

Eigenschaftsvoraussage für die rechnergestützte Entwicklung gegossener Bauteile

von Götz Hartmann, Aachen

Praktisch alle Gussteile weisen lokal unterschiedliche mechanische Eigenschaften und Eigenspannungen auf. Auf Grund lokal differenzierter Erstarrungs- und Abkühlbedingungen können zum Beispiel in einem Zylinderkurbelgehäuse aus EN-GJL-250 die Zugfestigkeiten zwischen 220 und 340 MPa liegen. Gleichzeitig können in einem solchen Kurbelgehäuse lokale Eigenspannungen zwischen 100 MPa Druckspannungen und 130 MPa Zugspannungen auftreten. Solche Werte sind auch in Aluminium-Zylinderköpfen anzutreffen, wo sie oft die unerwartete Ursache für Risse im Betrieb sind [1]. Die Eigenspannungen verschieben die Mittelspannung bei zyklischer Beanspruchung und beeinflussen so in teilweise dramatischer Weise die Gussteillebensdauer.

Auch durch die ungleichmäßige Verteilung von Eigenschaften wird das Verhalten von Gussbauteilen unter Last sowie deren Lebensdauer beeinflusst. Durch Berücksichtigung berechneter lokaler Gussteileigenschaften wie zum Beispiel des Dendritenarmabstandes in Aluminiumfahrwerksteilen in der FE-Analyse und bei Lebensdauerberechnungen lassen sich die Risiken des Fertigungsprozesses lange vor dem Serienstart erkennen und vermindern.

1 Lokale Gussteileigenschaften und CAE

Die Prozesskette bei der Entwicklung von Gussteilen wird unterstützt durch CAE-Technologien und verschiedene Softwarelösungen zur Berechnung des Bauteilverhaltens im Betrieb. Dabei bleiben lokal unterschiedliche mechanische Eigenschaften und Eigenspannungen fast generell unberücksichtigt. Diese Charakteristika von Gussteilen werden jedoch immer bedeutender, da die spezifischen Belastungen immer höher werden. Gerade Berechnungen zur Betriebsfestigkeit sind oft nicht in der Lage, das später im Einsatz festzustellende Versagen von Gussteilen vorherzusagen. Hierfür gibt es sicherlich eine ganze Reihe von Gründen, zu denen aber ganz klar und nachweislich die mangelnde Berücksichtigung der fertigungsbedingten lokal unterschiedlichen Bauteileigenschaften gehört.

Mit Hilfe der Gießsimulation lassen sich nun solche ungleichmäßig verteilten Bauteileigenschaften wie Festigkeiten und Eigenspannungen ermitteln und in Lastfallanalysen und Betriebsfestigkeitsberechnungen berücksichtigen.

2 Lokale Eigenschaften im GJL-Zylinderkurbelgehäuse

Wenn ein Gussteil erstarrt und abkühlt, kommt es durch zahlreiche Einflüsse zu lokal unterschiedlichen Eigenschaften. Wandstärken und Gestaltfaktoren des Gussteils, die Steifigkeit und das Wärmeaufnahmevermögen der Gießform haben ebenso einen Einfluss wie die Gusslegierung mit ihren spezifischen metallurgischen und metallkundlichen Phänomenen während der Erstarrung und der weiteren Abkühlung bis auf Raumtemperatur. Beim Gusseisen mit lamellarer Graphitbildung (GJL) sorgen lokal unterschiedliche Parameter wie Ferrit/Perlit-Verhältnis, Größe der eutektischen Zellen oder die Form des bei der Erstarrung ausgeschiedenen Graphits für lokal unterschiedliche Gefüge und damit für lokal unterschiedliche mechanische Eigenschaften. Ungleichmäßige Abkühlbedingungen und Phasenumwandlungen im festen Zustand, beides die Regel in Gusseisenbauteilen, sorgen für lokal unterschiedliche Eigenspannungen im Bauteil.

2.1 Eigenspannungen und Betriebsfestigkeit

Alle Gussteile mit unterschiedlichen Wandstärken weisen nach ihrer Erstarrung und Abkühlung (übrigens auch nach der Abkühlung aus einer eventuellen Wärmebehandlung)

Eigenstressungen auf (Bild 1).

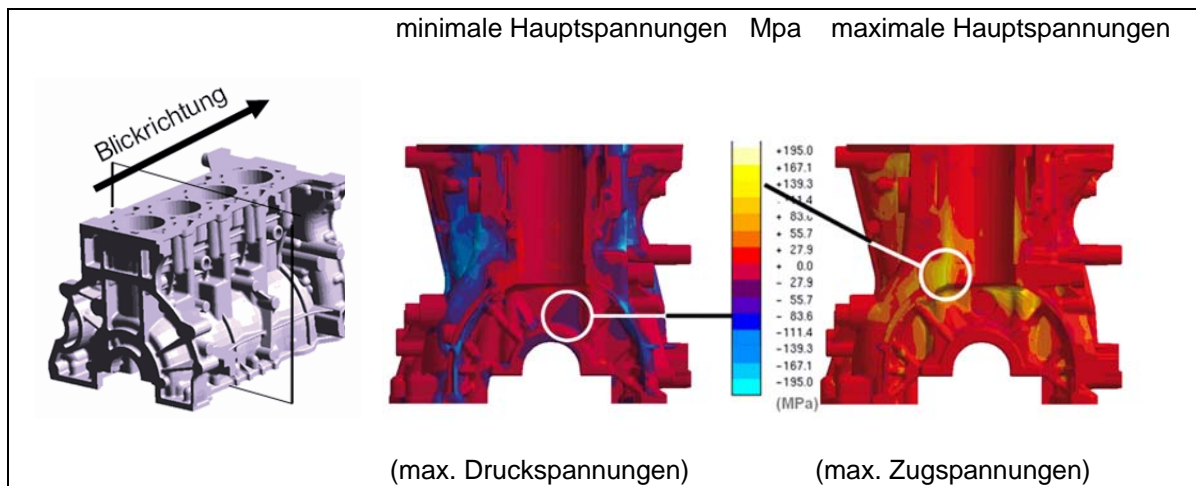


Bild 1: Im abgebildeten GJL-Zylinderkurbelgehäuse finden sich maximale Druckspannungen von 100 MPa (links) und maximale Zugspannungen von 130 MPa (rechts) (Berechnungen mit MAGMAstress).

Diese Eigenstressungen entstehen bei der ungleichmäßigen Abkühlung, bei der es zu einem äußerst komplexen Zusammenspiel zwischen lokal unterschiedlicher Schrumpfung, deren Behinderung durch die Gussform und das Gussteil selbst sowie durch den temperaturabhängigen E-Modul der abkühlenden Legierung kommt. Die entstehenden Eigenstressungen sind praktisch nur durch eine rechnerische Simulation des Gießprozesses vorauszusagen. Die hier vorliegenden Berechnungen wurden mit dem Simulationsprogramm MAGMAstress mit einem nichtlinearen elasto-plastischen Werkstoffmodell durchgeführt. Die Genauigkeit der Vorhersage der Gussteileigenstressungen wurde gegen Messungen mit DMS (Zerlegeverfahren) geprüft (Bild 2) und stellte sich als sehr befriedigend heraus.

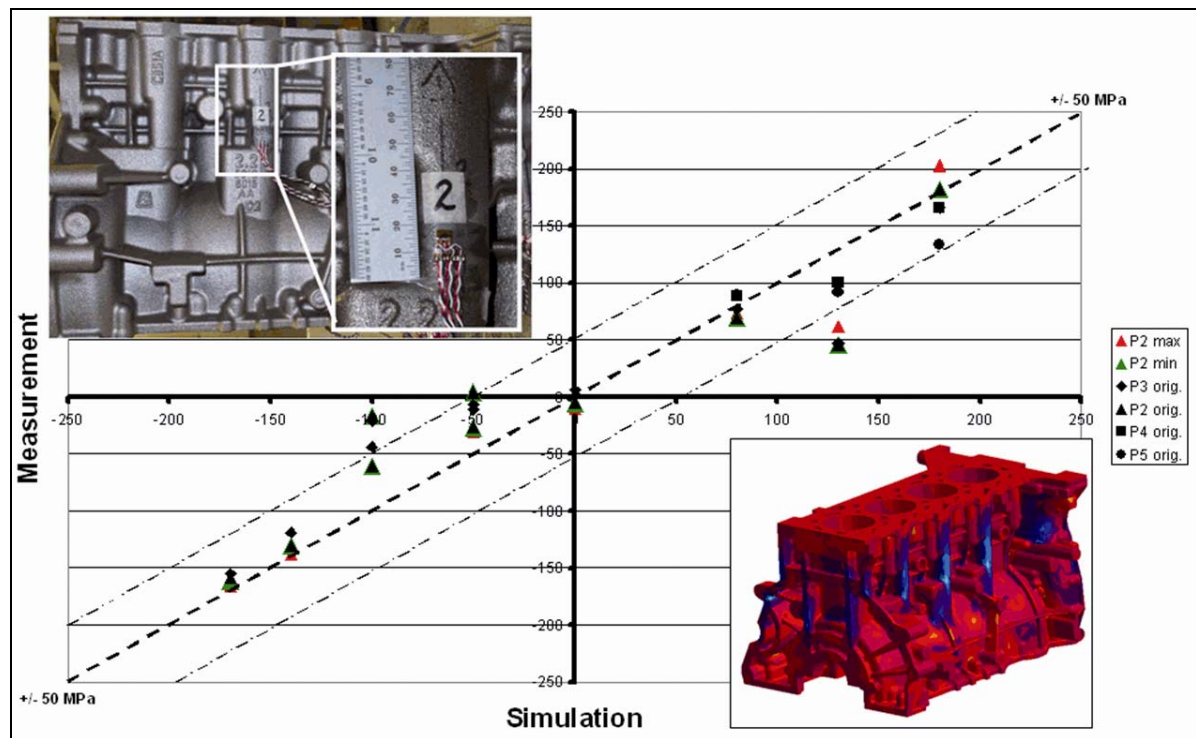


Bild 2: Berechnete und gemessene Eigenstressungswerte liegen in einem +/- 50 MPa breiten Korridor, was für diese Art Messung und Berechnung als sehr zufriedenstellend bezeichnet werden kann (die Validierung der mit MAGMA-SOFT berechneten Eigenstressungen wurde vom FORD-Forschungszentrum durchgeführt).

Schädlich sind Eigenspannungen insbesondere dann, wenn sie während der Gussteilentwicklung nicht ermittelt und berücksichtigt werden und so während der Testphase an Prototypen ein durch FEA abgesichert geglaubtes Designkonzept stürzen. Wenn die möglicherweise im Gießprozess auftretenden Eigenspannungen aber bekannt sind, kann in der Entwicklung frühzeitig reagiert werden. Kritisch sind eigentlich nur Zugeigenspannungen, denen zum Beispiel durch eine örtliche Anpassung von Wandstärken begegnet werden kann. Druckeigenspannungen können durchaus positive Aspekte haben, da sie gerade die Betriebsfestigkeit lokal erhöhen können und somit Potential für Gewichtserparnis durch reduzierbare Wandstärken bilden.

Ungeachtet der möglichen positiven Wirkungen von Druckeigenspannungen sind es natürlich die Zugeigenspannungen, die eine besondere Aufmerksamkeit verlangen. Sie verschieben bei einer Wechselbelastung die Mittelspannung und haben dadurch eine unter Umständen verheerende Wirkung auf die Betriebsfestigkeit. Die heutigen Möglichkeiten der horizontalen Integration von Gießsimulation zur Berechnung lokaler Eigenspannungen mit der FE-Analyse erlauben eine Berücksichtigung der Eigenspannungsverteilung im Gussteil in der Betriebsfestigkeitsanalyse.

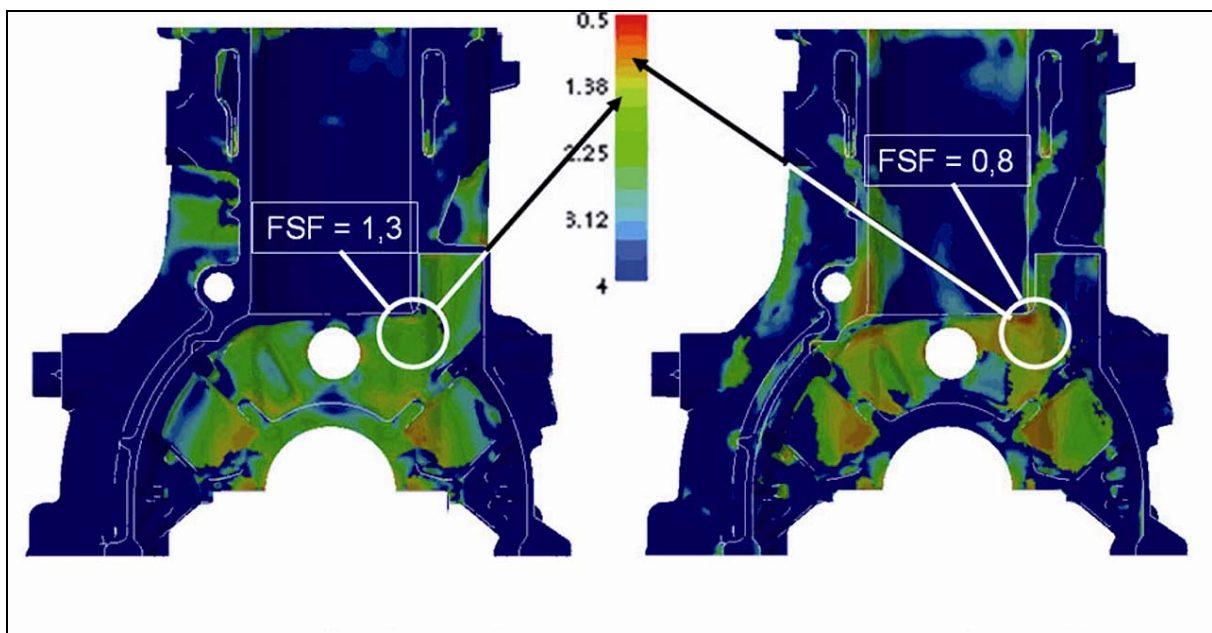


Bild 3: Der FSF (Fatigue Safety Factor) verschiebt sich an zahlreichen Stellen im Gussteil durch die Berücksichtigung der Gussteileigenspannungen von unkritischen Werten (rechts) zu unakzeptablen Werten <1 (links).

Bei einer Betriebsfestigkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Gussteileigenspannungen (**Bild 3**) treten an zahlreichen Stellen im Gussteil niedrigere FSF-Werte (Fatigue Safety Factor) auf als bei einer Betriebsfestigkeitsanalyse ohne Berücksichtigung der Gussteileigenspannungen. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist also an diesen Stellen erhöht, was durch viele Erfahrungen aus Prüfläufen von Motoren bestätigt wird. Dabei fallen vor allem Dieselylinderköpfe auf, die einerseits erhebliche Eigenspannungen aufweisen und bei denen andererseits gerade in Bereichen von Zugeigenspannungen hohe thermomechanische Lasten im Betrieb auftreten [1,2].

2.2 Lokale Gussteileigenschaften und Betriebsfestigkeit

Bei der Erstarrung von Schmelzen und bei der weiteren Abkühlung von Gussteilen bis auf Raumtemperatur können sich bei ein und derselben Legierung je nach Erstarrungs- und Abkühlraten unterschiedliche Gefüge bilden. In gewissen Grenzen sind die Abkühlraten im Gießprozess beeinfluss- und steuerbar. So ergeben sich zum Beispiel wesentliche Unterschiede im sekundären Dendritenarmabstand bei Aluminiumgussteilen, die in Sand beziehungsweise in Kokille gegossen werden. Weitere Möglichkeiten zur Einstellung bestimmter Gefüge hat der Gießer (wiederum bei ein und derselben

Legierung) über verschiedene metallurgische Einstellungen, die auf Korngrößen, auf Seigerungen oder die spezifische Ausscheidung von Phasen wirken.

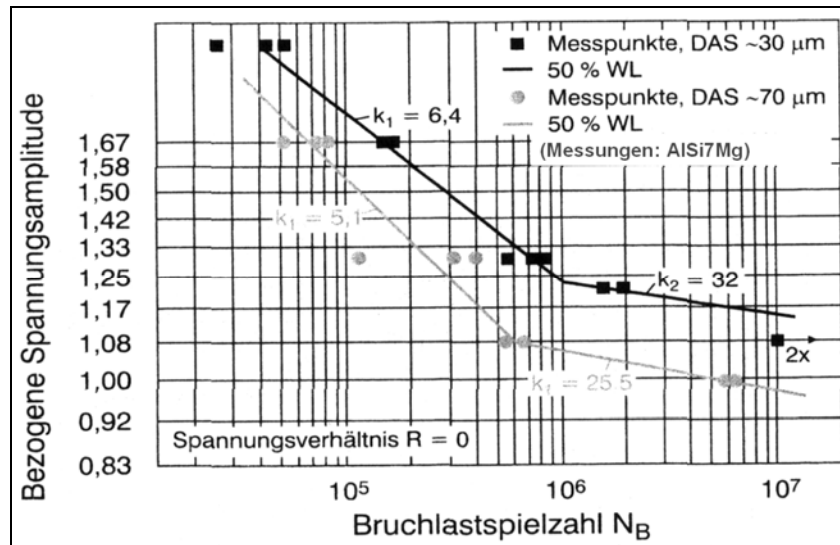


Bild 4: Der lokale sekundäre Dendritenarmabstand (SDAS) beeinflusst die Wöhlerkurve und damit den lokal unterschiedlichen Widerstand eines Bauteiles gegen Wechselbelastungen.

Die Gefügeverteilung in einem Aluminium-Schwenklager, welches lokal unterschiedlich erstarrt und abkühlt, lässt sich auf der Grundlage der Formfüllungs- und Erstarrungssimulation mit Hilfe metallurgischer und metallkundlicher Modelle berechnen [3]. Die in einem Gussteil auftretenden Gefüge bestimmen wiederum dessen lokal erreichbare Dauerfestigkeit. Aktuell wird als Gefügeparameter, über den Aussagen bezüglich der Lebensdauer eines Aluminiumgussteiles gemacht werden können, der sekundäre Dendritenarmabstand (SDAS) genutzt (Bild 4) [4]. Er ist im Schlifffbild eines Gussteiles messbar und so über versuchstechnisch zuverlässig belegte Zusammenhänge mit den lokalen Erstarrungsbedingungen, insbesondere den Erstarrungs- und Abkühlraten sowie den Temperaturgradienten an der Erstarrungsfront gekoppelt. Diese Tatsache führt dazu, dass der SDAS sich mit Hilfe einer geeigneten numerischen Erstarrungssimulation zuverlässig berechnen lässt (Bild 5).

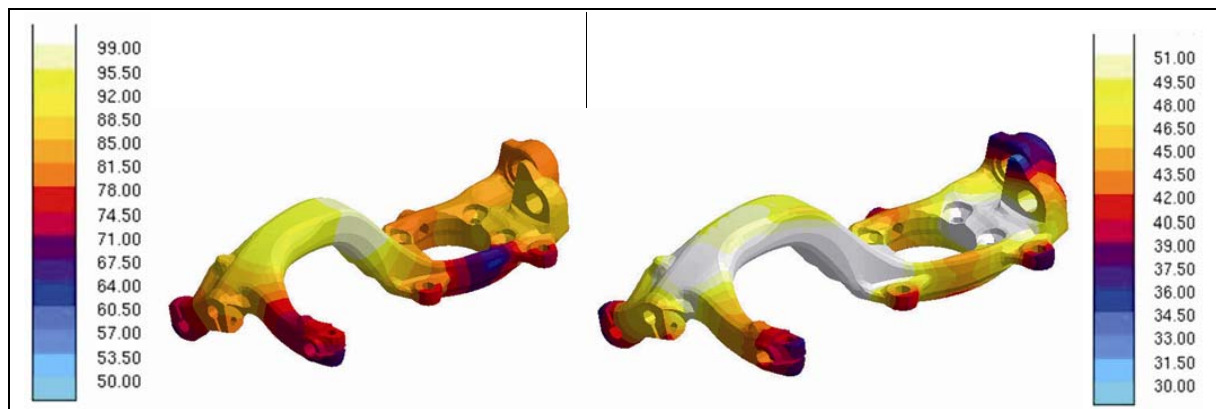


Bild 5: In einem Aluminium-Schwenklager hängt der lokale SDAS von den lokalen Erstarrungsbedingungen und damit auch vom Gießprozess ab. So ergeben sich wesentliche Unterschiede im Sandguss-Prototypen (links) und dem Kokillenguss-Serienteil (rechts)

Üblicherweise wird bei allen Berechnungen und Simulationen zur Überprüfung des Bauteilverhaltens unter Last von gleichmäßigen Gefügen und Eigenschaften im ganzen Bauteil ausgegangen. Die Praxis sieht jedoch anders aus. Im Gussteil gibt es eine Verteilung der Gefügeeigenschaften wie vom SDAS. Der gesamte, das Gefüge und damit die mechanischen Eigenschaften beeinflussende Gieß-

prozess wird im Allgemeinen so ausgelegt, dass die geforderten Eigenschaften auf jeden Fall in den ausgewiesenen Prüfbereichen und/oder getrennt gegossenen Probestäben erreicht werden.

Bei einer Optimierung des Gussteilgefüges im Hinblick auf eine maximale Lebensdauer des Bauteils kommt es darauf an, in den Bereichen der maximalen Wechselbelastung die bestmöglichen Gefügeeigenschaften einzustellen. Bei einem Aluminium-Schwenklager weist der gegossene Prototyp im Bereich der maximalen Spannungsamplitude (200 MPa) einen SDAS von 80 µm auf. Damit würde das Gussteil an dieser Stelle nach 13 200 Lastwechseln (Prüflast!) versagen. Eine stärkere Dimensionierung des Gussteiles wäre aber ein falscher Weg. Die Berechnung des SDAS für die in Serie gegossenen Kokillenteile weist einen Wert von 45 µm im kritischen Bereich auf, was mit einer Lebensdauer von 43 300 Lastwechseln korreliert (**Bild 6**).

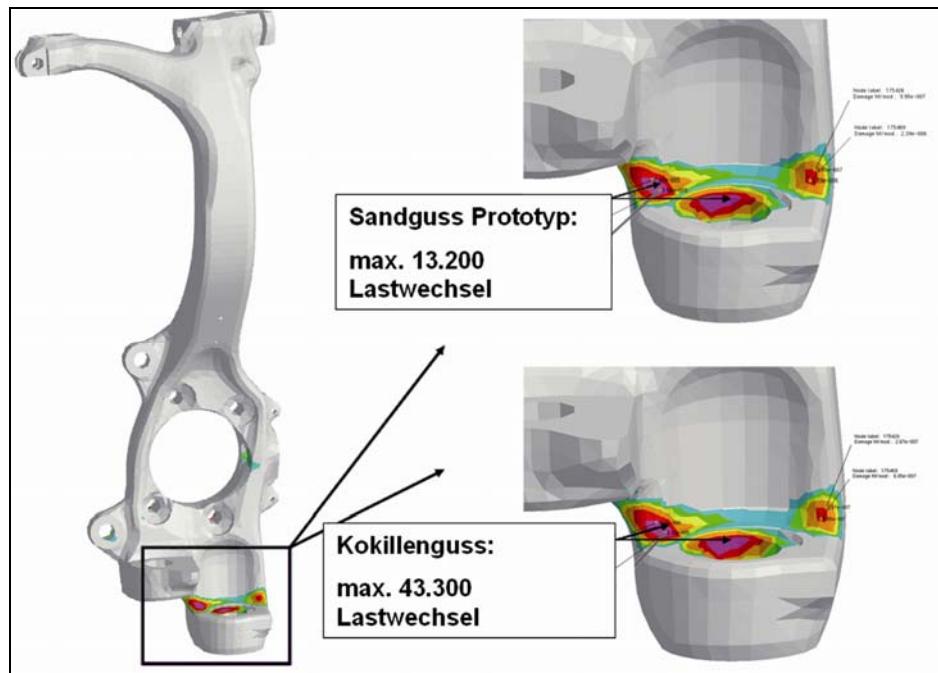


Bild 6: Maximale Lastwechsel im Bereich der maximalen Spannungsamplitude: Entsprechend den unterschiedlichen SDAS bei Sand- beziehungsweise Kokillenguss (siehe Bild 5) erweist sich das im Seriengießprozess gefertigte Aluminium-Schwenklager (unten) als dreimal so resistent gegen die Prüfwechsellast wie das Prototypenteil (oben).

3 Ausblick

In die Entwicklung von Modellen zur Berechnung lokaler mechanischer Eigenschaften von Gussteilen wurde in den vergangenen Jahren und wird weiterhin kräftig investiert. In FuE-Projekten finden sich Spezialisten aus den Bereichen der Gussteilfertigung, der numerischen Simulation und aus verschiedenen Bereichen der Automobilentwicklung zusammen. Es ist „gehobener Stand der Technik“, für die wesentlichen Verfahren, in denen hoch beanspruchte Teile gegossen werden, lokale Eigenschaften voraussagen zu können:

- Eisenguss: Eigenspannungen und über die Gefügeanteile Härte und Zugfestigkeiten,
- Aluminium-Kokillenguss und porenarmer Druckguss: Eigenspannungen und über den Dendritenarmabstand Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen.

Diese Informationen werden bereits vereinzelt in der FE-Analyse und in Betriebsfestigkeitsberechnungen als verbesserte Randbedingung genutzt. Angesichts zahlreicher Probleme mit der Lebensdauer von scharf auf die Funktionalität ausgelegten Gussteilen im Automobilbereich oder Windenergieanlagen ist der Anwendungsgrad dieser Möglichkeiten äußerst unbefriedigend. Die Gründe dafür liegen einerseits in der Tatsache, dass Modelle und Datenintegration noch verbesserungswürdig sind:

- Bei der Berechnung von Gussteileigenspannungen sind die Berücksichtigung von Phasenumwandlungen im festen Zustand und die Kontaktvorgänge beim Schrumpfen der Gussteile in den Formen noch offen.
- Für etliche Legierungen (Gusseisen, Aluminium und Magnesium) sind die Zusammenhänge in der Kette von Erstarrungs- und Abkühlbedingungen über Gefügebildung zu den mechanischen Eigenschaften noch nicht befriedigend geklärt.
- Die FE-Programme und -Modelle sind noch nicht auf die direkte Nutzung lokaler mechanischer Eigenschaften ausgelegt.

An diesen Punkten wird allerdings, wie bereits erwähnt, auf verschiedenen Ebenen weiter entwickelt. Offene Punkte dürfen jedoch nicht die Integration einer neuen Technologie oder Methodik in die Entwicklungsprozesse von Gussbauteilen ausschließen, sondern allenfalls begrenzen. Um die Ermittlung lokaler Gussteileigenschaften optimal nutzen zu können, müssen neben den oben aufgezählten technischen Punkten auch einige strukturelle Voraussetzungen erfüllt sein:

- Ein Konstrukteur oder ein Berechnungsingenieur kann kaum gleichzeitig auch ein Gießereifachmann sein. Alle Kompetenzen müssen jedoch heute vom Anfang einer Entwicklung an zusammengeführt und simultan genutzt werden. Kooperationsmodelle dazu fehlen jedoch häufig.
- Eine weitere wesentliche Voraussetzung ist eine Gesamtkostenverantwortung über die Prozesskette von der Entwicklung bis zur Serienfertigung. Darin wird die Beschaffung von Entwicklungen, Prototypen und Serienteilen zusammengeführt, um zu verhindern, dass eine in fertigungstechnischer Hinsicht nicht optimale Konstruktion bis zum Serienstart verschleppt wird und dort zu erheblichen, nicht budgetierten Kosten führt.

Die Anstrengungen zur Erschließung der erheblichen Potentiale zur Absicherung der Machbarkeit neuer Entwicklungen konzentrieren sich daher nicht nur auf die Verbesserung der technischen Basis zur Integration lokaler Bauteileigenschaften, sondern auch auf die Schaffung geeigneter Kooperationsstrukturen, um kostenintensive Überraschungen bei der Serienfertigung von Gussteilen zur Vergangenheit werden zu lassen.

Dr.-Ing. Götz Hartmann, MAGMA GmbH, Aachen

www.magmasoft.de

Literatur

- [1] Maaßen, F., M. Loeprecht und A. Egner-Walter, Vortrag auf dem 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug-Motorentchnik 2000 "Rechnerische Optimierung von hochbelasteten Zylinderköpfen aus Aluminium-Dauerlaufsimulation" gehalten.
- [2] Weiss, U.: Eigenspannungen in Zylinderkopf und Block, geschlossene Prozesskette zur Bauteilauslegung. Vortrag auf dem Seminar „Hochleistungs-Bauteile für Verbrennungsmotoren“, 26. - 27. November 2003 im Haus der Technik, Essen, gehalten.
- [3] Sturm J. C.: Vorhersage lokaler Eigenschaften von Gussteilen im Motorenbau: in: VDI-Bericht Nr. 1830, VDI Verlag, Düsseldorf 2005.
- [4] Minichmayr, R., und W. Eichsleder: Lebensdauerberechnung von Gussbauteilen unter Berücksichtigung des lokalen Dendritenarmabstandes und der Porosität. Giesserei 90 (2003) H. 5, S. 70-75.