenspannungen entstehen aufgrund des unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Gusseisen. Aufgrund der geringen Breite liegen die Eigenspannungen im Stegbereich teilweise deutlich oberhalb von Rp0,2, **Bild 7**.

Die Zugfestigkeit, die im Gusszustand nur ca. 150 MPa beträgt, kann bei ungünstiger Wahl von Geometrieabmessungen und Prozessparametern überschritten werden, d.h. der Steg kann bereits während der Abkühlung in der Gießform reißen. Die Höhe der maximalen Eigenspannungen hängt stark von der Dicke der Buchsen ab, die anderen Parameter zeigen nur untergeordnete Wirkung.

Aus den Ergebnissen wird sofort sichtbar, dass keine in allen Belangen optimale Lösung möglich ist, da die Wirkungen zum Teil gegenläufig sind. Zum Beispiel verbessern hohe Gießtemperaturen und hohe Vorheiztemperaturen die Anbindung des Aluminiums an die Laufbuchse (Kriterium „minimale Schmelzetemperatur“), verschlechtern aber gleichzeitig die Gefügeeigenschaften, repräsentiert durch den sekundären Dendritenarmabstand.

Für eine genaue Auslegung des Gießprozesses müssen daher die Mindestanforderungen für die einzelnen ErgebnisgröÙen festgelegt werden, d.h. wie klein muss zum Beispiel der SDAS im Brennraumbereich mindestens sein oder wie hoch dürfen die Eigenspannungen maximal sein. Dies erfordert die Erfahrung der Gießer und der Konstrukteure.

Die Auswertung der DoE erlaubt es, auch eine quantitative Voraussage über die Effekte von Parametervariationen zu tätigen. Dazu wird eine Regressionsgleichung für alle Auswerte-

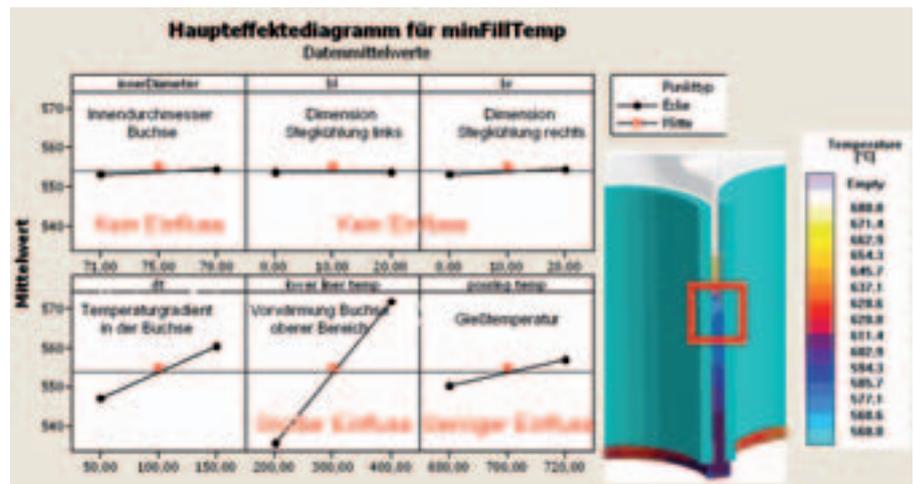


Bild 5: Haupteffekte-Diagramm für die minimale Schmelzetemperatur während der Füllung des Stegbereichs

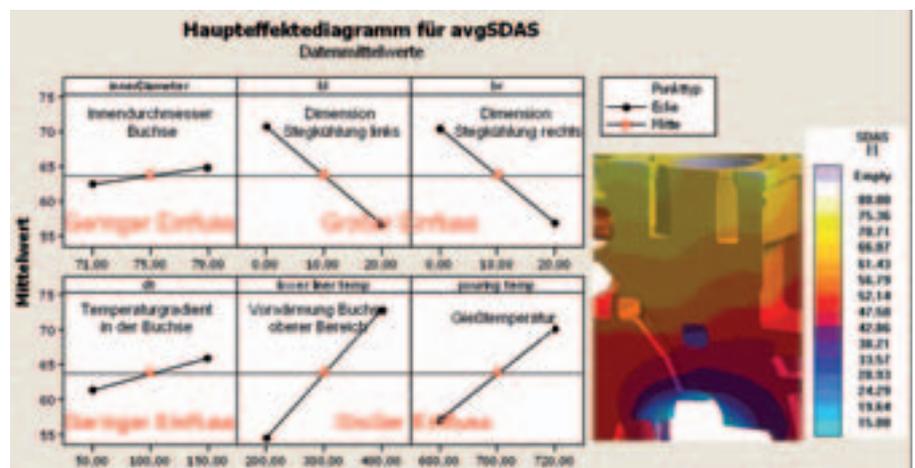


Bild 6: Haupteffekte-Diagramm für den SDAS im Bereich der Zylinderkopf-Verschraubung

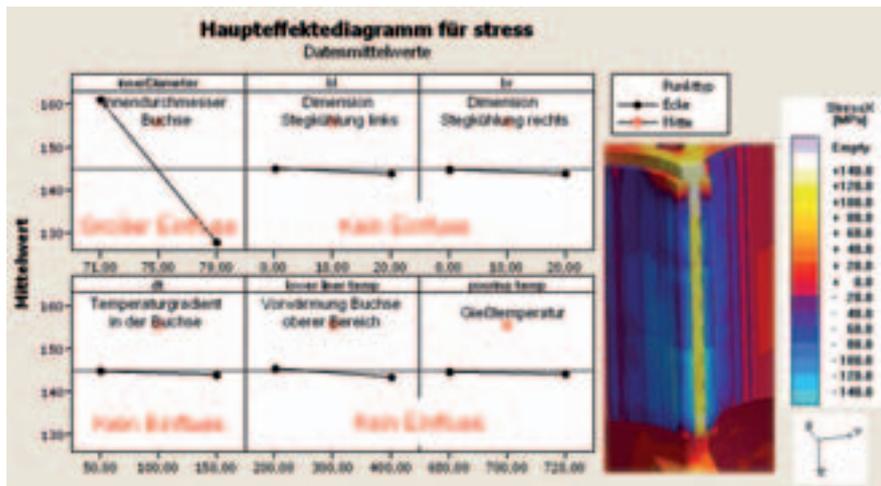


Bild 7: Haupteffekte-Diagramm für die maximalen Eigenspannungen im Stegbereich

größten erstellt. Die Regressionsgleichung erhält als Variable die in der DoE angegebenen Parameter, hier exemplarisch für den SDAS angegeben:

$$\begin{aligned}
 SDAS = & a * \text{Innendurchmesser Buchse} + b * \text{Stegkühlung links} \\
 & + c * \text{Stegkühlung rechts} + d * \text{Temperaturgradient Buchse} \\
 & + e * \text{Vorwärmung Buchse} + f * \text{Gießtemperatur} \\
 & + g * \text{Innendurchmesser Buchse} * \text{Stegkühlung links} \\
 & + h * \text{Stegkühlung links} * \text{Stegkühlung rechts} + \dots
 \end{aligned}$$

Die Werte für die Koeffizienten a, b, c, d, e, f, sind das Ergebnis der Regressionsanalyse. Für jeden Term der Gleichung wird ein Signifikanzwert berechnet, der dessen Einfluss auf das Ergebnis angibt. Diejenigen Terme, die keinen oder nur geringen Einfluss auf das Ergebnis haben, werden aus der Regressionsgleichung entfernt. Als Ergebnis erhält man einen Satz von Gleichungen, mit dem sehr einfach durch Eingabe der jeweiligen Parameter die zugehörigen Auswertegrößen berechnet werden können. Zur Bestimmung der optimalen Fertigungsparameter kann nun auf Basis der Regressionsgleichungen optimiert werden, was nur wenige Sekunden in Anspruch nimmt.

Die dargestellte Form der Regressionsgleichung setzt weitgehend lineare Abhängigkeiten zwischen Fertigungsparametern und Auswertegrößen voraus. Werden bei der Auswertung nichtlineare Zusammenhänge festgestellt, so müssen nichtlineare Regressionsgleichungen erstellt werden. Deren Bestimmung erfordert eine deutlich umfangreichere DoE-Sequenz.

Die ermittelten optimalen Fertigungsparameter und das zugehörige Prozessfenster sind in Bild 8 dargestellt.

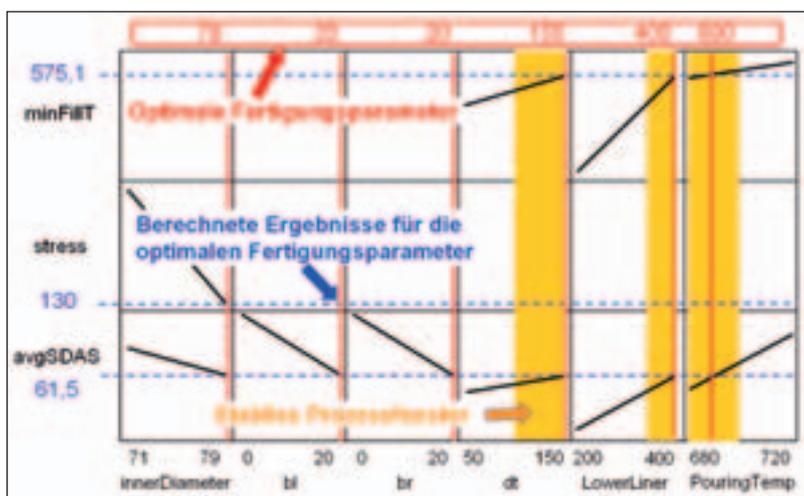


Bild 8: Berechnete optimale Prozessparameter

Der innere Durchmesser der Laufbuchsen beeinflusst lediglich die Eigenspannungen signifikant. Da die Eigenspannungen bei einem möglichst großen Innendurchmesser minimal werden, sollte dieser möglichst nah am Durchmesser des Fertigteils gewählt werden. Die Stegkühlungen beeinflussen im Wesentlichen die Gefügefinesse und sollten daher in jedem Fall und mit der Stärke von 20 mm anliegen. Kritische Größen sind die obere und untere Vorwärmtemperatur der Buchsen. Zum einen haben beide einen erheblichen Einfluss auf die Anbindung des Aluminiums an die Laufbuchsen und zum anderen auf die Gefügefinesse im Stegbereich. Im Zusammenspiel mit der Gießtemperatur lässt sich jedoch ein guter Kompromiss finden. Dazu werden die Vorwärmtemperaturen so hoch wie möglich gewählt, andererseits die Gießtemperatur mit nur 690°C eher niedrig.

Neben den optimalen Gießparametern ist in Bild 8 auch noch die Breite des Prozessfensters dargestellt. Berücksichtigt man eine typische Schwankung der Gießtemperatur um +/- 0°C, dann bleibt für die Vorheiztemperatur der Buchsen noch eine Schwankungsbreite von 50°C, bevor ein Absinken der Schmelzetemperatur zwischen den Stegen auf unter 560°C zu erwarten ist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die virtuelle statistische Versuchsplanung (virtuelle DoE) ist ein geeignetes Verfahren zur virtuellen Auslegung eines robusten Gießprozesses. Am Beispiel eines Aluminium-Kurbelgehäuses mit eingegossenen Laufbuchsen konnte gezeigt werden, welche Fertigungsparameter den größten Einfluss auf die Anbindung des Aluminiums an die Laufbuchsen, die Feinheit des Gefüges im Schraubenbereich sowie die Eigenspannungen im Stegbereich besitzen. Durch eine Parameteroptimierung basierend auf der mit der DoE gewonnenen Regressionsgleichung konnten die optimalen Fertigungsparameter sehr schnell berechnet werden. Gleichzeitig wurde das zulässige Prozessfenster unter Berücksichtigung einer typischen Fertigungsstreuung ermittelt.

Die Anwendung der virtuellen DoE für die Auslegung robuster Gießprozesse steht erst am Anfang. Noch ist die Zahl der berücksichtigten Fertigungsparameter aufgrund der Rechenzeiten sehr begrenzt. Durch Nutzung massiv parallelierter Software und die immer weiter voranschreitenden Multi-Core-Technologien ist die Anwendung dieser Methodik aber heute schon möglich.

Mit dieser Technologie rückt die Vision eines vollständig integrierten CAE-Entwicklungsprozesses, bei dem Gussteil und Gießprozess simultan optimiert werden, ein Stück näher.

Literatur:

- [1] Menne, R.J.; Weiss, U.; Brohmer, A.; Egner-Walter, A.; Weber, M.; Oelling, P.: Einsatz der Gießprozesssimulation zur Bauteil-Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung von Entwicklungszeit und -kosten - Ausgewählte Beispiele aus der Ford-Motorenentwicklung. 28. Internationales Wiener Motoren-symposium 2007
- [2] Montgomery, D. C.: Design and Analysis of Experiments, 4th Edition, John Wiley and Sons, 1997
- [3] Einführung in MINITAB 15, Minitab Inc., 2007

Kontaktadresse:

MAGMA Gießereitechnologie GmbH
 D - 52072 Aachen, Kackertstraße 11
 Tel.: +49 (0)241 88901 0, Fax: 62
 E-Mail: info@magmasoft.de
 www.magmasoft.de