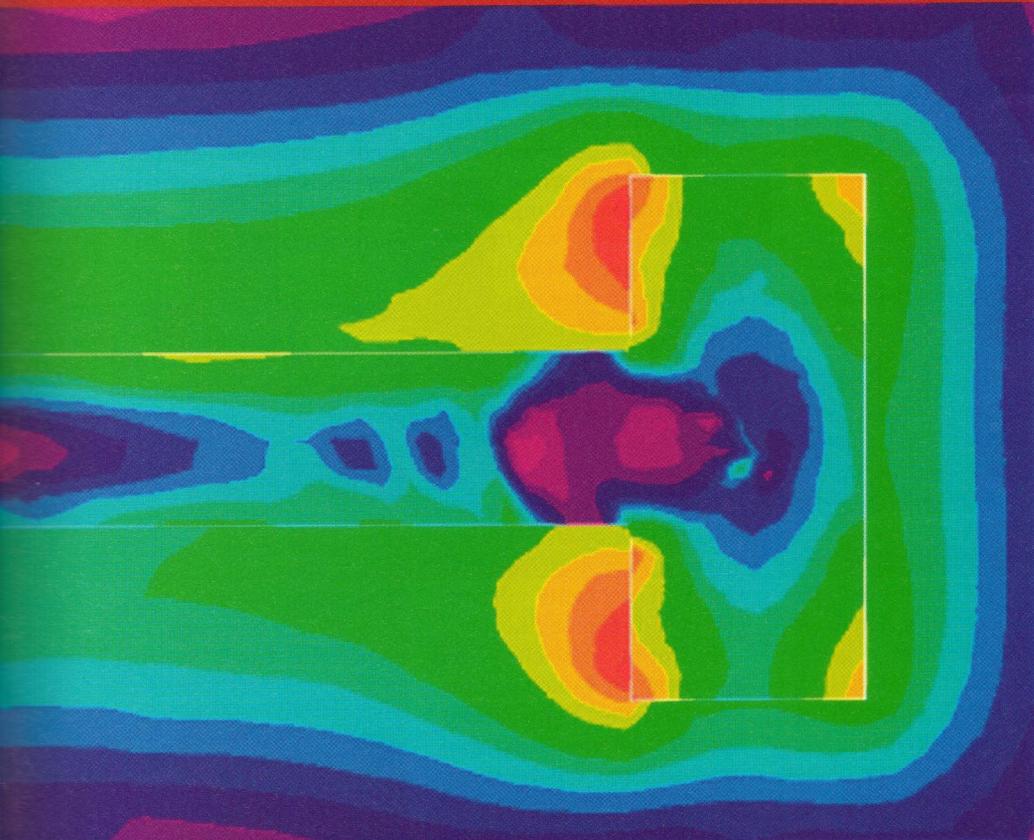


GIESSEREI-PRAXIS

SPECIAL

58. Jahrgang

www.giesserei-praxis.de

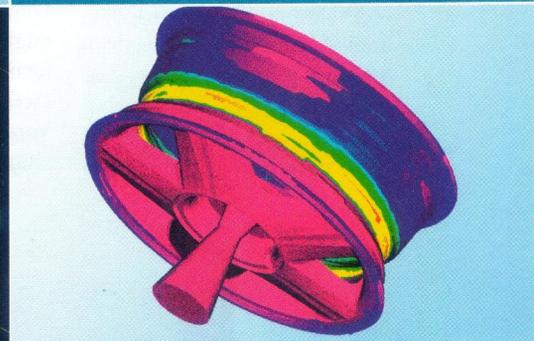
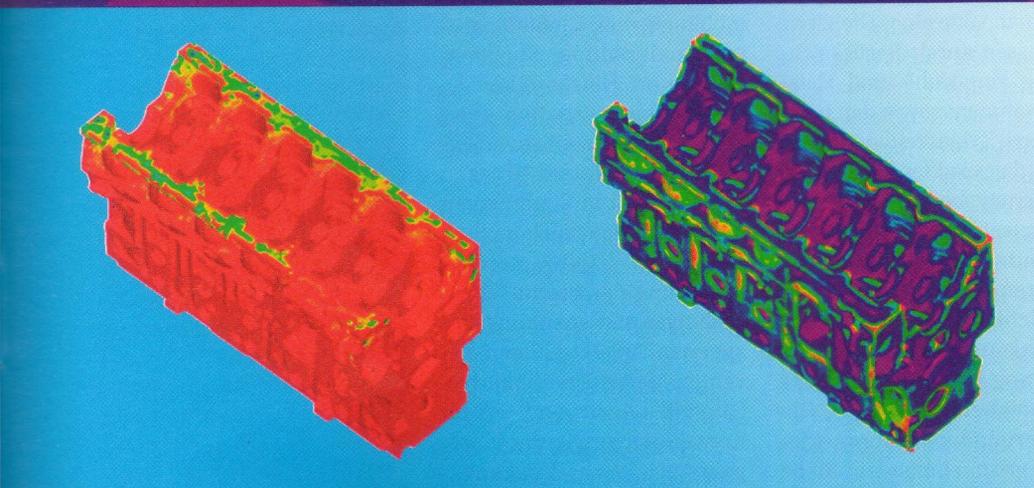


Der virtuelle Weg zum Gussteil

ESI Group 252

NovaCast Foundry Solutions AB 259

RWP GmbH 265





Halle 15, Stand G14

ESI Group

Gießereisimulation der nächsten Generation

O. Köser

M. Aloe

Die effektive Nutzung computerbasierter Modellierung des Gießereiprozesses hat dazu beigetragen, das Verständnis dieses Fertigungsverfahrens zu vertiefen. Sowohl in Bezug auf das Design der Gussteile und der Optimierung der Prozesse wird die Gießereisimulation auch in Zukunft eine immer stärkere Rolle einnehmen

Übersicht

Jenseits der einfachen Vorhersage von Schwindungs- und Füllproblemen wurden die numerischen Werkzeuge zur Vorhersage von Spannungen, Mikrostrukturen, Fehleranzeigen, sowie der Möglichkeit der Darstellung spezifischer Gießereiprozesse erweitert. Dadurch erhält der Gießer die Möglichkeit, bereits zu einem frühen Zeitpunkt den technischen Prozess auszulegen, um Zeit und Kosten in signifikanter Weise einzusparen. Insbesondere wird sich dieser Artikel mit folgenden speziellen Themen befassen:

- Spannung und Verformung bzw. wie ist die endgültige Form des Gussteils? Wie verhält es sich mit der Ermüdungsbeanspruchung des Werkzeugs? Kann der Einfluss der Spaltbildung auf den Wärmetransport zwischen Gussteil und Werkzeug in Betracht gezogen werden? Kann das Auftreten von Warmissen vorhergesagt werden?
- Mikro- und Gasporosität – welchen Einfluss hat diese auf die Beschaffenheit des Gussteils? Kann die Porosität durch das Auftreten von Graphitexpansion kompensiert werden? Welchen Einfluss hat der Gasgehalt in der Schmelze auf die Bildung von Porosität?

Ole Köser und Marco Aloe sind Mitarbeiter bei der ESI Group, Lausanne, Schweiz

- Mechanische Eigenschaften von Gussteilen – können lokale Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Härte vorhergesagt werden?

Einleitung

Durch den allgemeinen Einsatz von CAD-Systemen, der Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Computer und nunmehr 20 Jahren Erfahrung bei der Modellierung von Gießprozessen hat die Gießereisimulation einen Status erreicht, indem dem Gießer relevante Informationen für die Auslegung einer Druckguss- oder Sandgussform zur Verfügung gestellt werden können. Gießsysteme, Überläufe, Entlüftungen und Speiser können mit Hilfe der numerischen Simulation optimiert werden. Eine genaue Darstellung der thermischen Aspekte eines Gießereiprozesses durch Berücksichtigung von Kühl- und Heizmaßnahmen, sowie den technischen Zykluszeiten ermöglicht die exakte Vorhersage erstarrungsbedingter Fehler wie beispielsweise Hot-Spots.

Heutzutage können die meisten auf dem Markt erhältlichen Gießereisimulationspakete Füllung und Erstarrung mit ausreichender Genauigkeit darstellen. Die Gießereiindustrie fordert jedoch in zunehmendem Maße komplexere Vorhersagen bezüglich Spannung und Verformung, Mikrostruktur, Gussteileigenschaften sowie der Verteilung der Mikroporosität.

Spannung und Verformung

Abgesehen von den durch Füllung und Erstarrung verursachten Fehlern gibt es eine Reihe spannungsbezogener Aspekte, welche die Qualität eines Gussteils beeinträchtigen oder zum frühzeitigen Versagen der Form führen können. Eines der Hauptziele des Gießereiprozesses besteht nach wie vor in der Lieferung von Bauteilen mit einer Geometrie innerhalb festgelegter Toleranzen. Ungewünschte Verformungen erfordern zusätzliche Arbeitsschritte mit entsprechend erhöhten Kosten.

Faktoren, welche die Spannung im Bauteil und die Standzeit der Form beeinflussen können, hängen unter anderem mit der spezifischen Geometrie, dem zeitlichen thermischen Ablauf (abhängig von: Gießtemperatur, Spaltbildung, Sprühen, Kühl- und Heizkanäle, ...), Materialeigenschaften von Form und Gussteil sowie externen Kräften und Drücken zusammen. Um Spannungen daher präzise vorherzusagen zu können, ist eine Berücksichtigung der thermischen, Füllungs- und spannungsbezogenen Aspekte aller relevanten Materialien (inklusive Gussteil, Kern und Form) notwendig, sowie deren gegenseitige Wechselwirkung.

Eine Umsetzung dieser Zusammenhänge in ein kommerzielles Produkt erfordert daher unter anderem geeignete Materialmodelle und Kontaktalgorithmen zur Be-

rücksichtigung der thermischen und mechanischen Wechselwirkung zwischen Teil und Form. Weitere zu lösende Fragestellungen beziehen sich auf Heiss- und Kaltrissgefährdung sowie Formstandzeiten.

Spaltbildung

Die Hauptgründe für die Ausbildung von Spannungen liegen im Widerstand der

Über ESI Group

Im Jahr 1973 mit Hauptsitz in Paris gegründet, ist ESI Group Pionier und weltweit führender Hersteller von CAE-Software sowie Ingenieurdienstleister für Simulationen in der Produktentwicklung (Virtual Prototyping) und für Fertigungsprozesse (Virtual Manufacturing). Mit derzeit 13 Niederlassungen, u.a. in Deutschland, Frankreich, Niederlande, Spanien, Tschechien, U.S.A., Japan, Korea, und China, sowie 23 weiteren Distributoren unterstützt ESI Group weltweit ihre Kunden vor Ort. Zu den Kunden der ESI Group zählen namhafte Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Automobil-, Luftfahrt- u. Raumfahrt-, Schiffsbau-, Grundstoff-, Rohstoff- und der Chemischen Industrie. Calcom ESI / PSE-A CH-1015 Lausanne Schweiz
Tel: +41 (21) 693 2918
Fax: +41 (21) 693 4740
www.calcom.ch
ESI Engineering System International GmbH
D-65760 Eschborn
Tel: +49 (0) 6196-9583-0
Fax: +49 (0) 6196-9583-111

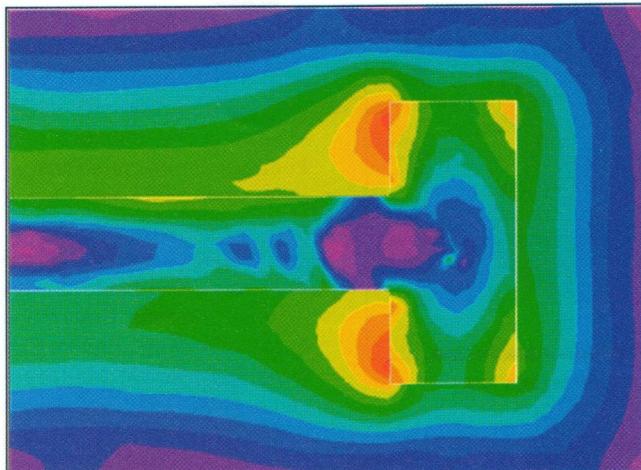


Bild 1. Wärmefluss beeinflusst durch Spaltbildung (ProCAST)

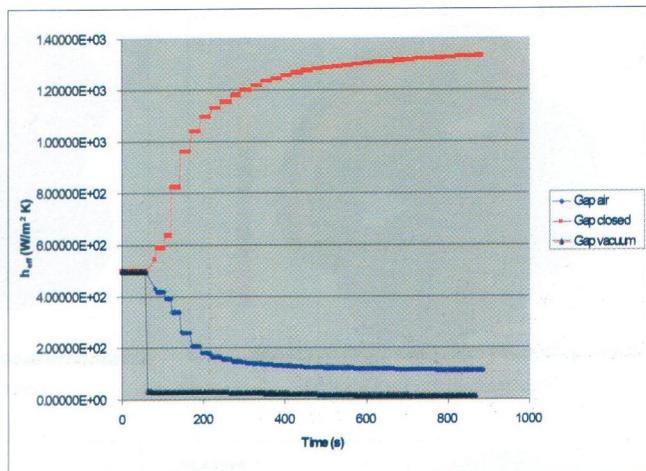


Bild 2. Wärmeübergangskoeffizienten beeinflusst durch mechanischen Kontakt

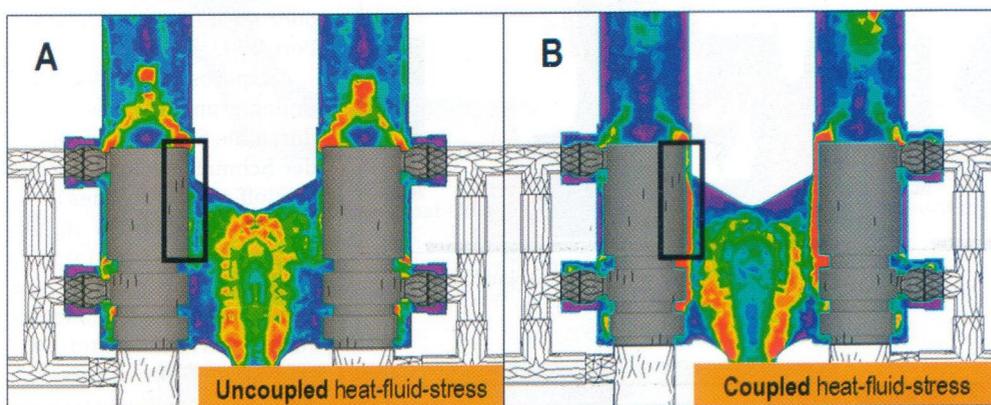


Bild 3. Die Warmisgefährdung zeigt unterschiedliche Empfindlichkeit und örtliche Verteilung bei gekoppelter und ungekoppelter Betrachtung. (ProCAST, Niederdruckguss von einem Messingbauteil, mit freundlicher Genehmigung der KWC Engineering AG, Switzerland)

Form, welche eine Schrumpfung des Bauteils zu verhindern trachtet, und ungleichmäßigen Temperaturgradienten. Aus diesem Grund müssen der Kontaktdruck zwischen erstarrendem Bauteil und Form, sowie der Einfluss der Luftspaltbildung berücksichtigt werden. Tatsächlich beeinflusst dieses Phänomen den Wärmefluss und ist daher eine maßgebliche Ursache für die oben genannten Defekte. Somit ist eine gekoppelte Analyse von Thermik and Spannung erforderlich, welche nur durch die FEM-Technik ermöglicht wird [1].

Zu Demonstrationszwecken wurde eine einfache T-förmige Geometrie aus A356 in einer Form aus H13 simuliert, wie in Bild 1 dargestellt. Nur die rechte Seite des Gussteils ist dargestellt. Die linke

Seite der Bild ist spiegelsymmetrisch. Während der Erstarrung schwindet das Gussteil und bildet einen Spalt mit der Form auf der äußeren rechten Seite, während auf der linken Seite der T-förmigen Geometrie der Kontaktdruck ansteigt.

Der entsprechende effektive Wärmeübergangskoeffizient an den gegenüberliegenden Seiten des Gussteils ist in Bild 2 dargestellt. Die obere Kurve entspricht einem Punkt, an dem der Druck ansteigt, da das Gussteil schrumpft. Die mittlere Kurve zeigt einen Punkt, an dem sich ein Spalt bildet, wobei die Anwesenheit von Luft angenommen wird. Die untere Kurve zeigt denselben Punkt, aber unter Annahme von Vakuum. Die großen Unterschiede in den Werten zeigen die Notwendigkeit, die loka-

len Wärmeübergangskoeffizienten bei der gekoppelten thermischen Spannungsanalyse in Betracht zu ziehen. In der Simulation, dargestellt in Bild 1, wurde dies berücksichtigt, welches sich auf den dargestellten Wärmetransport auswirkt. Dieser ist dort am größten, wo auch der Kontaktdruck ein Maximum aufweist. Dieses Phänomen bewirkt unterschiedliches Erstarrungsverhalten in einer gekoppelten und ungekoppelten Simulation, welches auch zu einer unterschiedlichen Vorhersage von Defekten wie der Warmisgefährdung führt (Bild 3).

Industrielles Beispiel der Qualitätsanzeige

ProCAST [2] bietet eine einzigartige Lösung basierend auf einer vollständig gekop-

pelten Modellierung von thermischen, Füllungs- und Spannungsvorgängen, um eine gesicherte und genaue Vorhersage von Warm- und Kaltrissen, Verformungen von Bauteil und Form, sowie Lebensdauervorhersagen der Form zu ermöglichen.

Ein erstes Beispiel für den Niederdruckguss von Aluminiumfelgen aus der Automobilindustrie (mit freundlicher Genehmigung von C.M.S. Jant Ve Makina San A.S., Türkei) wird unten gezeigt. Die Ergebnisse bezüglich Eigenstressungen, Warmisgefährdung, Verformung, dargestellt in Bild 4, geben an, wo die Beschaffenheit von Bauteil und Form von besonderem Interesse ist, und liefern damit dem Gießer eine „Landkarte“ der Verteilung der Qualität der Komponente.

Industrielles Beispiel Konturvorschau

Das zweite Beispiel (Bild 5) bezieht sich auf einem Stahlschwerkraftguss in keramischer Schale (mit freundlicher Genehmigung von Fundiciones en Cascara S.A., Spanien). Eine Hauptaufgabe bestand bei dieser Anwendung in der Einhaltung der geringen, vom Abnehmer geforderten, Toleranzen. Wenn sich ein Gussteil bis auf Raumtemperatur abkühlt, können innere Spannungen und Verformungen auftreten.

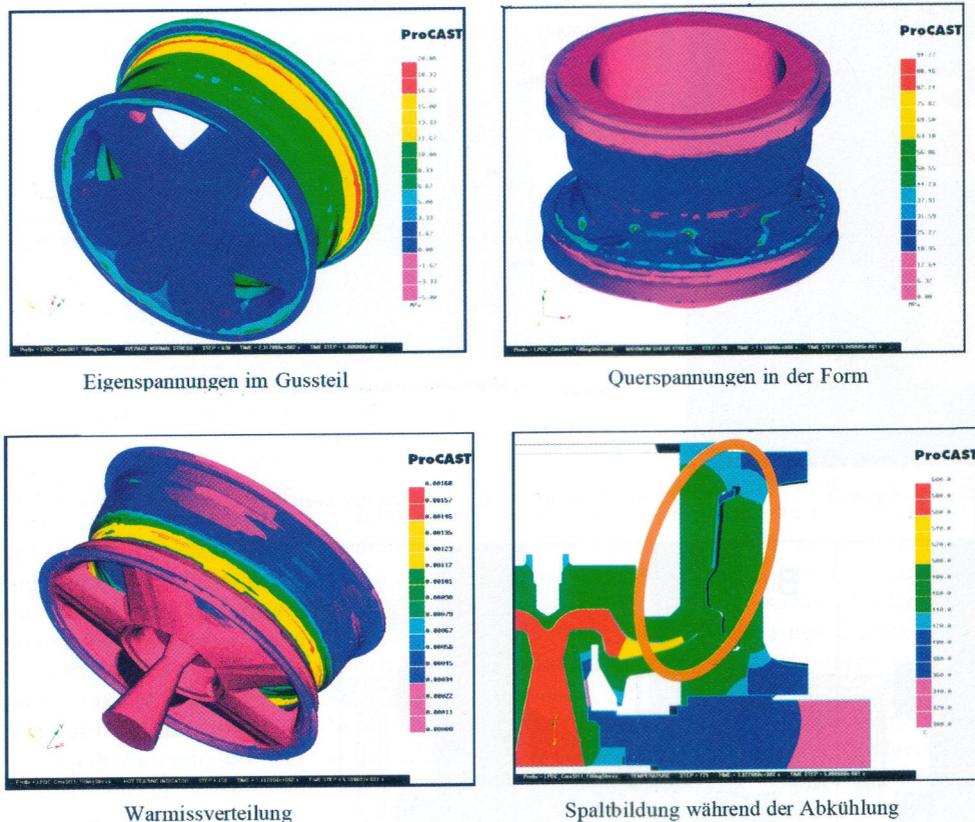


Bild 4. Spannungssimulation (ProCAST)

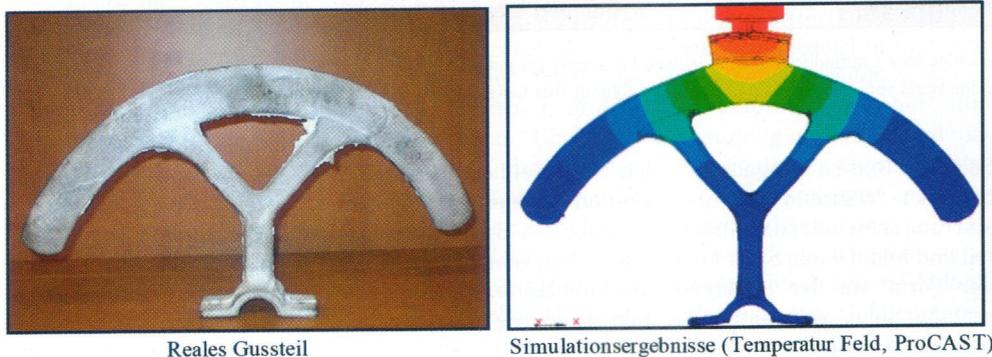


Bild 5. Stahlbauteil

Der Grad der Verformungen hängt dabei von der spezifischen Geometrie, dem Abkühlungsverhalten und den Materialeigenschaften ab. Die Aufgabe der Simulation bestand in diesem Fall in einer genauen quantitativen Vorhersage der Verformungen, um diese Information für eine Vorverformung des Werkzeugs in umgekehrter Richtung zu verwenden. Mit diesem Ansatz kann eine ungewünschte Verformung im voraus kompensiert werden, um das Teil in den geforder-

ten Toleranzen dem Kunden zur Verfügung stellen zu können.

Eine Simulation der Erstarrung und Spannung unter Berücksichtigung des Entfernens der Form wurde durchgeführt. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde die Geometrie des Gussteils mit einem SIDIO Gerät abgetastet. Die Technik erlaubt die kontaktlose Messung tausender Messpunkte mit einer Genauigkeit von 0,1 mm. Ergebnisse der Messung und der Simulation

wurden übereinander gelegt, und zeigen eine gute Übereinstimmung bezüglich der Tendenz und den Absolutwerten der Verformung.

Makro-, Mikro- und Gasporosität

Die endgültige Beschaffenheit eines Gussteils in Hinblick auf mechanische Eigenschaften und der Beschaffenheit der Oberfläche hängt in umfassendem Maße von der Anwesenheit von Porosität ab [3]. Drei grundsätzliche

Typen von Porosität (Einfallstellen, Makro-, Mikroporosität und Gasporosität) werden dabei in Gießereien beobachtet. Die meisten herkömmlichen Simulationspakete sind dabei jedoch auf eine Vorhersage von Makroporosität beschränkt, welche mit der Kontraktion des Schmelze bei der Erstarrung zusammenhängt, und zu Einfallstellen, sowie Makroporen an den Orten der letzten Erstarrung im Bauteil führen. Dieser Ansatz ermöglicht jedoch keine Vorhersage der Gas- und Mikro- oder auch interdendritischer Porosität.

Gasporosität in Aluminiumlegierungen entsteht durch die Segregation von in der Schmelze gelöstem Wasserstoff, welche mit der niedrigen Gaslöslichkeit in der festen Phase zusammenhängt [4]. Porosität ist eine Kombination von Erstarrungsschwindung und Gas-segregation. Bei der Erstarrung wird eine Nachspeisung von flüssigem Material durch das Geäst der sich bildenden Dendriten erschwert, was auch mit einem Druckabfall verbunden ist. Gleichzeitig erhöht sich lokal die Gaskonzentration durch Segregation bei der Erstarrung. Bei Übersteigen der Löslichkeitsgrenze können sich so Gasblasen bilden.

Entgasungsmethoden werden üblicherweise angewendet, um den Gasgehalt in der Schmelze zu reduzieren und das Risiko von Gassegregation zu vermindern. Bezüglich der Mikroporosität durch Schwindung sind Legierungen mit einem breiten Erstarrungsintervall besonders betroffen. Der Temperaturgradient spielt eine weitere wichtige Rolle bei der Entstehung von Mikroporosität. Ein niedriger Gradient wird die Entstehung langer Dendriten fördern, und damit die Gefahr der Bildung von Mikroporosität erhöhen. Die Gießereien wenden unterschiedli-

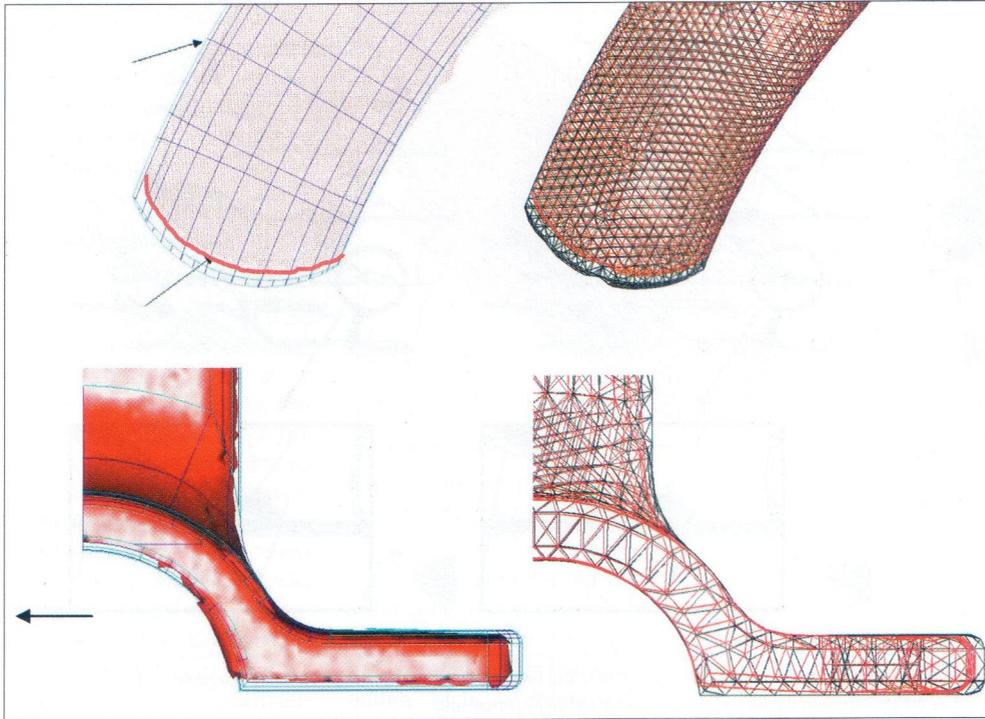


Bild 6. links: Vergleich zwischen CAD-Design (blaue Linien) und der digitalisierten Geometrie (rote Kontur) nach der Erstarrung
rechts: Vergleich zwischen dem Original CAD-Design (schwarze Linien) und der aktuellen Geometrie vorhergesagt von ProCAST nach der Simulation (rotes Netz). Die ProCAST-Ergebnisse weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit der gemessenen Geometrie auf



Bild 7. Eine starke Vergrößerung einer Bruchstelle zeigt die drei Arten der Porosität (a) Gasporen mit einer regelmäßigen runden Form und glatter Oberfläche, (b) Mikroporosität durch Schwindung mit einer unregelmässigen Form, die an die Struktur der Dendriten angelehnt ist, (c) Makroporosität mit unregelmässiger rauer Oberfläche (Bild mit freundlicher Genehmigung der Alcan Technology & Management SA, Neuhausen, Schweiz)

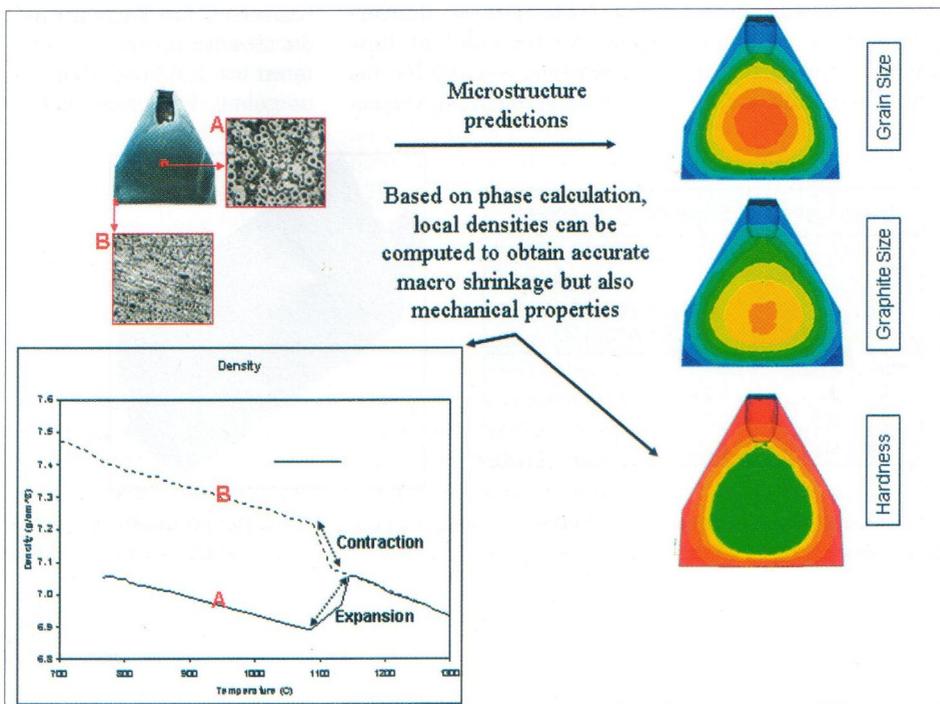


Bild 8. Bild (oben links) zeigt Ergebnisse der Mikrostruktur von Gusseisen mit Kugelgraphit eines einfachen Testkörpers. Zwei Vergrößerungen an unterschiedlichen Stellen zeigen die Mikrostruktur im Detail. (A) entspricht einer niedrigen Abkühlrate welche die Ausbildung von Graphitkugeln bei der Anwesenheit von Mg erlaubt.. (B) zeigt die Ausbildung von Ledeburit ohne Graphitausscheidung bei einer hohen Abkühlrate. Die entsprechenden von ProCAST verwendeten lokalen Dichtekurven sind unten links abgebildet. Während bei Position (B) reine Schwindung auftritt, ist bei Position (A) eine Expansion durch die Ausbildung von Kugelgraphit zu beobachten. Auf der rechten Seite sind die resultierenden Mikrostrukturen und mechanischen Eigenschaften dargestellt (ProCAST)

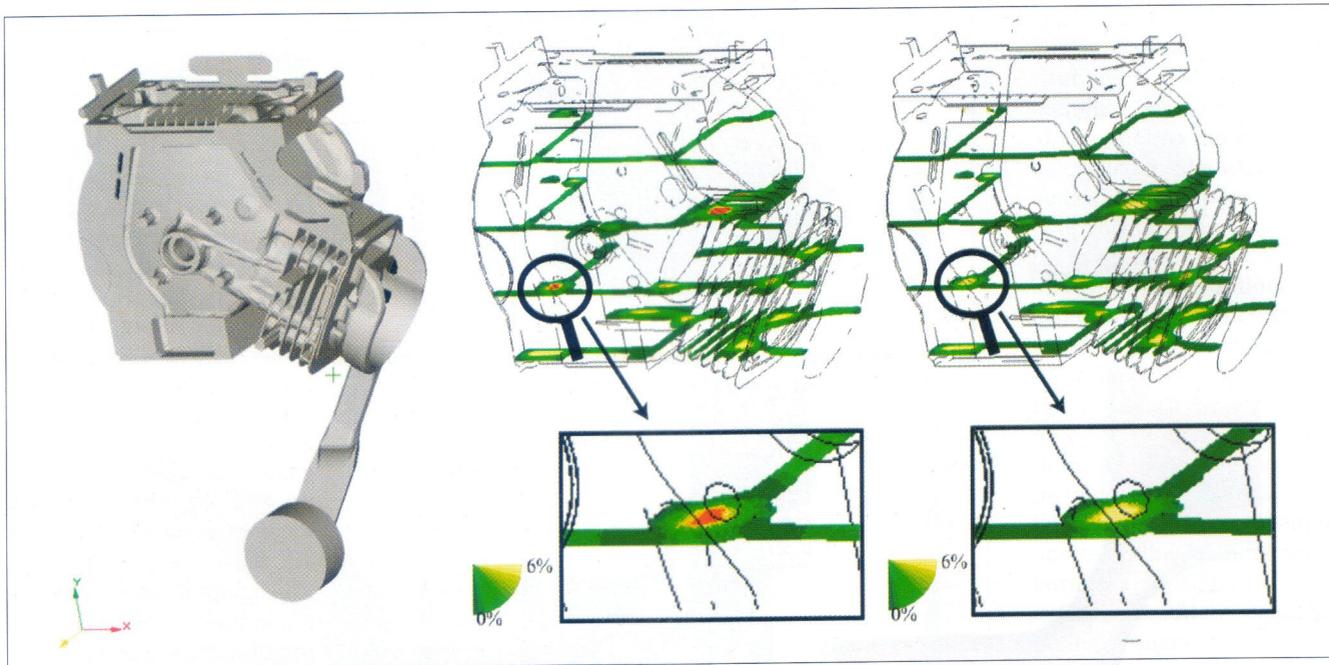


Bild 9. Beispiel einer Porositätsberechnung für ein komplexes Aluminiumbauteil aus A383. Die Geometrie ist auf der rechten Seite dargestellt. Links befinden sich Schnittdarstellungen der Porosität bei 1 bar (Mitte) beziehungsweise 100 bar (rechts) Nachverdichtung

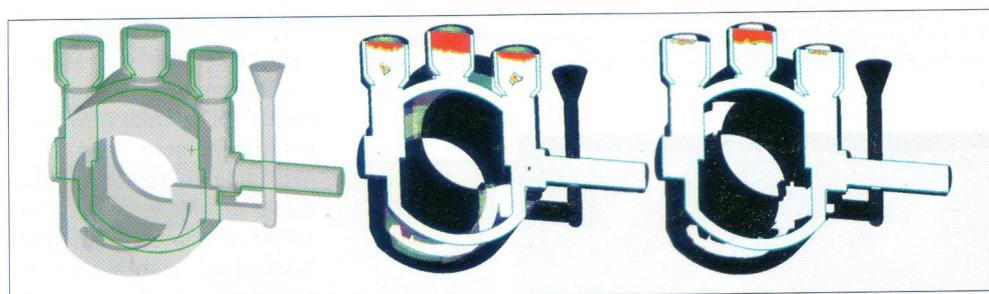


Bild 10. Die linke Seite zeigt die Geometrie, wobei eine grüne Linie die Lage der Schnittebene angibt, in denen die Porosität auf der rechten Seite dargestellt ist. Das mittlere Schnittbild gibt die Porositätsverteilung an, wenn keine Graphitexpansion berücksichtigt wird, und die Form nachgibt (rote Bereiche sind leer). Das rechte Bild zeigt die Porositätsverteilung bei mittlerer Effektivität der Graphitexpansion, wodurch ein Teil der Schwindung vermieden wird. Die Form ist auch hier noch nachgiebig. Die Ergebnisse wurden mit ProCAST erzielt

dert die Ausbildung von Makroporen sowie die Entstehung von Gasporosität durch Segregation; ein gewisser Teil von Mikroporosität ist jedoch weiterhin zu beobachten.

Industrielle Fallstudie-Porositätsvorhersage bei Vorhandensein von Graphitexpansion

Bild 10 zeigt den Einfluss der Graphitexpansion auf die Ausbildung von Porosität. Wie oben erläutert, wird die Ausbildung der Porosität bei Gusseisen mit Kugelgraphit durch unterschiedliche Faktoren wie Impfung, Magnesiumgehalt, Prozessbedingun-

le mit thermodynamischen Datenbanken macht es heute möglich, eine derartige Expansion bei der Erstarrung zu berücksichtigen (Bild 8).

turen sind. Bei Verwendung eines Drucks von nur 1 bar (Bild Mitte) tritt Mikroporosität, dargestellt in unterschiedlichen Grünwerten, in umfangreichem Maße auf. In

einigen Bereichen ist auch Makroporosität zu verzeichnen (rote Zonen in vergrößerter Darstellung). Eine Verwendung von 100 bar bei der Nachverdichtung verhin-

Industrielle Fallstudie-Mikro/Makro Schwindung und die Modellierung von Gasporosität

Die Berechnung der Mikro- und Gasporosität bei einem Druckussteil aus Aluminium A383 in Bild 9 dargestellt. Die Berechnung berücksichtigt im Grundsatz alle Phänomene, die im oberen Abschnitt erläutert wurden und die Ursache der Ausbildung von Mikro- und Makrostruk-

Erase Line		Erase All		Apply ->
Base: Fe				
Element		% Composition		
1.	C	3.7		
2.	Si	2.0		
3.	Mn	0.15		
4.	Mg	.063		

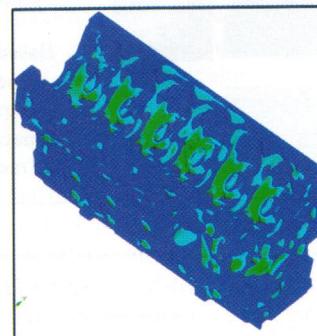


Bild 11. Die chemische Zusammensetzung kann variiert werden, um optimale mechanische Eigenschaften zu erhalten (SDAS Ergebnisse von ProCAST auf der rechten Seite)

gen und Festigkeit der Form beeinflusst. Die Verwendung angepasster Modelle ermöglicht heutzutage eine Simulation all dieser Phänomene zur Fehlervorhersage.

Mikrostruktur und die Vorhersage mechanischer Eigenschaften

Die Ausbildung der Mikrostruktur bei der Erstarrung ist ein wichtiger Faktor, um die Eigenschaften und die Qualität der Gussprodukte zu beeinflussen. Bei unterschiedlichen Legierungen treten unterschiedliche Arten von Mikrostrukturen auf. Die Arten der Phasen, ihr Volumenanteil, die Korngröße und Form bestimmen die Eigenschaften und gewährleisten eine angemessene Anwendung der Legierung.

Um eine Mikrostrukturvorhersage zu ermöglichen, koppelt ProCAST thermodynamische Berechnungen (mit CompuTherm® LLC Datenbanken) mit Mikrostrukturmodellen und einer makroskopischen Betrachtung von Füllung, Erstarrung und Temperaturfeldern. Entsprechend der chemischen Zusammensetzung ermittelt das Mikrostrukturmodul automatisch, welche Phasen auftreten, und welcher Typ von Mikrostruktur berücksichtigt werden muss (dendritisch, eutektisch, nodular, ...). Abhängig von Legierungstyp und Zusammensetzung werden zusätzliche Informationen wie beispielsweise Korngröße, Dendritenarmabstand (DAS) oder der eutektische Anteil für Aluminium oder die Keimzahl, der Austenitradius, Perlit- und Ferritanteile für Gusseisen mit Kugelgraphit angezeigt (siehe Bilden 11 und 12).

Im gezeigten industriellen Fallbeispiel eines Zylinderblocks aus Gusseisen mit Kugelgraphit (freundlicherweise zur Verfügung gestellt von MAN, Deutschland) mit einem Kohlenstoffäquivalent

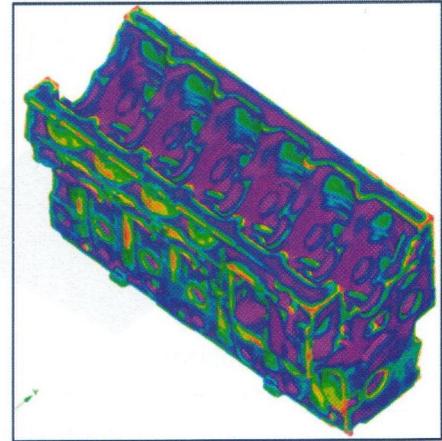
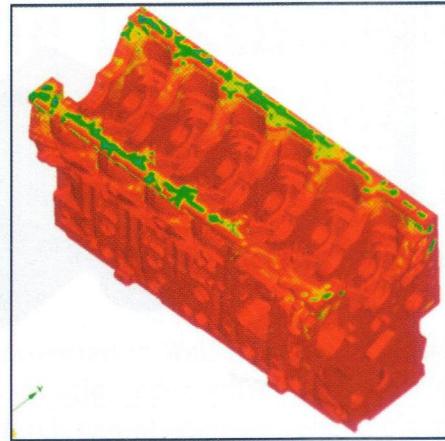


Bild 12. Ferritanteil (links), Keimzahl (rechts), stellen einen Einblick in die mechanischen Eigenschaften des Gussteils zur Verfügung (ProCAST)

von 4,36 % befinden wir uns nahe dem eutektischen Gusseisen. Durch die Anwesenheit von Mg in der Legierung bilden sich Graphitkugeln, sowie Phasenanteile von Ferrit und Perlit (siehe Bild 12). Die metastabile Perlitstruktur ist zusammengesetzt aus Ferrit und Zementit. Der endgültige Anteil von Perlit hängt vom Kohlenstoffäquivalent und den Abkühlraten ab.

Gussteileigenschaften

Mikrostrukturberechnungen können verwendet werden, um mechanische Eigenschaften für einige Legierungstypen zu ermitteln. So können beispielsweise Zugfestigkeit und Härte für unterschiedliche Typen von Legierungen angegeben werden.

Um diese Möglichkeit aufzuzeigen, wurde eine einfache Platte in der Form abgekühlt sowie in einer Variante zu einem früheren Zeitpunkt ausgepackt (siehe Bild 13). Als Ergebnis der unterschiedlichen Abkühlbedingungen tritt die Mikrostruktur in unterschiedlichen Phasenanteilen auf (siehe Bild 14). Die langsamer abgekühlte Platte zeigt eine sehr viel niedrigere Zugfestigkeit, als es dies für die schneller abgekühlte Platte der Fall ist, welches mit experimentellen Ergebnissen in Übereinstimmung steht [6].

Wie dargestellt, erfordert eine Modellierung des Prozesses vom Gießen bis zur Wärmebehandlung fortgeschrittene thermomechanische Modelle gekoppelt mit der Vorhersage der Mikrostruktur. Einige davon stehen bereits für den Gießprozess zur Verfügung und können auch für die Modellierung der Wärmebehandlung verwendet werden. Diese Modelle verbinden zur Zeit makroskopische thermische Berechnungen mit thermodynamischen Analysen und der Modellierung der Mikrostruktur. Um das letzte Ziel der Vorhersage von mechanischen Gussteileigenschaften zu erreichen, ist künftig noch eine Kopplung mit der Vorhersage

der Gussfehler vorgesehen. Auf diesem Gebiet sind bereits Untersuchungen und Entwicklungen im Rahmen unterschiedlicher Projekte im Gange.

Zusammenfassung

Die effektive Nutzung computerbasierter Modellierung des Gießereiprozesses hat dazu beigetragen, das Verständnis dieses Fertigungsverfahrens zu vertiefen. Sowohl in Bezug auf das Design der Gussteile und der Optimierung der Prozesse wird die Gießereisimulation auch in Zukunft eine immer stärkere Rolle einnehmen, insbesondere um ein Bauteil für eine spezifische Beanspru-

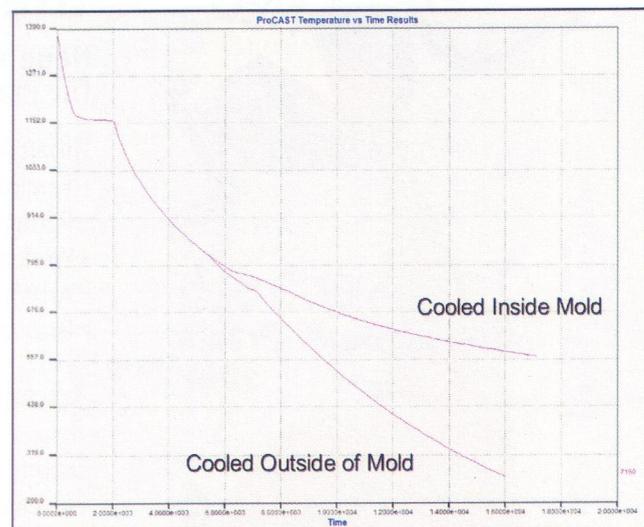


Bild 13. Abkühlkurven an derselben Stelle zeigen die Abkühlraten, bei Verbleiben des Teils in der Form, beziehungsweise bei einem früheren Auspacken

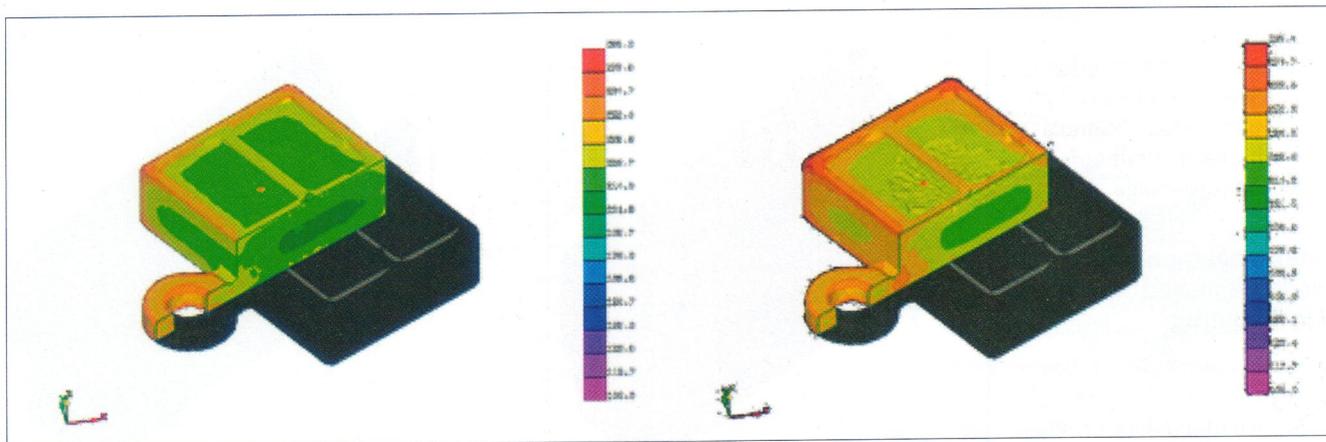


Bild 14. Entsprechende Zugfestigkeiten – links: Verbleib des Teils in der Form – rechts: früheres Auspacken (ProCAST-Ergebnisse, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Caterpillar, Inc., USA)

chung auslegen zu können. Der Fortschritt in der Entwicklung der Rechentechnik ermöglicht die Anwendung von Mehrprozessortechnik, so dass auch komplexe Bauteile mit kurzen Rechenzeiten berechnet werden können.

Das Verständnis von Spannung und Verformung, Mikrostruktur, mechanischen Eigenschaften, sowie Gas- und Mikroporositäten kann mit Hilfe von Gießereisimulation in den kompletten Entwicklungsprozess eines Bau-

teils integriert werden, um geforderte mechanische Eigenschaften zu erreichen, und Bauteile bereits im ersten Anlauf fertigen zu können.

Da von Gießereien sowohl in Bezug auf Preis und Lieferzeiten einem grösser werdenden Druck ausgesetzt sind, werden Softwarepakete, wie ProCAST und PAM-QUIKCAST, die umfangreiche Lösungen in Bezug auf Gießereisimulation bieten, immer populärer in der Gießereiindustrie. ◀

i Literatur

- [1] E-tip 28, www.calcom.ch
- [2] ProCAST, PAM-QUIKCAST and CALCOSOFT are commercial software distributed by ESI Group, France
- [3] Campbell, J., *Castings*, Butterworth-Heinemann Ltd., 1993
- [4] G. Couturier and M. Rappaz, "Modeling of Porosity Formation in Multicomponent Alloys in the presence of several dissolved Gases and Volatile Solute Elements", *Symposium on Simulation of Aluminum Shape Casting Processing*, Edited by Qigui Wang (TMS, 2006)
- [5] PAMTALK 30, Material Properties prediction. ESI Group quarterly magazine
- [6] Adi Sholapurwalla, Sam Scott, "Integration of Advanced Simulation Techniques with Process Development in the Modern Foundry", AFS Metalcasting Congress 2006, Paper 06-032