

FOTO: MAGMA

Gussbauteile, bei denen gezielte Eigenschaftsverbesserungen durch Einlegeteile erreicht werden, sind grundsätzlich gießtechnisch anspruchsvoll. Effekte wie die Beeinflussung der Gussteilgefüge oder des Verzuges lassen sich jedoch mit Hilfe der gießtechnischen Simulation vorhersagen.

# Werkstoffkombinationen in Leichtbaukomponenten

## Berechenbare Einflüsse aus der Gussteilfertigung

VON GÖTZ HARTMANN, AACHEN

### Vorhersage der Eigenschaften hybrider Gusskomponenten

Leichtbaukomponenten können durch besondere Konstruktionen oder durch Verwendung spezieller Werkstoffe realisiert werden. Unter den zahlreichen denkbaren Möglichkeiten zur Gewichtsreduzierung weist die Werkstoffkombination bei gegossenen Bauteilen ein hohes Potential auf. Den Eigenheiten der Werkstoffkombination muss jedoch von der Konstruktion bis zur Fertigung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Bei gegossenen Komponenten führt die Kombination von Werkstoffen z. B. zu speziellen, komplexen Eigenspannungsverhältnissen oder zu spezifisch auftretenden Phänomenen bei der Gussfertigung. Mithilfe der Gießprozesssimulation, also der rechnerischen Simulation des Formfüllens, der Erstarrung, der Gefüge- und Eigenschaftsbildung, können heute viele dieser Phänomene vorausgesagt und bewertet werden, sodass eine methodisch erarbeitete Grundlage für die üblicherweise not-

wendigen konstruktiven und fertigungstechnischen Verbesserungsmaßnahmen zur Verfügung steht.

### Werkstoffeigenschaften – lokale Erstarrungs- und Abkühlbedingungen – Verteilung der Bauteileigenschaften

Bei der Konstruktion und der rechnerischen Auslegung von Gussteilen nach Steifigkeit oder Dauerfestigkeit wird meistens von genormten Werkstoffeigenschaften ausgegangen. Dabei bleibt die Tatsache unberücksichtigt, dass lokal unterschiedliche Bedingungen bei der Erstarrung und der Abkühlung des Gussteils auf Raumtemperatur zu lokal unterschiedlichen Gefügen und damit lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führen.

Eine hohe Erstarrungsgeschwindigkeit, genauer gesagt eine hohe Geschwindigkeit der Erstarrungsfront, unterstützt unter anderem die Bildung eines geringen Dendritenabstandes, feinerer Körner und damit höherer Korngrenzenenergien oder veringert Verzug. Alle diese Gefügeparameter haben einen Einfluss auf die me-

chanischen Eigenschaften des Werkstoffes wie Bruchdehnung, Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul, aber auch auf die Wöhlerkurve. Da die Erstarrungsgeschwindigkeit durch Wanddickenunterschiede oder durch abschreckend wirkende Einlegeteile bei hybriden Bauteilen lokal unterschiedlich ist, werden sich auch die genannten mechanischen Eigenschaften in bestimmten Grenzen im Gussteil verteilen.

Auch die weitere Abkühlung nach der Erstarrung läuft aus diesen Gründen im Gussteil lokal unterschiedlich ab, wobei sich in verschiedenen Bereichen unterschiedliche Phasen bilden oder sich ein und dieselbe Phase unterschiedlich ausbilden kann. Das gilt auch für die Wärmebehandlung, wo z. B. unterschiedliche Abkühlraten beim Abschrecken zu einer ungleichmäßigen Verteilung der mechanischen Eigenschaften führen können.

Schließlich können auch den Gießverfahren ganz charakteristische Verteilungen der mechanischen Eigenschaften zugeordnet werden. Beim Druckgießen führen das rasche Formfüllen – die meisten Formen werden in einer Zeit von weniger als 100 ms gefüllt – und die hohen Drücke

in der Schmelze mit dem sich daraus ergebenden guten Kontakt der Schmelze mit der kalten Formwand zu einer sehr dichten, feinkörnigen und seigerungsfreien Gushaut. Diese führt oft zu höheren Zeitstandfestigkeiten bei Wechselbeanspruchungen als es die Werkstoffeigenschaften der Legierung erwarten lassen.

Zu den charakteristischen Eigenschaften von Gussteilen gehören auch die Eigenspannungen, die gerade bei hybriden Gussteilen durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der üblicherweise beteiligten Werkstoffe entstehen. Bei allen Aluminium- und Magnesiumgussteilen, in denen Einlegeteile aus Gusseisen, Stählen oder Magneten bestimmte Funktionen übernehmen, schrumpft der Matrixwerkstoff auf das Einlegeteil auf. Dieser Vorgang ist grundsätzlich damit verbunden, dass der Matrixwerkstoff - Aluminium oder Magnesium - unter Zugeigenspannung gerät, die dann mit den entstehenden Druckeigenspannungen im Einlegeteil im Gleichgewicht steht. Dieser Vorgang der Spannungsentstehung in hybriden Gussteilen ist zwangsläufig, wird aber in vielen Fällen bei der Bauteilauslegung nicht berücksichtigt.

### Materialmodelle, Geometriemodelle und Ablauf einer Gießprozesssimulation

Für die rechnerische Simulation von Gießprozessen werden Materialmodelle verwendet, die je nach Legierung zahlreiche, für den Metallguss charakteristische Phänomene beschreiben.

#### Für die Rheologie

Solange Metalle beim Formfüllen nicht unter die Solidustemperatur abkühlen, ändert sich die Viskosität kaum mit der Temperatur oder mit dem Gehalt an Legierungselementen. Die Oberflächenspannung kann eine größere Rolle spielen, insbesondere, wenn an der freien Schmelzeoberfläche Oxidschichten gebildet werden. Entsprechende Modelle sind Stand der Technik. Komplizierter wird die Schmelzeströmung, wenn die Erstarrung vor Vollenden des Formfüllens einsetzt und die teilerstarrte Schmelze eine scherraten- und temperaturabhängige Viskosität aufweist. Außer bei Gießverfahren, bei denen bewusst eine teilerstarrte Schmelze mit Festanteilen bis über 35% in die Form gepresst wird, wird dieser Zustand jedoch vermieden. Auch diese Modelle sind Stand der Technik.

#### Für die Erstarrung

Die Erstarrung metallischer Schmelzen beginnt meistens an Keimen, die in jeder Schmelze vorhanden sind. Der Keimbildungshaushalt wird weitgehend vom Gie-

## KURZFASSUNG:

Aluminium- und Magnesiumgussbauteile spielen im Leichtbau eine große Rolle. Die Anwendungsbereiche werden ständig erweitert, die spezifischen Anforderungen an die Werkstoffe steigen. Oft reichen dann die mechanischen oder tribologischen Eigenschaften der Gusswerkstoffe nicht mehr aus, die Einsatztemperaturen sind zu hoch oder chemische Angriffe zu aggressiv. Dann können lokale Bauteileigenschaften durch umgossene Einlegeteile - je nach Anforderungen meistens aus Stahl oder Gusseisen - an die Anforderungen angepasst werden.

Die Einlegeteile führen beim Gießen zu verschiedenen, teilweise nicht unkritischen Phänomenen. Die Schmelze wird zum Beispiel lokal abgeschreckt, wodurch Fließwege beim Füllen der Form behindert werden können. Durch die ungleichmäßige Abkühlung des Gussteils entstehen Eigenspannungen, Verzug und unter Umständen Risse. Dieselben Probleme können durch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeausdehnungen der gepaarten Werkstoffe entstehen.

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie sich mögliche Eigenspannungen, Verzug und Rissbildung bereits vor den ersten Abgüssen oder der Wärmebehandlung berechnen und gegebenenfalls reduzieren lassen. Als Beispiele dienen mehrere Aluminium- und Magnesiumgussteile mit Einlegern aus Stahl oder Gusseisen bzw. Magneteinlegern. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe der gießtechnischen Simulation die Entstehung von Eigenspannungen nachvollzogen und so eine Grundlage für konstruktions- oder fertigungstechnische Verbesserungsmaßnahmen gefunden werden kann.

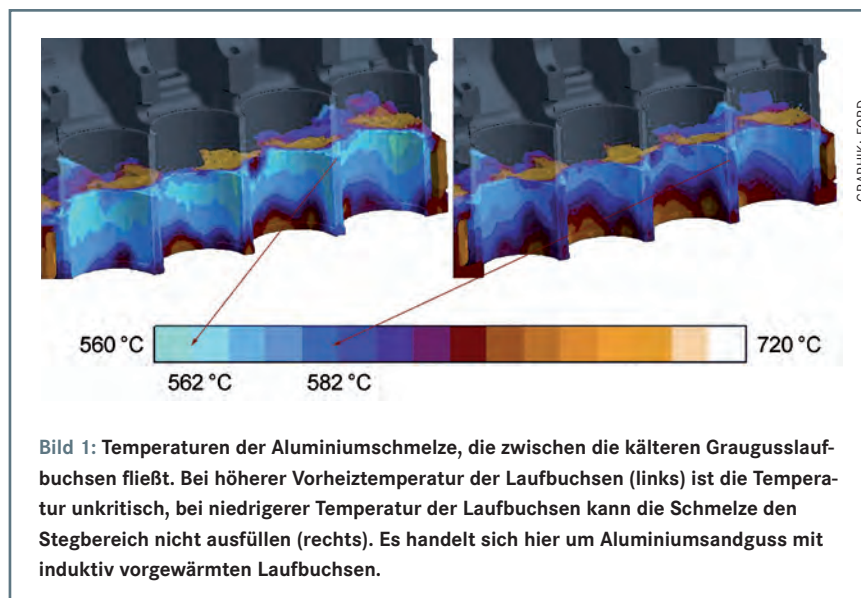
ßer eingestellt, der damit auch spätere Eigenschaften der Gussteile wie Korngröße, Ausbildung eutektischer Zellen oder Phasenausbildung beeinflusst. Zwischen dem Beginn der Erstarrung bei Liquidustemperatur und dem Abschluss bei Solidustemperatur folgt die Zunahme des Anteils erstarrter Phase mit sinkender Temperatur bestimmten Erstarrungsmodellen. Sowohl der Keimbildungshaushalt als auch verschiedene Erstarrungsmodelle werden bei der Simulation der Gussteilerstarrung verwendet. Diese Modelle sind in der Lage, die Erstarrung auch unter Ungleichgewichtsbedingungen - wie sie grundsätzlich beim Gießen gelten - abzubilden. Auf diese Weise können mit der Gießprozesssimulation nicht nur die Bildung des Gusskörpers in Abhängigkeit der Temperatur,

sondern auch die Bildung verschiedener Phasen im Gefüge oder Parameter wie der Dendritenabstand bestimmt werden.

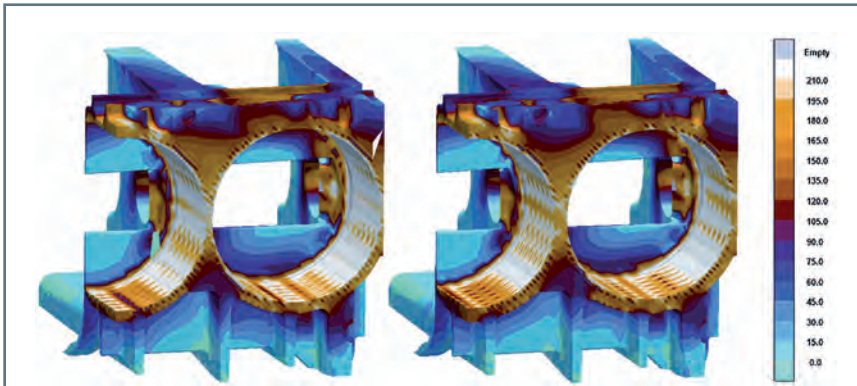
#### Für die Bildung von Eigenspannungen und Verzug

In diesem Bereich ist die Verwendung elastoplastischer Modelle Stand der Technik. Für die Abbildung von Kriechvorgängen bei hohen Temperaturen oder bei der Wärmebehandlung werden üblicherweise viskoplastische Modelle eingesetzt.

Bei der Gießprozesssimulation geht es grundsätzlich um die Berechnung von Bauteilen. Deswegen werden neben den Materialmodellen auch die Geometriemodelle - 3-D-CAD-Modelle - von Gussteilen, Angussystemen und Speisern, Formen, Kokillen und Gießwerkzeugen benötigt.







**Bild 2: Maximale Hauptspannungen (die höchsten auftretenden Zugeigenspannungen) im Aluminium rund um eine Laufbuchse im Gusszustand. Erkennbar sind die hohen Eigenspannungen im Zwickel zwischen zwei Laufbuchsen und die ungleichmäßigen Spannungen rund um die Laufbuchse. Bei geringerem Abstand der Laufbuchsen (links) sind die Spannungen mit 206 MPa höher als bei größerem Abstand mit 187 MPa (rechts). Es handelt sich hier um einen Druckgussmotorblock.**

Diese werden automatisch vernetzt, wobei die automatische Vernetzung von z. B. kompletten Druckgießwerkzeugen mit Temperierkanälen, dem Gussteil mit Gießlauf und Überläufen in wenigen Minuten Stand der Technik ist.

**Fallbeispiel Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse mit Graugusslaufbuchsen**

Solche Motorblöcke sind heute Stand der Großserientechnik. Beim Sandgießen werden die Laufbuchsen aus Grauguss (Gusseisen mit Lamellengraphit (EN-GJL)) in die Form gelegt und vorgeheizt und beim Druckgießen vorgewärmt in das Gießwerkzeug gelegt. In beiden Fällen werden die Laufbuchsen dann vom flüssigen Aluminium umströmt, welches beim Kontakt mit den Laufbuchsen beschleunigt abkühlt und schneller erstarrt als die Schmelze, die nicht in Kontakt mit Laufbuchsen kommt. Dabei kann es unter Umständen dazu kommen, dass die Schmelze nicht komplett ausläuft und vor Beendigung des Formfüllens in kleinen Bereichen bereits erstarrt. Bei der weiteren Abkühlung des Gussteils kommt es auf jeden Fall durch die herrschenden Temperaturgradienten sowie die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und Steifigkeiten von Aluminium und Gusseisen zu Eigenspannungen. Beide Phänomene können kritisch werden, sind jedoch mit Hilfe der Gießprozesssimulation berechenbar.

**Fließverhalten von Aluminium zwischen Graugusslaufbuchsen**

Der Bereich zwischen den Laufbuchsen ist beim Formfüllen von Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen mit GJL-Laufbuchsen oft kritisch. Im Sinne des Leichtbaus können

zum Beispiel die Abstände zwischen den Laufbuchsen minimiert werden. Zahlreiche Bauteile im und um den Motor können dann ebenfalls kleiner dimensioniert werden – Kurbelwelle, Nockenwellen, Ansaug- und Abgaskrümmen spielen dabei sicher die größte Rolle. Die Minimierung des Laufbuchsenabstandes geht jedoch mit dem steigenden Risiko einher, dass die Aluminiumschmelze die Zwickele zwischen den Laufbuchsen nicht mehr ausfüllt. Dieses Risiko ist mit Hilfe der Gießprozesssimulation erkennbar und für verschiedene Abstände zu bewerten (Bild 1). Man ist damit in der Lage, bereits im Verlauf der Konstruktion die fertigungstechnischen Gegebenheiten und Risiken zu erkennen und durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden. Später, beim Start der Serienfertigung, kann mit Hilfe der Gießprozesssi-

mulation auch die optimale Vorheiztemperatur bestimmt werden, bei der einerseits das Fließen der Aluminiumschmelze rund um die Laufbuchsen unterstützt wird und andererseits die Zykluszeit oder die zum Vorwärmen benötigte Energie möglichst niedrig gehalten wird.

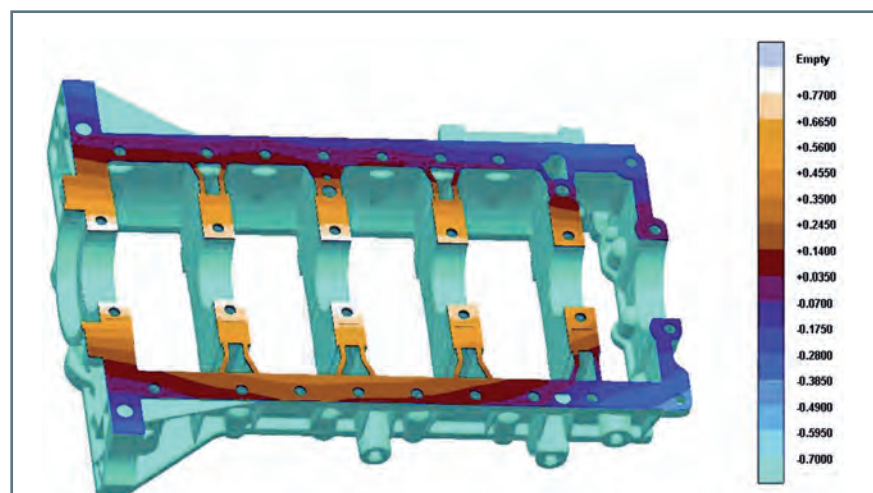
**Eigenspannungen im Gusszustand im Bereich zwischen den Laufbuchsen**

Das Aluminium schrumpft nach der Erstarrung bei der Abkühlung auf die relativ steifen, kälteren GJL-Laufbuchsen auf. Dabei bilden sich im Aluminium Zugspannungen und die Laufbuchsen werden gleichzeitig unter Druckspannungen gesetzt. Je nach Abstand zwischen den Laufbuchsen bilden sich unterschiedliche Eigenspannungen (Bild 2). Oft sind die Zugeigenspannungen im Aluminium zwischen den Laufbuchsen hoch, jedoch womöglich unkritisch, da sich eventuell entstehende Risse in diesem Bereich kaum auf die Gesamtsteifigkeit des Zylinderkurbelgehäuses bei Betriebstemperatur auswirken dürften.

Auch bei den Eigenspannungen wirkt sich die Vorwärmung der Laufbuchsen aus. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Zugeigenspannungen im Steg zwischen den Laufbuchsen mit steigender Vorwärmtemperatur niedriger werden.

**Fallbeispiel Aluminium-Leiterrahmen mit Grauguss-lagerschalen**

Leiterrahmen werden im Allgemeinen im Aluminiumdruckgießverfahren mit eingelegten Lagerschalen aus Gusseisen mit Lamellengraphit oder Stahl gefertigt. Dabei treten im Bereich der Werkstoffpaarung im Prinzip die gleichen Phänomene wie bei dem oben beschriebenen Beispiel des



**Bild 3: Maßabweichung eines Leiterrahmens im Gusszustand. Dargestellt sind die Maßabweichungen normal zur Bezugsebene (Z-Richtung). Die Simulation zeigt einen Maßunterschied von bis zu 1,0 mm zwischen den Eckpunkten des Leiterrahmens und den Auflageflächen der Lagerbuchsen.**

Aluminium-Zylinderkurbelgehäuses mit GJL-Laufbuchsen auf. Zusätzlich kritisch ist der Verzug des Gussteils dadurch, dass die kalten Lagerschalen nicht vollständig von Aluminium umspült werden. Die sich dadurch während der gesamten Gussteilabkühlung ergebenden Temperaturgradienten, insbesondere in der Richtung normal zur Montageebene, führen generell zu einem Verzug, bei dem sich die Lagerschale vom Motorblock weg in Richtung Ölwanne wölbt (Bild 3). Mit Hilfe der Gießprozesssimulation ist nachweisbar, dass der Verzug charakteristisch und durch gießtechnische Maßnahmen praktisch nicht zu beseitigen ist. Jedoch ist der Verzug durch die Simulation quantifizierbar, sodass sich geeignete Bearbeitungszugaben und -maßnahmen ebenfalls während der Konstruktion festlegen lassen.

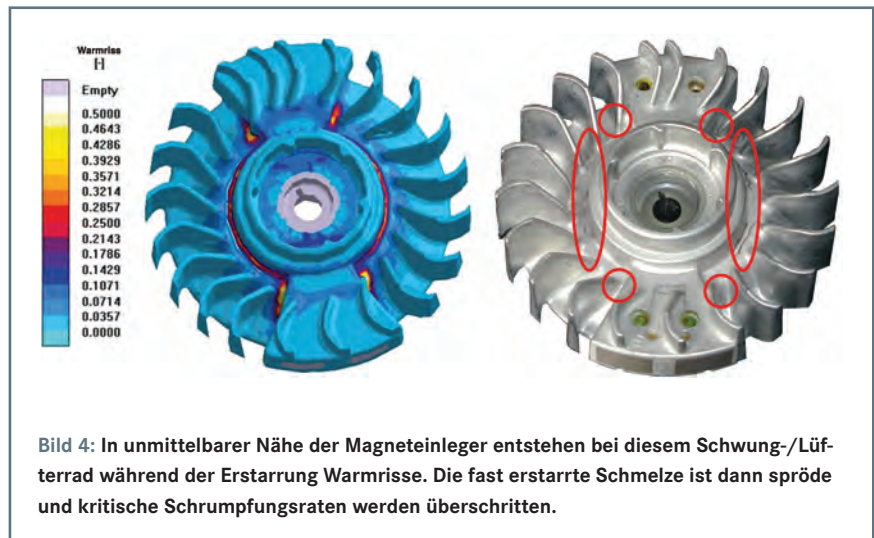
Durchaus im Sinne des Leichtbaus wäre eine Verringerung des Lagerschalengewichtes, was gleichzeitig zu einer Verringerung des Verzuges führen würde.

### Fallbeispiel Magnesium-Schwungrad mit eingegossenen Magneten

Bei kleinen Motoren, die in mobilen Arbeitsmaschinen wie zum Beispiel Motorsägen eingesetzt werden, spielt die Gewichtseinsparung immer schon eine große Rolle. Ein Beispiel für ein Gussteil, welches einerseits gewichtsoptimiert ist und andererseits durch die Übernahme mehrerer Funktionen zur Gewichtsoptimierung des gesamten Gerätes beiträgt, ist ein Magnesium-Schwungrad, welches gleichzeitig die Aufgabe eines Lüfterrades übernimmt und die Zündmagneten trägt. Solche Gussteile neigen in den Bereichen nahe den Einlegeteilen zu Warmrissen, die während der Erstarrung in diesen Bereichen entstehen. Wird dort eine kritische Erstarrungsgeschwindigkeit und damit Schrumpfungsgeschwindigkeit überschritten, entstehen Risse, weil Schmelze nicht schnell genug an den betreffenden Ort fließen kann, um „den Riss zu heilen“ (Bild 4).

### Zusammenfassung und Ausblick

Gusskomponenten können z. B. konservativ durch eine werkstoffangepasste Konstruktion oder durch den Einsatz konstruk-



**Bild 4:** In unmittelbarer Nähe der Magneteinleger entstehen bei diesem Schwung-/Lüfterrad während der Erstarrung Warmrisse. Die fast erstarrte Schmelze ist dann spröde und kritische Schrumpfungsraten werden überschritten.

tionsangepasster Werkstoffe gewichtsoptimiert werden. Besondere Möglichkeiten ergeben sich allerdings durch die im Guss realisierbaren Werkstoffkombinationen in einem Bauteil durch das Eingießen von Teilen, die dann lokal besondere mechanische, tribologische oder sogar magnetische Eigenschaften ermöglichen. Diesem Potential stehen natürlich komplexere und risikoreichere und damit letztendlich teurere Gießprozesse gegenüber.

Um die fertigungstechnischen Risiken im Zusammenhang mit der Einführung neuer Gussteilkonzepte zu minimieren, ist eine zuverlässige und dabei schnelle und preiswerte Simulation eine der wichtigsten Randbedingungen. Die Gießprozesssimulation wird seit über 35 Jahren an Hochschulen und seit über 25 Jahren in größerem Maßstab industriell laufend weiterentwickelt. Neue Modelle werden entwickelt, Grundlagenforschung wird durch den Druck der Modellentwickler angetrieben und die Hardwarehersteller bieten Jahr für Jahr leistungsfähigere Prozessoren und Rechnerarchitekturen. Alles zusammen führt mit Sicherheit zu einer Verbesserung der Vorhersagen von Simulationsprogrammen, deren Ende nicht absehbar ist.

Heute wird die Gießprozesssimulation überwiegend zur Optimierung von Gießprozessen eingesetzt. Die in diesem Beitrag angesprochene Ermittlung lokaler Eigenschaften von Gussbauteilen lässt sich aber sehr gewinnbringend deutlich vor dem Ab-

gießen der ersten Teile schon während der Konstruktion und der rechnerischen Bauteilauslegung einsetzen. Hier ist der Stand der Simulationstechnik dem Stand der Integration der Simulation fertigungstechnischer Belange deutlich voraus. Das Potential der Verbesserung der rechnerischen Gussteilauslegung durch Integration der Gießprozesssimulation muss als sehr groß eingeschätzt werden – liegt doch ein Hauptproblem bei der im Gießprozess begründeten Verteilung der mechanischen Eigenschaften und der Eigenspannungen. Diese sind, und das zeigen die hier angesprochenen Beispiele, jedoch berechenbar und damit für die rechnerische Gussteilauslegung nutzbar.

*Dieser Beitrag basiert auf einem Vortrag, der auf der VDI-Konferenz „Simulation im automobilen Leichtbau – Fokus Werkstoffverhalten“ (22./23.11.2011, Baden-Baden) gehalten wurde.*

*Dr.-Ing. Götz Hartmann, Engineering Services, Business Development, Magma GmbH, Aachen*