PROZESSIMULATION DES WERKSTOFFES GUSSEISEN MIT VERMICULARGRAPHIT

WERKZEUG ZUR UNTERSTÜTZUNG DER ENTWICKLUNG EINER NEUEN MOTORENGENERATION

Jörg C. Sturm

MAGMA GmbH, Aachen

EINLEITUNG

Der Substitutionswettbewerb der Werkstoffe in der Automobilindustrie stellt den klassischen Konstruktionswerkstoff Gußeisen vor immer größere Herausforderungen. Auf der Suche nach hochfesten Alternativen für Gußeisen mit Lamellengraphit findet für den Motorenbau neben legierten Gußeisensorten seit längerem Gußeisen mit Vermiculargraphit (GJV) zunehmendes Interesse **(Bild 1).**

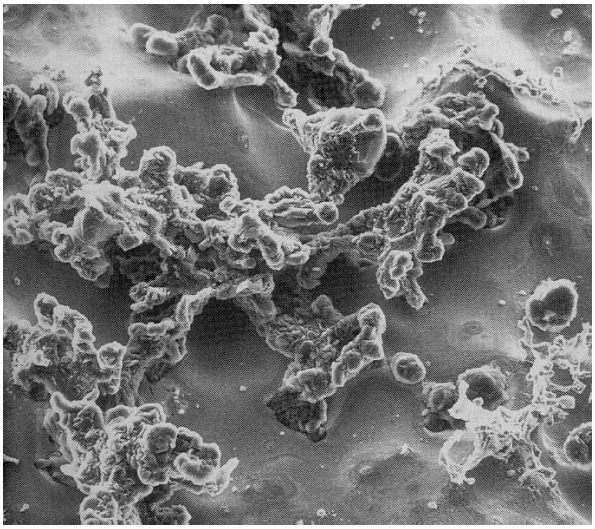

Bild 1: Typische Graphitmorphologie von Gußeisen mit Vermiculargraphit. *Typisch sind die "wurmartigen" Graphitaggregate, die ausgehend von einem Keim in einer eutektischen Zelle wachsen /1/.*

Seit Beginn der neunziger Jahre wurden unterschiedliche Methoden für eine reproduzierbare Prozeßkontrolle über die Einstellung des Keimzustandes, der Magnesiumzugabe oder des Sauerstoffhaushaltes der Schmelze vorgeschlagen (umfassende Übersichten in [1,2]). Dies öffnete dem Werkstoff auch als

Konstruktionswerkstoff für den Motorenbau, hier insbesondere für Kurbelgehäuse, neue Chance. Dabei werden GJV gegenüber Aluminiumlegierungen spezifische Vorteile für die Konstruktion von hochbelasteten Motoren zugeschrieben **(Tabelle 1).**

Unsicherheiten der Konstrukteure insbesondere bezüglich der reproduzierbaren Herstellbarkeit des Werkstoffes (Gußeigenschaften) sowie der Bearbeitbarkeit der Gußteile auf vorhandenen Bearbeitungseinrichtungen für Kurbelgehäuse aus Gußeisen mit Lamellengraphit verhinderten jedoch für längere Zeit, GJV als Konstruktionswerkstoff im Motorenbau in Breite in Serie einzusetzen

Pro	Contra

¬ Hohe Spitzendrücke
¬ Emissionen
¬ spezifische Leistung
¬ Crash-Länge (Baulänge der Motoren ist kürzer)
¬ Therm. Dehnungen
  ¬ Grundlager
  ¬ Lagerspiel (NVH)
  ¬ Reibverschleiß
¬ Kosten
	¬ Gewicht
	¬ Prestige
	¬ Prozeßstabilität
	¬ Bearbeitung
	¬ Inhomogenitäten
	¬ Werkstoff-Modelle unvollständig
	¬ Wenig Erfahrung

Tabelle 1: Vorteile und Defizite von GVJ im Werkstoffwettbewerb mit Leichtmetall Werkstoffen für den Motorenbau aus der Sicht des Automobilentwicklers. *Neben den motorischen Vorteilen (spezifische Leistung und Emissionen) bietet der Einsatz von GJV dem Konstrukteur auch Vorteile durch die mögliche kompaktere Bauweise des Motors und deutlich reduzierte Probleme bezüglich thermischer Dehnungen. Dies betrifft sowohl den Verschleiß als auch die reduzierten Geräuschemissionen. Weiterhin werden Kostenvorteile gegenüber der Leichtmetallversion gesehen. Dagegen sprechen neben dem Gewicht insbesondere Aspekte, die mit der Reproduzierbarkeit der Herstellung und der Werkstoff-eigenschaften im Bauteil verknüpft sind. Entscheidend für die erfolgreiche Einführung als Konstruktionswerkstoff sind daher ein robustes Design und stabile Herstellungsverfahren. Quelle: U. Weiss u.a. [3]*

Durch den enormen Fortschritt in der Dieseltechnologie und die damit verbundenen stark gestiegenen spezifischen Anforderungen an den Werkstoff sowie erhöhtes Kostendenken in der Automobilindustrie bietet sich GJV nun mehr eine neue Chance. Nach der Einführung von Kurbelgehäusen aus GJV in Hochleistungs-dieselmotoren finden seit kurzem Entwicklungen für V6-Dieselmotoren in Großserien statt. Ein Durchbruch für diesen Werkstoff ist jedoch nur dann möglich, wenn das Werkstoffpotential für eine anwendungs- und gewichtsoptimierte Konstruktion vom Konstrukteur vollständig genutzt werden kann. Hierzu fragen Bauteilentwickler jetzt nach klaren Konstruktionsregeln und Werkzeugen zur Unterstützung bei der Auslegung des Bauteils.

Die Prozeßsimulation des Gieß- und Erstarrungsverhaltens ist in vielen Eisen-gießereien Stand der Technik. Die besonderen Freiheitsgrade, die der Werkstoff

Gußeisen durch über die Legierungszusammensetzung und Metallurgie bietet, muß auch vom Simulationsprogramm abgebildet werden können. Hierzu müssen die Programme in der Lage sein, den Zusammenhang zwischen gewählter Zusammensetzung, Behandlung, Impfung und den lokalen Erstarrungsbedingungen zu berücksichtigen, um die tatsächlich entstehenden Gefüge bei der Erstarrung vorhersagen zu können. Dies ist heute für bei Gußeisen mit Lamellengraphit und Gußeisen mit Kugelgraphit in allen genormten Sorten möglich (Details siehe auch [3,4]).

Die Werkstoffeigenschaften des perlitischen Gußeisens mit Vermiculargraphit hängen im Wesentlichen von der sich lokal einstellenden Nodularität des Graphits und damit sowohl von der gewählten Metallurgie, Prozeßkontrolle aber auch Gußteilgeometrie ab. Daher bestehen bei Konstrukteuren große Unsicherheiten über die zu erwartenden Unterschiede zwischen den zu bei der Auslegung des Bauteils berücksichtigten und tatsächlich im Gußteil zu erwartenden mechanischen Eigenschaften. Der Konstrukteur denkt in „Normen“ und sieht variable Gußeigenschaften nicht als Chance, sondern als Risiko für seine Konstruktion.

Hierdurch wird die Notwendigkeit einer intensiven Kopplung der Gießprozeß-simulation mit der Lastfallauslegung deutlich. Das Werkstoffpotential kann nur voll genutzt werden, wenn die tatsächlichen Werkstoffeigenschaften, die sich aus dem Gießprozeß ergeben, Eingang in die Lastfallberechnungen des Konstrukteurs finden (**Bild 2)**. Die Gießprozeßsimulation muß daher Fragen beantworten, die sowohl vom Gießer als auch vom Gußteilkonstrukteur gestellt werden.

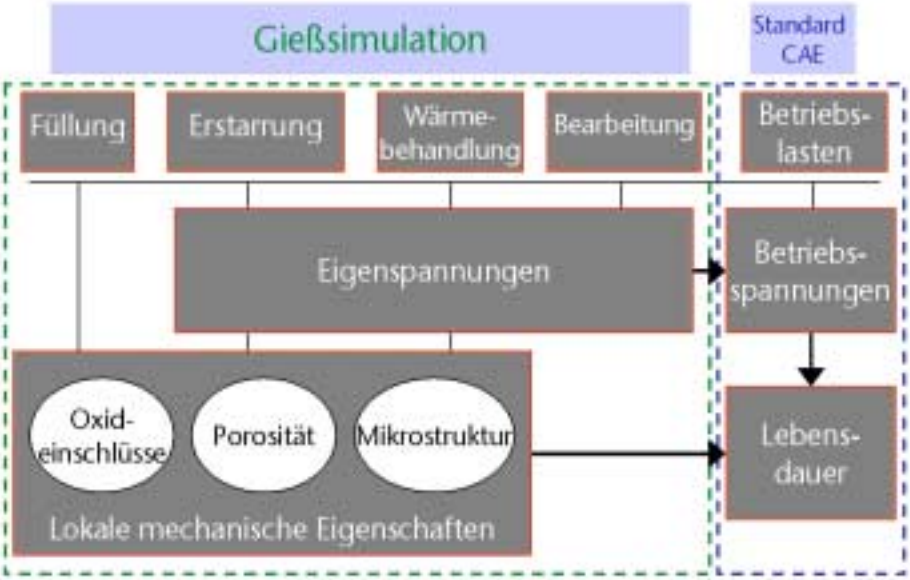

Bild 2: Vorschlag für eine integrierte CAE Unterstützung. *Nur die Kopplung von Gießprozeßsimlation und Lastfallsimulation ermöglicht die Berücksichtigung der tatsächlichen Potentiale des Werkstoffs sowohl in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften als auch bezüglich der auftretenden Eigenspannungen im Bauteil. Quelle: U. Weiss et al. /3/*

Aus diesem Grund ist es wichtig, das Erstarrungsverhalten von GJV nicht nur qualitativ, sondern für die Simulation auch quantitativ, beschreiben zu können. Auch

der Gießer hat nach wie vor Fragen bezüglich des Gieß- und Erstarrungsverhaltens von GJV. Dies gilt sowohl für die reproduzierbare Einstellung der gewünschten Graphitmorphologie als auch für das davon abhängige Speisungsverhalten des Werkstoffes.

Als Teil eines Industrie-Forschungsprojektes mit renommierten Eisengießereien, Automobilherstellern und Technologieanbietern wurden daher die Voraussetzungen geschaffen, das Wachstum und die Erstarrung von GJV als Funktion der Zusammensetzung, der verwendeten Metallurgie und der lokal vorhandenen Abkühlbedingungen vorherzusagen [6].

EXPERIMENTELLE VORGEHENSWEISE

Die Grundlage für die Ermittlung des Erstarrungsverhaltens von GJV waren umfangreiche Experimente, bei denen sowohl die Schmelzemetallurgie als auch die lokalen Abkühlbedingungen als Einflußgrößen im Hinblick auf die Graphitausbildung untersucht wurden.

Basis für alle Experimente war eine speziell entwickelte Modellplatte. Das Modell bestand aus vier plattenförmigen Gußteilen mit unterschiedlicher Wanddicke, in denen jeweils der Abkühlverlauf gemessen wurde. Hierzu wurden die Formen jeweils mit schnellen Thermoelementen instrumentiert. Weiterhin wurden sogenannte "Speisungskreuze", in denen die Tendenz zur Mikroporosität im Wärmezentrum quantitativ untersucht wurde, sowie Zugproben und Keilproben gegossen (**Bild 3)**. Zur Simulation des Gieß- und Erstarrungsverhaltens wurde ein entsprechendes 3D-Modell konstruiert und genutzt **(Bild 4).**

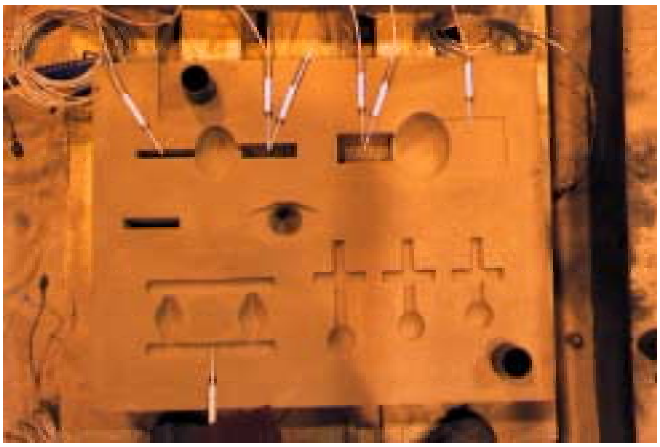

Bild 3: Layout der Versuchsform *Für die Korrelation Metallurgie - Abkühlverlauf - entstehende Gefüge wurden plattenförmige Gußteile mit unterschiedlicher Wandstärke von 5 bis 40mm abgegossen, die mit schnellen Thermoelementen instrumentiert waren.*

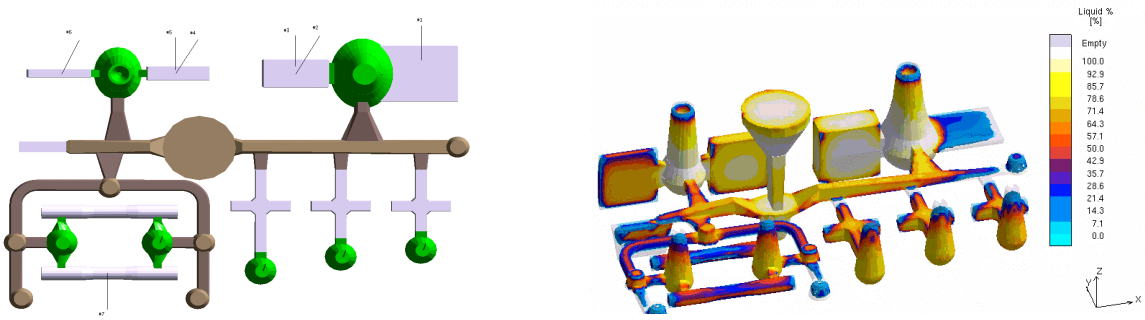

Bild 4: Volumenmodell des Versuchsteils mit Thermoelementpositionen (a) und simulierte Verteilung des Erstarrungsanteils im Gußteil für einen Zeitpunkt (b).

Um eine optimale Auflösung der Abkühlkurven sicherstellen zu können, wurden speziell konstruierte Mantelthermoelemente verwendet, die sehr kurze Ansprechzeiten aufwiesen.

Alle Experimente wurden in einer Seriengießerei unter normalen Produktionsbedingungen und Schmelzverfahren durchgeführt. Die Schmelzequalität wurde mit Hilfe des Sintercast-Verfahrens kontrolliert [1]. Um das volle Spektrum von unterschiedlichen Graphitmorphologien (von Lamellengraphit über Vermiculargraphit bis hin zu Kugelgraphit) einstellen zu können, wurden insgesamt sieben unterschiedliche Schmelzequalitäten vorbereitet **(Tabelle 2)**.

Serie	5 mm		10 mm		20 mm		40 mm	
	Lam. %	Nod. %	Lam. %	Nod. %	Lam. %	Nod. %	Lam. %	Nod. %
A1	100	1.1	100	1.45	100	0.43	100	0.74
A2	100	0.18	100	0.24	100	0.26	100	0.14
B1		69		75		51		54
B2		81		85		79		68
C1	-	-	-	-	-	-	-	-
C2		63		38	25	6	10	6
D1		43		29		21		23
D2		43		41		33		31
E1		62		39	2	10	5	9
E2		46		41	20	5	2	8
F1		66		33		10		3
F2		59		31		16		11
G1		40		23		11		7
G2		47		23		19		12

Tabelle 2: Matrix der Experimente. *Die verschiedenen Spalten kennzeichnen die gefundene Graphitstruktur in den abgegosssenen Platten für unterschiedliche Wandstärken bzw. den entsprechenden Abkühlraten während der Erstarrung. Die Indizes 1 und 2 entsprechen den niedrig und normal geimpften Chargen*

Vor dem Gießen wurden die Schmelzen in jeder Pfanne kontrolliert. Falls die Schmelze nicht die angestrebten Einstellungen oder den gewünschten Keimzustand aufwies, wurden entsprechende Zugaben durch Drahtimpfung durchgeführt. Anschließend wurde nach einer weiteren Kontrolle die Formen abgegossen. Von jeder Schmelze wurden zwei Gußteile mit unterschiedlichem Keimzustand gegossen. Vor dem Gießen des zweiten Gußteils wurde hierfür eine konstante Menge Impfmittel in Form von Draht in die Pfanne zugegeben. So war die erste Schmelze als „niedrig“ geimpft eingestellt, während die Schmelze für den jeweils zweiten Kasten als „normal“ geimpft angesehen wurde.

AUSWERTUNG DER GEFÜGE UND POROSITÄTEN

Im Anschluß an die Versuche wurde Gefüge und Eigenschaften umfangreich quantitativ ausgewertet und dokumentiert. Von jeder Platte wurden Proben für die Gefügeuntersuchung in der Nähe des Thermoelements genommen. Zunächst wurden die Proben geschliffen und poliert, um die Graphitmorphologie zu bestimmen. Die Schliffbilder zeigten, daß die Gefüge je nach Schmelzeeinstellung von vollständig lamellar bis vollständig sphärolitisch variierten. Damit konnte der Einfluß der Magnesiumbehandlung und des Keimzustandes auf die Gefügebildung ermittelt werden. Darüber hinaus konnte die Abhängigkeit der Graphitausbildung von der Abkühlgeschwindigkeit deutlich abgeleitet werden **(Bild 5)**.

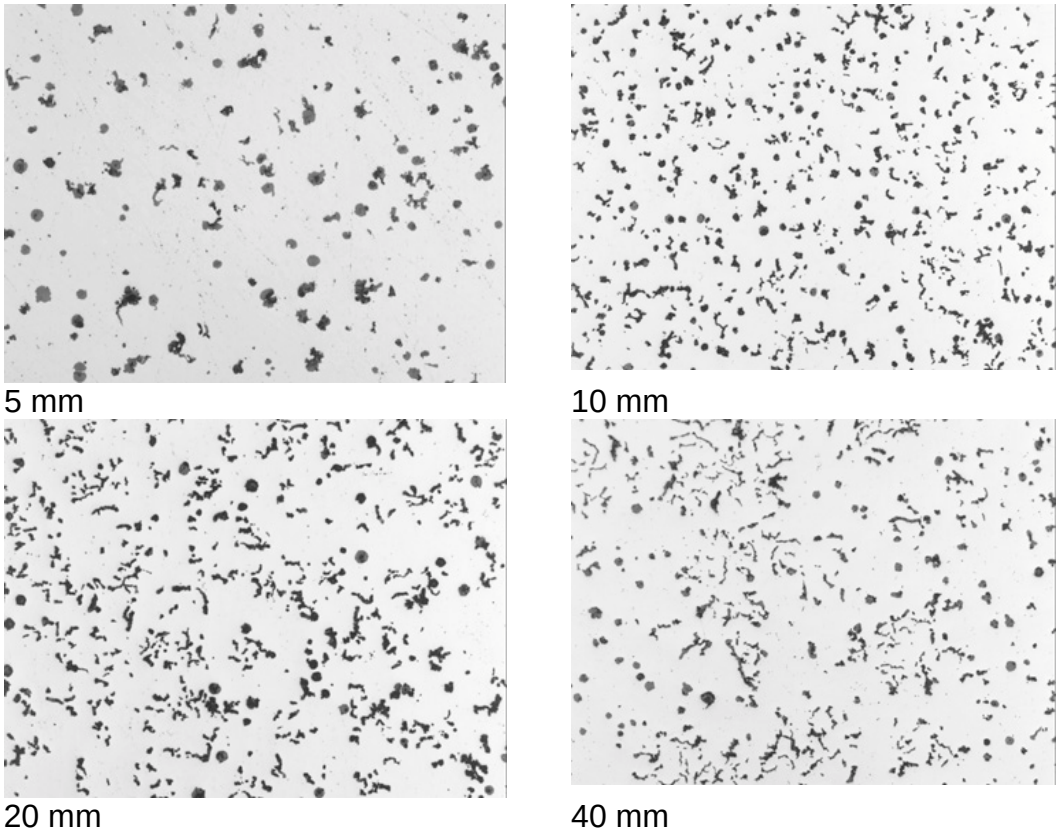

Bild 5: Graphitmorphologie für eine Schmelze als Funktion der Abkühlbedingungen. *Die Tendenz zur zunehmenden Nodularität mit abnehmender Wandstärke wird auch rein qualitativ an den Schliffbildern deutlich.*

Die Speisungskreuze wurden genutzt, um den Einfluß der Prozeßparameter auf das Speisungsverhalten zu untersuchen **(Bild 6)**. Die Speisungskreuze wurden geröntgt und die Mikroporositäten durch automatischer Bildanalyse bewertet.

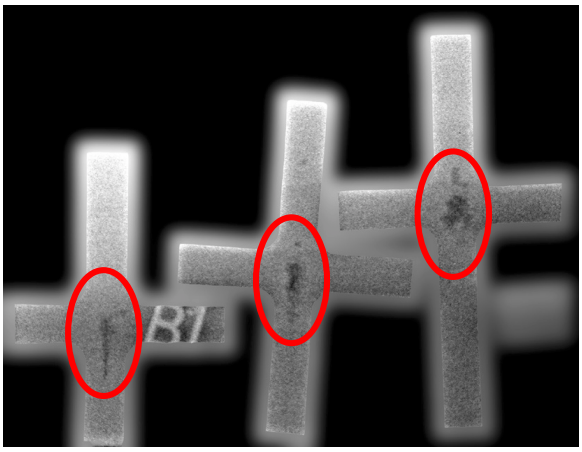

Bild 6: Verteilung der Mikroporositäten in den Speisungskreuzen ermittelt von Röntgenbildern durch automatische Bildanalyse.

ERMITTLUNG DES ERSTARRUNGSABLAUFES

Eine wesentliche Aufgabenstellung in diesem Projekt war es, den Erstarrungsablauf von GJV und die Bedingungen für die Bildung von Vermiculargraphit gegenüber Kugelgraphit zu ermitteln. Dies war eine Voraussetzung, um entsprechende physikalische Modelle zu entwickeln, die in Simulationsprogrammen Verwendung finden können. Hierzu war es zunächst nötig, quantitative Informationen über die Wachstumsmorphologie des Graphites zu erhalten. Da der Keimzustand für die Bildung von GJV eine entscheidende Rolle spielt, war es darüber hinaus unverzichtbar, herauszufinden, wieviele eutektische Zellen unter den festgelegten metallurgischen und thermischen Randbedingungen wachsen. Diese Information ließ sich durch normale Metallographie im Gegensatz zu Gußeisen mit Lamellengraphit wie auch aus der publizierten Literatur nicht erhalten. Aus diesem Grund wurde eine spezielle Farbätztechnik entwickelt, die das Seigerungsprofil in den eutektischen Zellen erkennen läßt. Hieraus konnten dann Korngrößen beim Wachstum von GJV ermittelt werden (Details in [7]).

Ein Beispiel für ein auf diese Art und Weise geätztes Gefüge wird in **Bild 7** gezeigt. Im Allgemeinen repräsentieren die hellblau geätzten Gebiete Bereiche, die zu einem frühen Zeitpunkt erstarren. Daher sind die Austenitdendriten im Allgemeinen sehr leicht zu erkennen. Bild 7 zeigt auch, daß die "GJV-Zellen" im Gegensatz zu den Kugelgraphitzellen im Allgemeinen aus sehr großen Aggregaten von "Graphitwürmern" bestehen.

Aus den farbgeätzten Bildern konnte die Anzahl der wachsenden GJV-Zellen in unterschiedlichen Platten, und damit für unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten, ermittelt werden. Diese Information wurde danach mit den Informationen aus den Abkühlkurven verknüpft, um ein spezielles Keimbildungsgesetz für GJV zu entwickeln.

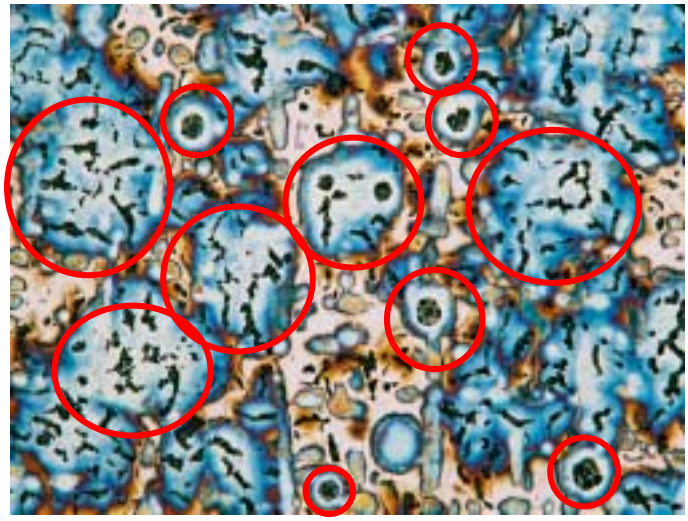

Bild 7: Farbätztechnik erlaubt eine quantitative Bestimmung der Korngrößen von eutektischen Zellen aus Vermiculargraphit im Vergleich zu Kugelgraphit

ABKÜHLKURVEN UND THERMISCHE ANALYSE

Die Temperaturmessungen wurden gleichzeitig für alle Formen durchgeführt. Hieraus ergab sich eine Gesamtzahl von 96 Thermoelementen bzw. Abkühlkurven.

In **Bild 8** sind exemplarisch die Abkühlkurven der zentralen Thermoelemente für die 20 mm Platte für alle Schmelzemodifikationen bei guter Impfung dargestellt. Sobald die Bildung von lamellarem Graphit vermieden werden kann, wird deutlich, daß sich der Verlauf der Abkühlkurven sehr verändert, was sich auf die unterschiedlichen Erstarrungsabläufe mit zunehmender Nodularität zurückführen läßt.

Die Abkühlkurven wurden für eine thermische Analyse in unterschiedlicher Weise genutzt. Zunächst konnten die Liquidus- und Solidustemperaturen oder aich die Temperaturen für die Phasenumwandlung aus der Ableitung der Abkühlkurven in Bezug auf Zeit oder Temperatur ermittelt werden. Darüber hinaus bietet die thermische Analyse die Möglichkeit, Umwandlungsgeschwindigkeiten bzw. den Anteil an umgewandelter (oder auch erstarrter) Phase zu berechnen. Auf diese Weise konnten die für jede Phase berechneten Erstarrungsraten mit dem entstandenen Gefüge verknüpft werden. Dies ermöglichte die Berechnung der Wachstumsgeschwindigkeit des Vermiculargraphits wie auch die Ableitung der für Simulationsmodelle nötigen kinetischen Konstanten.

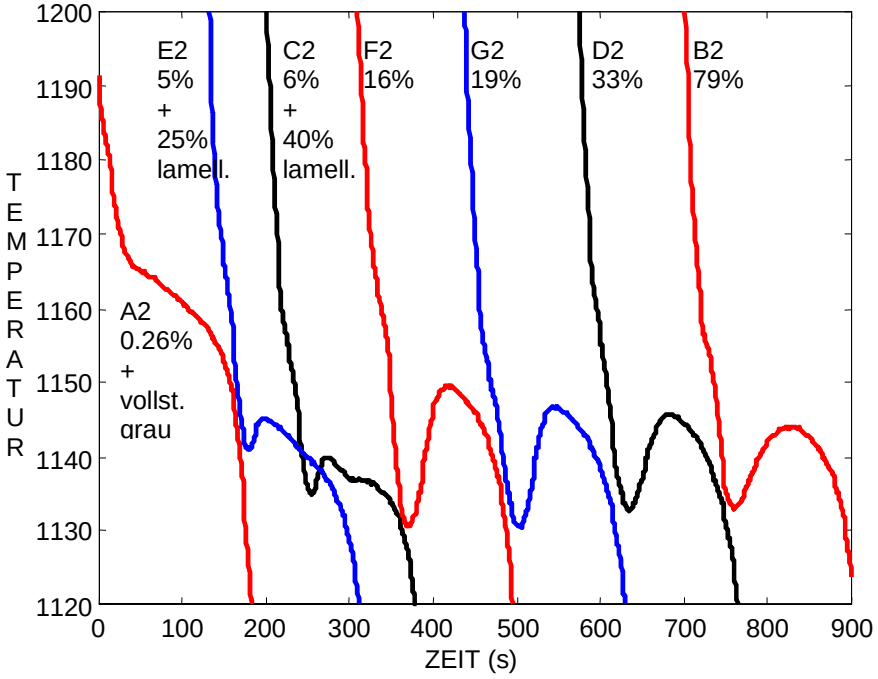

Bild 8: Zusammenfassung gemessener Abkühlkurven für unterschiedliche Schmelzen jeweils in der 20 mm Platte. *Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind die Kurven auf der Zeitachse verschoben angeordnet. Dabei nimmt die "Nodularität" von Grau- über Vermiculargraphit bis hin zu reinem Kugelgraphit von links nach rechts zu. Die entsprechenden gemessenen Nodularitätswerte bzw. die Menge an lamellarem Graphit (falls vorhanden) sind der jeweiligen Kurve zugeordnet.*

SIMULATION DES GEFÜGES VON GUSSEISEN MIT VERMICULARGRAPHIT

Wie bereits zuvor erwähnt, wurden die Ergebnisse der Auswertung genutzt, um ein Keimbildungs- und Wachstumsmodell für GJV-Zellen zu ermitteln. Diese wurden in den Eisengußmodul MAGMAiron des Simulationsprogramms MAGMASOFT® integriert. Der Eisengußmodul MAGMAiron berechnet den Erstarrungsablauf von Gußeisenwerkstoffen als Funktion der gewählten Metallurgie, der Legierungszusammensetzung und der lokalen Abkühlbedingung. Dies geschieht durch sogenannte kinetische Wachstumsmodelle der einzelnen Phasen, die eine Vorhersage von lokalen Gefügen und Eigenschaften erlauben (Mikromodellierung). Bisher war es möglich, auf diese Weise den Erstarrungsablauf von Gußeisen mit Lamellengraphit bzw. Gußeisen mit Kugelgraphit zu ermitteln. Durch die Integration der neuen Modelle für Gußeisen mit Vermiculargraphit wird es jetzt möglich, unterschiedliche Graphitmorphologien, die im Wettbewerb zueinander wachsen, gleichzeitig zu berechnen. Dabei war es nicht Ziel dieses Projektes, den sehr sensitiven Übergang von lamellarem Graphit zu Vermiculargraphit quantitativ zu beschreiben.

Die wesentlichen Ergebnisse einer Simulation mit den neuen Modellen sind damit:

- Nodularität (beeinflußt vom effektiven Magnesiumgehalt, dem Keimzustand und den lokalen Abkühlbedingungen)
- Porosität (beeinflußt vom effektiven Magnesiumgehalt, dem Keimzustand und den lokalen Abkühlbedingungen)

Um die Qualität und Empfindlichkeit der neuen Modelle zu verifizieren, wurden für die „Modellplatte“ unterschiedliche Fälle simuliert, bei denen sowohl der effektive Magnesiumgehalt als auch der Keimzustand im Modell verändert wurde.

Bild 9 zeigt, wie die simulierten Abkühlkurven von unterschiedlichen Keimbildungsbedingungen beeinflußt werden. In **Bild 10** wird deutlich, wie die Abkühlkurven sich verändern, wenn sich der effektive Magnesiumgehalt bei gleichem Keimzustand verändert. Die simulierten Abkühlkurven zeigen klar, daß sowohl die Rekaleszenz als auch die Rekaleszenzgeschwindigkeit ansteigen, wenn die Nodularität absinkt. Dies ist in Übereinstimmung mit bekannten Experimenten und der Literatur [2].

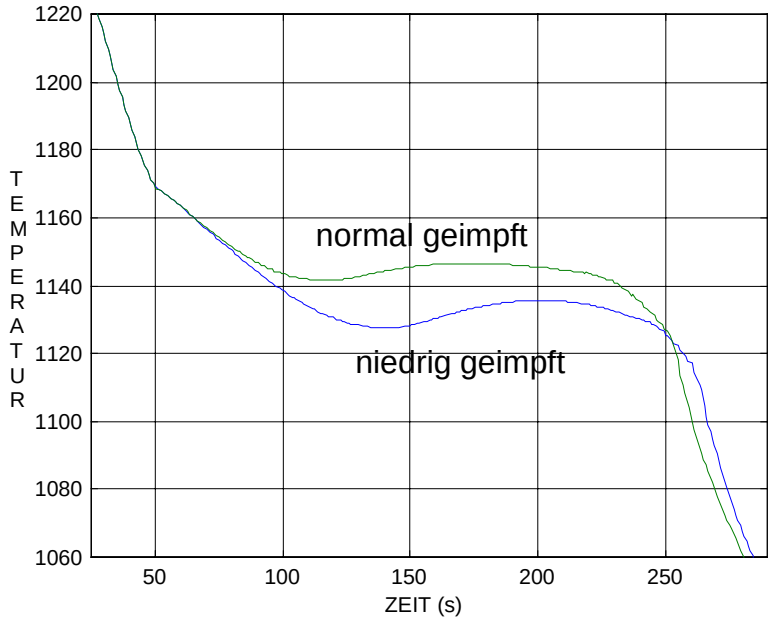

Bild 9: Simulierte Abkühlkurven in der Modellplatte für GJV bei unterschiedlichen Impfzuständen. *Bei einem konstanten effektiven Mg-Gehalt von 0,007% wurde die sog. "Effektivität der Impfung" im Simulationsprogramm zwischen den Werten für "niedrig" und "normal" geimpft variiert.*

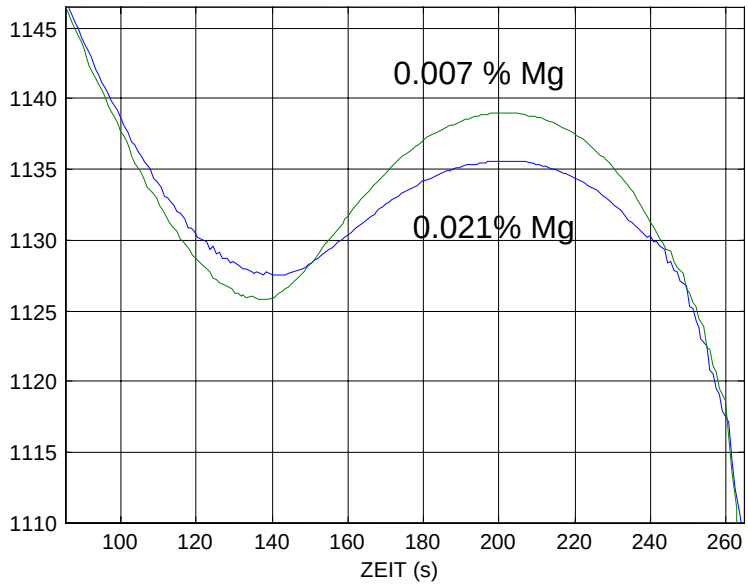

Bild 10: Simulierte Abkühlkurven in der Modellplatte für GJV bei unterschiedlichen Mg-Gehalten. *Bei einer konstant gehaltenen Effektivität der Impfung wurde der effektive Mg-Gehalt zwischen 0,007% und 0,021% variiert.*

Bild 11 zeigt die simulierte Verteilung der Nodularitäten im gesamten Versuchsgußteil im Bereich der Formteilung, d.h. in der Ebene, in der die Abkühlkurven in den Experimenten positioniert waren. Für diese Bereiche wurde auch die experimentelle Auswertung der Nodularität durchgeführt. Die Übereinstimmung zwischen Experiment und simulierten Nodularitäten ist sehr zufriedenstellend.

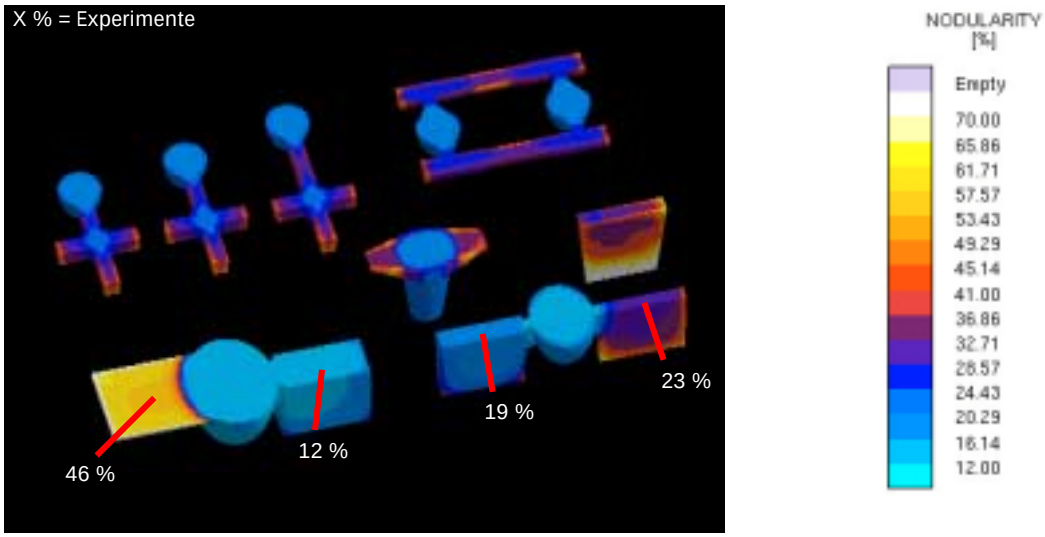

Bild 11: Simulierte Nodularitäten (in %) im Versuchsteil im Vergleich zu gemessenen Werten. *Die experimentell bestimmten Nodularitäten wurden jeweils im Zentrum der Platten in der Nähe der Thermoelemente ermittelt.*

ANWENDUNG UND VERIFIKATION DER MODELLE AM BEISPIEL EINES REALEN MOTORBLOCKS

Im Anschluß wurden die neuen Modelle weiter überprüft. Dies geschah im Rahmen einer umfangreichen experimentellen Untersuchung, die von einer namhaften Eisengießerei gemeinsam mit einem Automobilhersteller an einem 4-Zylinder-Motorblock durchgeführt wurde [3].

Hierfür wurden mehrere Motorblöcke aus GJV aus einer größeren Serie in verschiedensten Ebenen aufgeschnitten. In den Schnitten wurden u.a. die Nodularität quantitativ ausgewertet und mit den Vorhersagen der Simulation verglichen. **Bild 12** zeigt simulierte Nodularitätswerte für einen realen Motorblock.

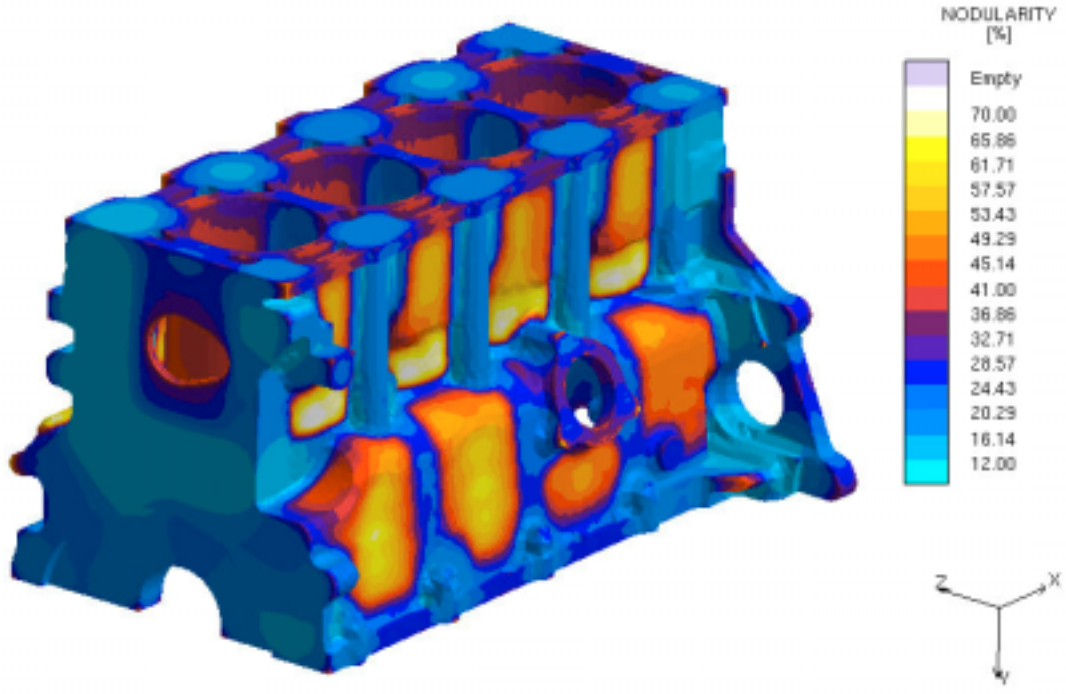

Bild 12: Simulierte Nodularitäten im Motorblock. *Die Simulation als auch begleitende Experimente zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Nodularität als Funktion der Abkühlbedingungen.*

Der umfangreiche Vergleich von experimentell bestimmter Nodularität mit den Simulationsergebnissen bestätigt die zuvor ermittelten guten Korrelationen für die Vorhersage der lokalen Nodularitäten im Gußteil (für weitere Details hierzu wie auch zu Porositätsvorhersagen mit den neuen Modellen siehe [8]).

Die Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für den Einsatz der neuen Modelle als Werkzeug zur Entwicklungsunterstützung.

Die grundlegenden Ergebnisse dieser Arbeit wurden innerhalb eines Projektes erzielt, das von einem europäischen Konsortium von Eisengießereien (Eisenwerk Brühl, Deutschland, Fagor, Spanien, Halberg Guss, Deutschland, und Scania, Schweden) und zwei Technologieanbietern (Elkem, Norwegen, und Sintercast, Großbritannien)finanziert wurde. MAGMA und ihre Partner MAGMA Technology, Dänemark, Foundrysoft sowie die Universität von Jönköping in Schweden sind für das Interesse und die Bereitschaft ihrer Partner, dieses Projekt durchzuführen, sehr dankbar. MAGMA bedankt sich darüber hinaus beim Ford Forschungszentrum und bei Eisnwerk Brühl für die Möglichkeit, die Ergebnisse an realen Gussteilen überprüfen zu können.

ZUSAMMENFASSUNG

Der verstärkte Einsatz von Gußeisen mit Vermiculargraphit speziell für Motorblöcke in Großserien erforderte eine Weiterentwicklung der bestehenden Simulationsmöglichkeiten für Gußeisenwerkstoffe. Hierdurch sollte das spezielle Erstarrungsverhalten dieses relativ neuen Werkstoffen quantitativ vorhergesagt werden können. Gießereiprozeßsimulation wird in Eisengießereien sowohl für Gußeisen mit Lamellengraphit als auch für Gusseisen mit Kugelgraphit bereits umfangreich genutzt. Um das Erstarrungsverhalten auch für Gußeisen mit Vermiculargraphit, dessen Graphitausbildung sehr stark von der gewählten Metallurgie und den lokalen Abkühlbedinungen abhängt, vorhersagen zu können, wurden umfangreiche instrumentierte Experimente durchgeführt. Die Auswertung dieser Experimente und insbesondere die Verknüpfung von Gefügeauswertung und thermischer Analyse führte zu einem neuen quantitativen Verständnis des Erstarrungsablaufes und des Wachstums von Vermiculargraphit.

Nach dem Test der neuen Modelle an einfachen Teilen wurde die Software auch an einem komplexen Vierzylindermotorblock verifiziert. Die Simulationsergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung bezüglich Nodularität und Porositätsverteilung im Vergleich zu den aktuell untersuchten Gußteilen.

Die in diesem Projekt entwickelten Simulationsmodelle ermöglichen es Konstrukteuren, frühzeitig robuste Informationen in Bezug auf die zu erwartende Nodularität und Porositätsverteilung in komplexen Gußteilen zu erhalten. Die Simulationswerkzeuge erlauben es auch der Gießerei, die gewählten Prozeßbedingungen für die Herstellung von GJV für Neuteile zu überprüfen. Damit bietet diese Entwicklung neue Chancen sowohl für den Konstrukteur als auch für den Gießer: Erstmals unterstützt Prozeßsimulation als Werkzeug die optimale Nutzung dieses doch noch neuen Konstruktionswerkstoffes bereits während der Bauteilentwicklung oder während Verfahrensauslegung.

SCHRIFTTUM

/1/ Steve Dawson: "Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron", paper based on a presentation made at the 102nd AFS Casting Congress, Atlanta, 1998

/2/ Milan Lampic-Opländer: "Gußeisen mit Vermiculargraphit", Teil 1 und 2, Giesserei-Praxis 1/01 und 4/01 S. 17 und S. 145

/3/ Ulrich Weiss, Maik Broda, Pingyan Rong: "Die Rolle des Eisengießers bei der virtuellen Produktentwicklung im Automobilbau", Vortrag auf dem MAGMA Seminar "Gußeisen - Ein Werkstoff mit Zukunft", Duisburg, Mai 2002

/4/ Hansen, P., M. Lipinski and M. Schneider: " Numerical Techniques And Their Application In Foundry ", Numerical Simulation of Foundry Processes, pp. 11-50, edited by F. Bonollo, S.Odorizzi, Sept. 2001

/5/ Svensson, I.L., M. Wessén: " Foundry Of Cast Irons : Processing and Simulation ", Numerical Simulation of Foundry Processes, S. 87-145, Sept. 2001

/6/ Abschlußbericht “CGI Project”, internes Papier 2001

/7/ J.M. Motz, Prac. Met., Vol. 25, S. 285, 1988

/8/ A. Egner-Walter, J.C. Sturm und Ulrich Weiß, „Vorhersage von Eigenschaften von Gußeisen mit Vermiculargraphit“, noch zu veröffentlichen