

# Schwindungsanalyse bei dickwandigen Kugelgraphit-Gussteilen unter Berücksichtigung des Expansions- und Kontraktionsverhaltens

| Autoren Yutaka Miyamoto, Haruki Itofuji

Mittels Computersimulation wurde das volumetrische Expansions-/Kontraktionsverhalten von dickwandigen Kugelgraphit-Eisengussteilen während der Erstarrung untersucht, um das Vorhandensein von Lunkern vorherzusagen. Zur genauen Erfassung und Quantifizierung des Expansions-/Kontraktionsverhaltens wurde eine reale Erstarrungskurve in Bereiche an den jeweiligen Knickpunkten unterteilt. Anschließend wurde jedem Bereich die theoretische Menge an volumetrischer Expansion und Kontraktion gemäß einem Fe-C-System-Zustandsschaubilds zugeordnet. Die qualifizierten Werte wurden als Analysefaktor für eine Simulationssoftware übernommen. Die Berechnungsergebnisse zeigten beispielsweise bei Position und Menge eine gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Schrumpfungsverhalten.

Schlüsselwörter: Kugelgraphit-Gusseisen, dickwandiger Bereich, computergestütztes Engineering, CAE, Simulation, Schrumpfung

## Shrinkage Analysis Considering Expansion and Contraction Behavior in Heavy-Section Spheroidal Graphite Iron Castings

The volumetric expansion/contraction behavior of heavy-section spheroidal graphite iron castings during solidification was examined via computer simulation to predict the existence of shrinkage cavities. To accurately grasp and quantify the expansion/contraction behavior, an actual solidification curve was divided into regions at the inflection points. And then, each region was given the theoretical amount of volumetric expansion and contraction according to a Fe-C system equilibrium diagram. The qualified values were adopted as the analytical factor for simulation software. The calculation results showed good matching to the actual shrinkage behavior such as the position and quantity.

Keywords: spheroidal graphite iron, heavy section, computer-aided engineering, CAE, simulation, shrinkage

### Einführung

In GJS-Eisengussteilen entstandene Lunker sind in der Praxis von Form und Abmessung abhängig. [1-3] Diese Lunker wurden im Allgemeinen durch manuelle Berechnung unter Verwendung der nachstehend beschriebenen Formeln [4, 5] simuliert:

Gussmodul,  $M$  (cm) = Volumen/Oberfläche des Bereichs

Formfaktor,  $F$  = (Breite + Länge)/Dicke  
Speiserlos-Index,  $I$  (cm) =  $Mc/F$

Vor Kurzem wurde die Computersimulation in die Praxis eingeführt. [6-13] Das Niyama-Kriterium [6] war das populärste Kriterium für die Schrumpfungsanalyse in aktuellen Indizes. Für die Anwendung auf Gussteile aus Kugelgraphit-Gusseisen reicht dies jedoch noch nicht aus, da die

Simulationsergebnisse nicht genau genug sind. Der Grund dafür ist, dass Software für Stahl, Aluminium, Magnesium usw. verwendet wird, wobei beispielsweise nur eine Schrumpfungstyp-Erstarrung Anwendung findet. Es gab fast keine Software, die das volumetrische Expansions- und Kontraktionsverhalten berücksichtigte. Selbst wenn die Software das Verhalten berücksichtigte, war dies unzureichend. Daher stimmten die Analyseergebnisse in der Praxis nicht mit den tatsächlichen Schrumpfungsphänomenen überein.

In dieser Studie wurde eine innovative Simulationsmethode erprobt, bei der das theoretische Ausmaß der volumetrischen Expansion und Kontraktion auf der Erstarrungskurve berücksichtigt wurde.

### Statistische Versuchsplanung

#### Vorbereitung der Versuchsblöcke

Zunächst wurden Mustergussteile in Furansandformen gegossen und die Erstarrungskurven gemessen. Nach dem Auspacken der Form wurden die Proben in der Mitte zersägt und die Qualität in den Schnitten untersucht. **Bild 1** zeigt das Gussdesign für würfelförmige und flache Blöcke. Die Größe der würfelförmigen Blöcke wurde so festgelegt, dass der Wert des Gießmoduls ( $M$  = Volumen/Oberfläche) im Bereich von 1 bis 5 und 10 cm lag. Die Länge einer Seite betrug  $M \times 60$  mm. Die Größe der flachen Blöcke betrug 220 mm x 300 mm x 70 mm (Breite x Länge x Dicke). Die Blöcke wurden basierend auf einem speiserlosen Design hergestellt. In einer Variante mit Kühlleisen wurden zwei Kühlleisen von 50 mm x 100 mm x 50 mm (Breite x Länge x Dicke) in der oberen bzw. unteren Form angebracht. In das Design mit Speiser wurde ein Speiser von 240 mm x 240 mm eingesetzt. Die Form wurde hergestellt, indem recycelter Quarzsand mit 0,8 Gew.-% Furanharz (bezogen auf den Sand) und 40 Gew.-% Katalysator (bezogen auf das Harz) vermischt wurde.

Zum Schmelzen wurde ein Niederfrequenz-Induktionsofen mit einer Kapazität von 10 Tonnen verwendet. Als Schmelzmaterial wurde Kreislaufmaterial verwendet. Nach dem Schmelzen wurde die chemische Zusammensetzung bei 1450 °C eingestellt, und das geschmolzene Basiseisen wurde 5 Minuten lang auf über 1500 °C überhitzt. Anschließend wurde es natürlich abgekühlt und abgestochen. Die Sphäroidisierungs- und Impf-Prozesse wurden mittels Sandwichverfahren durchgeführt, wobei 1,2 Gew.-% Fe, 45 Massen-% Si, 5,5 Massen-% Mg-Legierung, 0,3 Gew.-% Fe, 75 Massen-% Si-Legierung und 2,0 Gew.-% Abdeckmaterial (Stahlschrottspläne) nacheinander in der Gießpfanne aufgeschichtet wurden. Die Erstarrungskurve wurde unter Verwendung eines K-Thermoelements mit einem Durchmesser von 0,3 mm gemessen, das mit 1,6 mm Inconel ummantelt war; das

Thermoelement wurde in ein Quarzrohr mit einem Außendurchmesser von 5,0 mm und einem Innendurchmesser von 3,0 mm eingeführt. Anschließend wurden die Thermoelemente im Zentrum und in der Mitte der Seitenfläche des würfelförmigen Blocks angebracht. In der Zwischenzeit wurde der flache Block im Zentrum platziert.

Zur Bestätigung des Vorhandenseins von Lunkern wurde eine weitere identische Form für würfelförmige Blöcke ohne K-Thermoelement hergestellt. Das Gießen wurde nacheinander durchgeführt.

**Analyse der Lunker**

Die Vorhersage des Vorhandenseins von Lunkern wurde in dieser Studie durchgeführt, indem das Expansions-/Kontraktionsverhalten während der Erstarrung quantitativ bestimmt und die Ergebnisse auf die Gießsimulation angewendet wurden. Zunächst ergab sich der Anteil der Reaktionszeit an der Gesamterstarrungszeit. Die Reaktionen vom Beginn des Gießens bis zum Ende der Erstarrung traten in folgender Reihenfolge auf: 1) Flüssigkeitskontraktion, 2) Voreutektische Reaktion + Flüssig-

keitskontraktion, 3) Flüssigkeitskontraktion, 4) Eutektische Reaktion, 5) Austenitkontraktion zwischen den Zellen eutektischer Kristalle. Die Start- und Endpunkte jeder Reaktion wurden durch Ablesen der Knickpunkte in der gemessenen Erstarrungskurve bestimmt. Um den Knickpunkt zu bestimmen, wurde die Tangentenmethode angewendet und der Prozentsatz der Reaktion wurde unter der Annahme berechnet, dass am Endpunkt des Gießens und auch am Anfangspunkt der Erstarrung die Erstarrungsrate bei 0,0 % liegt, wie in Bild 2 gezeigt. Bei der Messung des Knickpunkts kann auch die erste Ableitungskurve verwendet werden.

Anschließend wurde die theoretische Volumenänderung berechnet, indem die Menge an Kohlenstoff/Silizium und die ursprüngliche Temperatur des Gussteils am Ende des Abgusses in Gleichung 1.4 eingesetzt wurden.

$$TV = SI + Epg(oder Sp\gamma) + Eeg + Sey \quad [1]$$

Worin gilt:

- TV = Volumenänderung,
- SI = Flüssigkeitsschrumpfung (Vol.-%),
- Epg = Expansion von voreutektischem Graphit (Vol.-%),
- Sp = Kontraktion von voreutektischem Austenit (Vol.-%),
- Eeg = Expansion von eutektischem Graphit (Vol.-%),
- Sey = Kontraktion von eutektischem Austenit (Vol.-%)

In den vorhergehenden Gleichungen wurde Epg verwendet, wenn die chemische Zusammensetzung übereutektisch war und Sp wurde verwendet, wenn die Zusammensetzung untereutektisch war. Diese Werte können durch die folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$SI = \left[ \frac{(Ti - 1423)}{100} \right] \cdot 1,5 \quad [2]$$

$$Epg = \left[ \frac{(Cx - Ce)}{(100 - Ce)} \right] \cdot 3,4 \cdot 100 \quad [3]$$

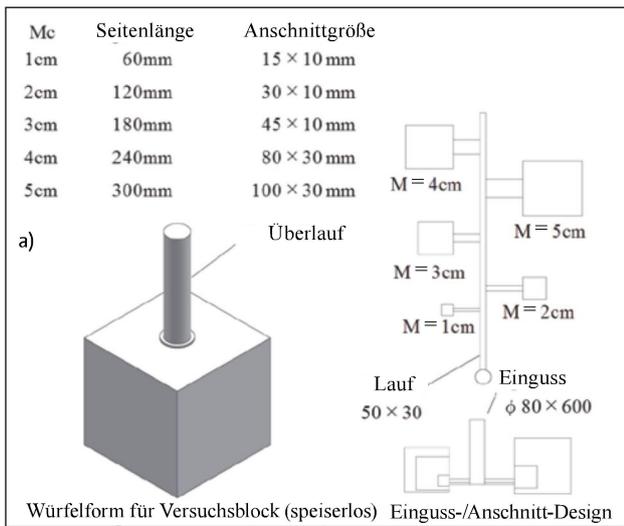
$$Sp\gamma = -3,5 \cdot \left[ \frac{(Ce - Cx)}{(Ce - Cy)} \right] \quad [4]$$

$$Eeg = \left[ \frac{(1 - SI)}{100} \right] \cdot \left[ \frac{(100 - Cx)}{(100 - Ce)} \right] \cdot \left[ \frac{(Ce - Cy)}{(100 - Cy)} \right] \cdot 3,4 \cdot 100 \quad [5]$$

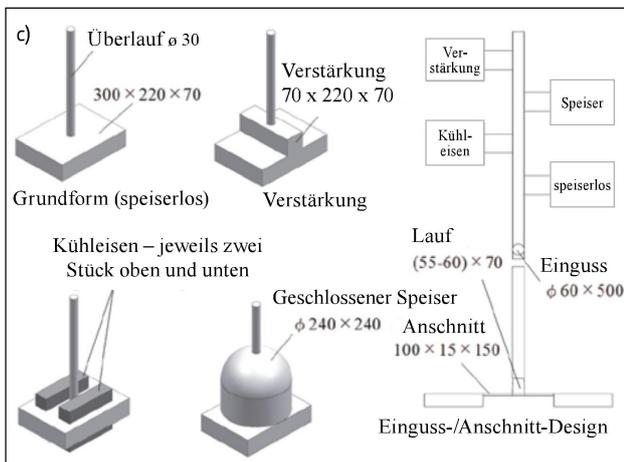
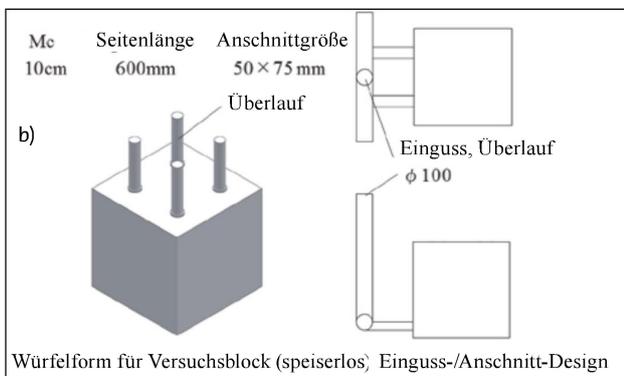
$$Sey = -3,5 \cdot 100 \cdot \left[ \frac{(1 - SI)}{100} \right] \cdot \left[ \frac{(100 - Cx)}{(100 - Ce)} \right] \cdot \left[ \frac{(100 - Ce)}{(100 - Cy)} \right] \quad [6]$$

Worin gilt:

- Ti = Ursprüngliche Temperatur des geschmolzenen Metalls in der Form (°C),
- Ce = Kohlenstoffgehalt am eutektischen Punkt (Massen-%),
- Cx = Kohlenstoffgehalt des geschmolzenen Metalls (Massen-%),
- C = Gehalt an fester Kohlenstofflösung in Austenit (Massen-%),
- 3,5 = Schrumpfungsrate von Austenit,
- 3,41 = Dichterate von Austenit/Graphit



**Bild 1:** Diese Guss-Designs wurden zur Herstellung der Versuchsblöcke verwendet; Ansicht (a) würfelförmige Blöcke, M = 1-5 cm; (b) würfelförmiger Block, M = 10 cm; (c) flache Blöcke



Hier wurde angenommen, dass die Flüssigkeitskontraktion 1,5 Vol.-% pro 100 °C beträgt. [1, 2, 13, 14] In anderen Gleichungen wurden die Hebelregeln im Gleichgewichtszustandsdiagramm verwendet.

Des Weiteren wurden  $C_e$  und  $C_y$  durch die folgenden Gleichungen bestimmt:

$$C_e = 4,27 + \frac{Si}{3} \quad [7]$$

$$C_y = 2,045 - 0,178 \cdot Si \quad [8] [15]$$

Worin gilt:

Si = Siliziumgehalt des geschmolzenen Metalls (Massen-%)

Schließlich wurde das Ausmaß der Expansion/Kontraktion in jeder Reaktion durch das Verhältnis der entsprechenden Reaktion geteilt, um den Grad der Expansion/Kontraktion zu berechnen. Somit wurde das Expansions-/Kontraktionsverhalten quantifiziert. Die tatsächlichen Berechnungsergebnisse werden später aufgeführt.

Die für die Gießsimulation verwendete Software war Hitachi Industry & Control Solutions, Ltd., Version 2016. Die berechneten Werte des Expansions-/Kontraktionsverhaltens wurden in die Software eingegeben, um das Füllverhältnis der Materialien zu erhalten, bei denen nur eine Kontraktion auftritt, zum Beispiel bei Stahlguss. [16] In dieser Funktion wird die Größe des Lunkers durch Multiplikation des Festphasenverhältnisses mit dem Schrumpfungsfaktor unter Berücksichtigung des Metallschmelzeflusses berechnet. Diese analytischen Vorhersagen bezüglich der Erstarrungsschrumpfung wurden als Indizes ausgedrückt, die in dieser Studie als I&M-Kriterium bezeichnet wurden. Die in der Erstarrungsanalyse verwendeten physikalischen Eigenschaften und Randbedingungen sind in **Tabelle 1** dargestellt. In dieser Tabelle sind die ursprünglichen Werte in der Analysesoftware und die allgemeinen

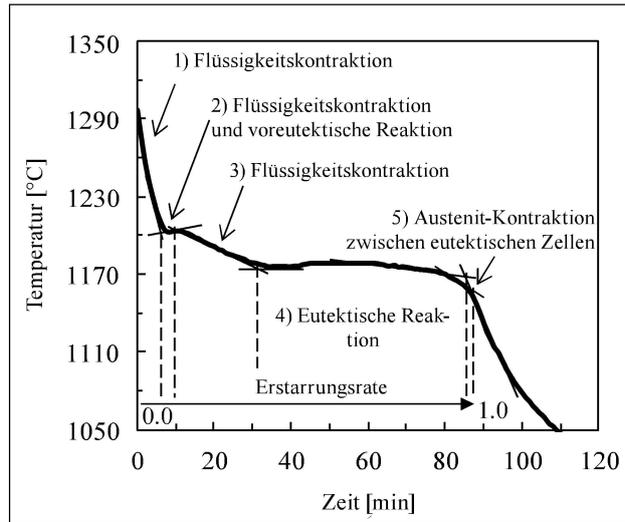


Bild 2: Diese Abbildung zeigt die Knickpunkte, die nach der Tangentiallinienmethode bestimmt wurden, und die Erstarrrate, die für jeden Punkt bestimmt wurde

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften und Wärmeübertragungsparameter

	Gussteil	Form	Kühleisen	Einsatz
Dichte (kg/m³)	7000	1550	7850	650
Spezifische Wärmekapazität (kJ/(kg·K))	1,047	1,047	0,670	0,921
Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))	20,93	1,05	33,49	0,46
Umwandlungswärme (kJ/kg)	209	–	–	–
Wärmeübergangskoeffizient (W/(m²·K))	Gussteil/Form: 4186,2 Gussteil/Kühleisen 1395,4 Gussteil/Einsatz 837,2 Form/Kühleisen 8372,4 Form/Einsatz 837,2			

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Versuchsblöcke (Massen-%)

Blockform	C	Si	Mn	P	S	Mg	CE
Würfel (M=1-5)	3,39	2,26	0,31	0,051	0,010	0,049	4,14
Würfel (M=10)	3,25	2,31	0,26	0,052	0,01	0,048	4,02
Flach	3,31	2,38	0,30	0,057	0,011	0,059	4,10

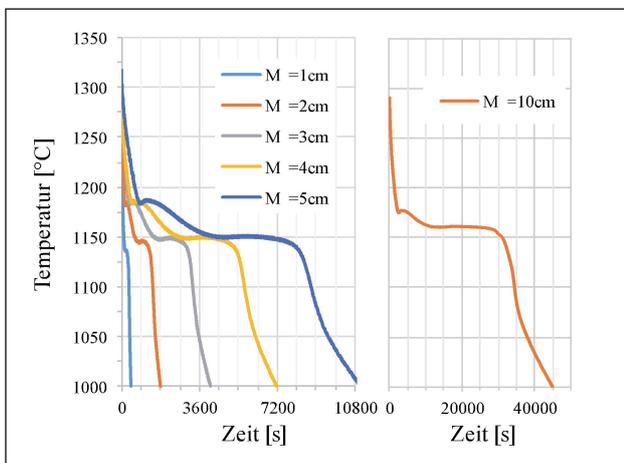


Bild 3: Die Grafik zeigt die Erstarrungskurven der würfelförmigen Versuchsblöcke

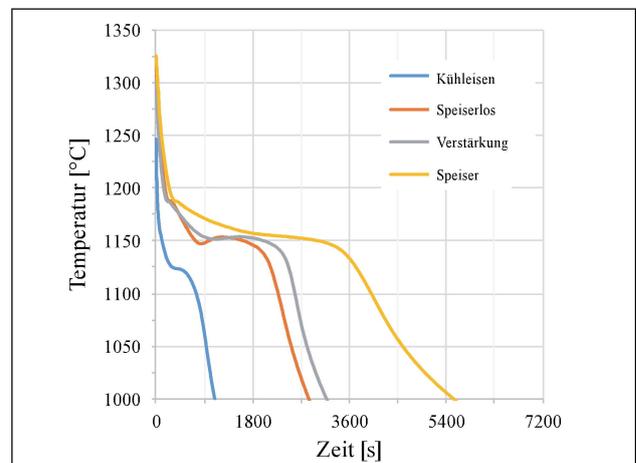


Bild 4: Die Grafik zeigt die Erstarrungskurven der flachen Versuchsblöcke

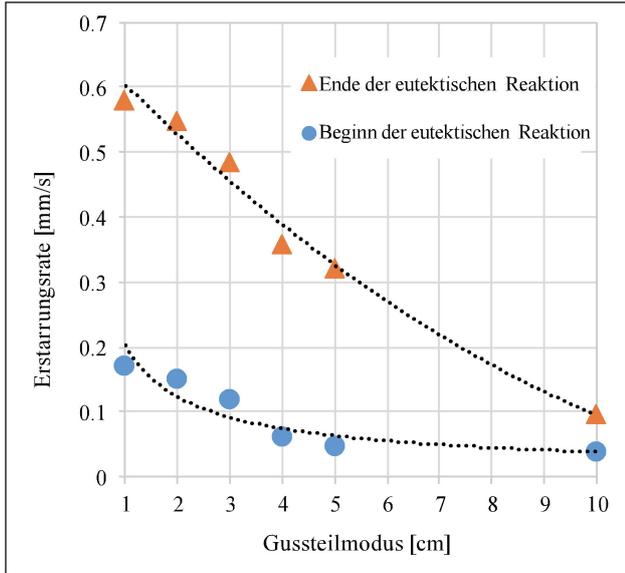


Bild 5: Grafischer Vergleich der Abkühlrate bei der eutektischen Reaktion jedes Gussteilmoduls

schwammartigen Erstarrung mit zunehmender Erstarrungsrate der Unterschied in der Erstarrungszeit zwischen Oberfläche und Zentrum kleiner wird; eine niedrigere Erstarrungsrate führt aufgrund eines größeren Unterschieds in der Erstarrungszeit zwischen Oberfläche und Zentrum zu einer quasi-schwammartigen Erstarrung. Im vorliegenden Versuch wurde jedoch ein klarer Übergang zwischen einer schwammartigen und einer quasi-schwammartigen Erstarrung nicht bestätigt.

**Charakterisierung des Expansions- und Kontraktionsverhaltens**

Bild 6 zeigt das Expansions-/Kontraktionsverhalten. Die horizontale Achse repräsentiert die Erstarrungsrate und die vertikale Achse zeigt den Grad der Expansion/Kontraktion. Die Bestimmung des Verhältnisses jeder Reaktionszeit während der Erstarrung wird unter Verwendung des gleichen Index ermöglicht, indem die Abkühlkurven unterschiedlicher Erstarrungszeiten mit der Erstarrungsrate als Parameter angeordnet werden.

Indem das Ausmaß der Expansion/Kontraktion bei der Reaktion der Versuchsproben mit verschiedenen Erstarrungsendzeiten verglichen wird, neigt die Kontraktion des Austenits zwischen den eutektischen Zellen am Ende der Erstarrung dazu, gegen die Zunahme der Erstarrungszeit abzunehmen.

**Ergebnisse der Luncker-Analyse**

Basierend auf den im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Ergebnissen wird angenommen, dass die Erstarrungsrate bei

Werte aufgeführt. Die Elementteilung des dreidimensionalen Modells wurde einheitlich auf 5 mm eingestellt.

**Versuchsergebnisse und Diskussion**

**Gießen der Versuchsblöcke**  
**Gießergebnisse**

Tabelle 2 zeigt die chemischen Zusammensetzungen der Versuchsblöcke nach Beendigung des Gießens. Die Mg-Ausbeute war zufriedenstellend.

**Erstarrungskurve**

Die Bilder 3 und 4 zeigen die Erstarrungs-Abkühlkurven für die würfelförmigen bzw. die

flachen Blöcke. In diesen Blöcken nahm die Gesamterstarrungszeit mit zunehmendem Blockvolumen zu. Die Ergebnisse zeigten, dass die Temperaturmessung exakt war.

Bild 5 zeigt die Erstarrungsrate des würfelförmigen Versuchsblocks. Die Erstarrungsrate wurde berechnet, indem der Abstand zwischen der Oberfläche und dem Zentrum durch die Start- und Endzeit der eutektischen Reaktion an der Oberfläche und im Zentrum der Blöcke geteilt wurde. Die Start- und Endzeiten der Erstarrung gingen aus den Erstarrungskurven hervor. Die Erstarrungsrate nahm mit zunehmendem Mc-Wert sowohl für den Beginn als auch für das Ende der eutektischen Verfestigung ab. Es wird angenommen, dass aufgrund der

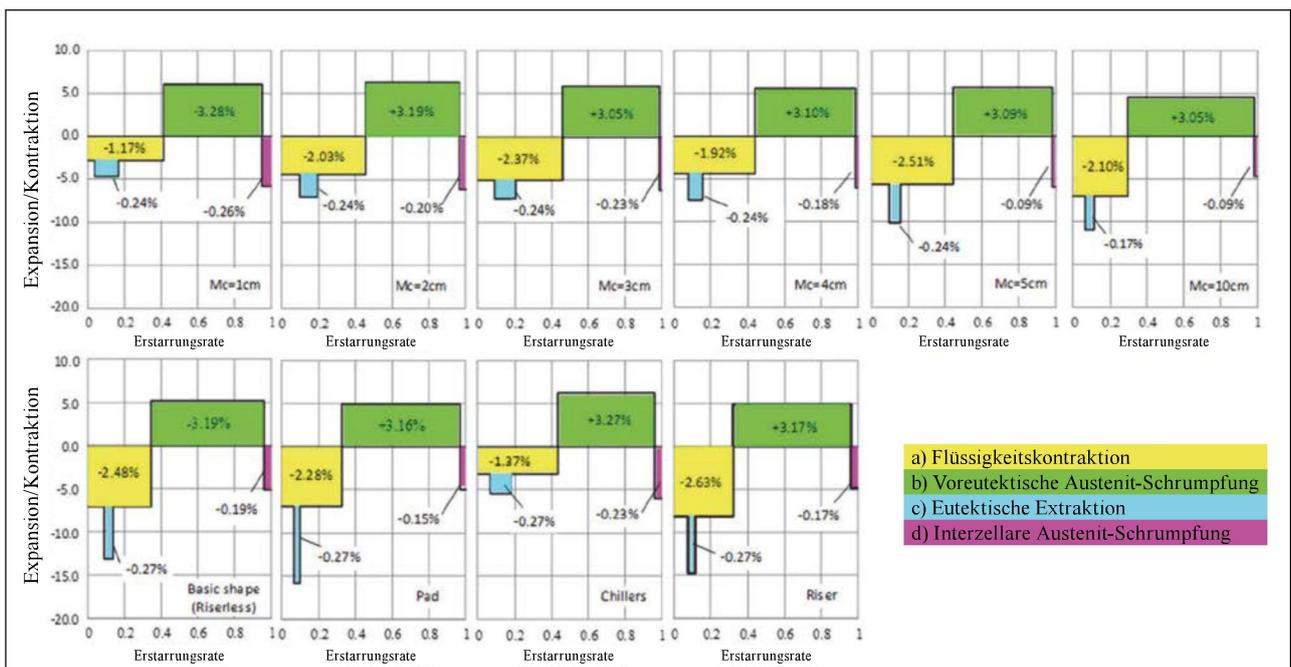


Bild 6: Die Beziehung zwischen Expansion und Kontraktion bei jeder Reaktion der würfelförmigen und der flachen Versuchsblöcke ist grafisch dargestellt

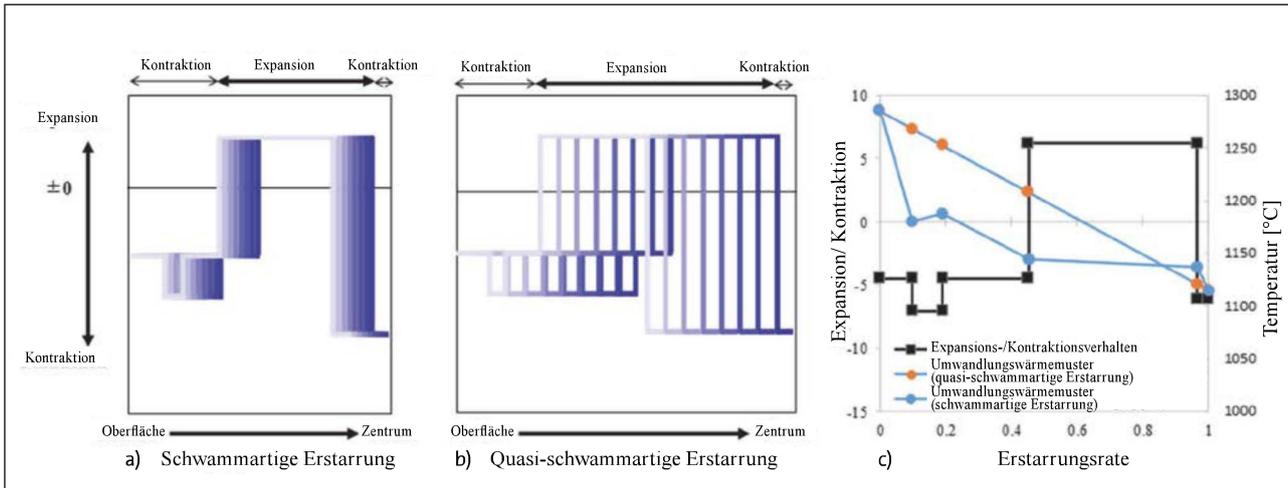


Bild 7: Diese Diagramme wurden bei der Lunker-Analyse verwendet: (a) Konzeptdiagramm des nominalen Expansions- und Kontraktionsverhaltens für eine schwammartige Erstarrung; (b) Konzeptdiagramm des nominalen Expansions- und Kontraktionsverhaltens für eine quasi-schwammartige Erstarrung; (c) Umwandlungswärmemuster von schwammartiger und quasi-schwammartiger Erstarrung

zunehmendem  $M_c$ -Wert abnimmt, was auf die Verschiebung zu quasi-schwammartiger Erstarrung hindeutet. Unter Berücksichtigung der Auswirkung dieser Verschiebung auf das Expansions-/Kontraktionsverhalten kann geschlossen werden, dass die Expansion/Kontraktion an der Oberfläche und im Zentrum des Abgusses bei der schwammartigen Erstarrung gleichzeitig auftritt. Bei der quasi-schwammartigen Erstarrung gibt es einen zeitlichen Versatz in der Expansion/Kontraktion zwischen der Oberfläche und dem Zentrum des Gussteils.

Die Bilder **7a** und **7b** veranschaulichen das konzeptionelle Schema dieses Modells. Um dieses Konzept auf die Analyse anzuwenden, wird angenommen, dass die Änderung der Umwandlungswärmeabgabe konstant ist; sie wird auf die quasi-schwammartige Erstarrung angewendet, wie in **Bild 7c** dargestellt.

Folglich beschleunigen sich die Kontraktion des Primärkristalls und die Expansion des eutektischen Kristalls, während die Austenitkontraktion zwischen den Zellen verzögert wurde. Daher kann die quasi-schwammartige Erstarrung reproduziert werden.

In **Bild 8** wird die Validierung und Vorhersage (I&M-Kriterium) der Lunker für die Versuchsblöcke verglichen. In dieser Studie wurde angenommen, dass die Lunker 0,0 %-99,9 % der vorhergesagten Werte entsprechen. In den Versuchsergebnissen der in **Bild 8a** gezeigten würfelförmigen Blöcke entstanden in keinem Block Lunker. Bei dieser Art Gussteil sind Lunker in der Praxis normalerweise nur schwer zu erkennen. Nach B. Chung [2] werden bei Gussteilen über  $M = 3$  cm kaum Lunker beobachtet; bei Gussteilen unter  $M = 3$  cm treten jedoch häufig Lunker auf. In dieser

Studie wiesen Gussteile mit  $M = 2$  cm und  $3$  cm keine Lunker auf. Alle würfelförmigen Gussteile wurden in eine Form gegossen, daher waren die Eingüsse länger als die allgemeine Form (**Bild 1**). Ein höherer hydrost-

atischer Druck muss Gussteile mit kleinerem  $M$  beeinflussen. Mittlerweile zeigten die Vorhersageergebnisse, dass sich die Lunker voraussichtlich in den Blöcken mit  $M = 1$  cm und  $2$  cm bilden.

PRODUCTIVITY IN 3D

## 3D-GEDRUCKTE GUSLÖSUNGEN

**KOMPLEXE BAUTEILE UMSETZEN**  
 Innovative 3D-Drucklösungen im Sand- & Feinguss durch die Verwendung gießereüblicher Materialien: Dabei lassen sich alle vergießbaren Leicht- und Schwermetalle in serienvergleichbarer Qualität verarbeiten. Komplexe Geometrien können präzise und zeitsparend umgesetzt werden.

**voxeljet AG**  
 Paul-Lenz-Straße 1a 86316 Friedberg Germany  
 info@voxeljet.com

Aus Bild 5 geht hervor, dass  $M = 1$  cm und 2 cm eine schwammartige Erstarrung, jedoch keine quasi-schwammartige Erstarrung, annehmen können. Daher stimmen sie möglicherweise nicht mit den Analyseergebnissen überein. In Bezug auf die Ergebnisse der in Bild 8b dargestellten flachen Versuchsblöcke entstanden in allen Blöcken Lunker.

Darüber hinaus ergab die Vorhersage bei den flachen Versuchsblöcken, dass in allen Blöcken Lunker gebildet wurden. Das Modul der flachen Blöcke betrug ungefähr 2 cm. Es wird jedoch berücksichtigt, dass der Temperaturgradient des flachen Blocks bei gleichem Modul kleiner als der des würfelförmigen Blocks ist. Dies liegt daran, dass der flache Block einen großen Abstand von der Oberfläche zum Zentrum hat. Das heißt, es bedarf einer halb-schwammartigen Erstarrung, und die Lunkerneigung stimmt mit dem Analyseergebnis überein.

Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen wurde die entwickelte Vorhersagemethode auf die würfelförmigen Blöcke mit einer Größe von mehr als  $M = 3$  cm und auf alle flachen Versuchsblöcke erfolgreich angewendet. Es wurde angenommen, dass eine quasi-schwammartige Erstarrung für schwere Gussteile mit langer Erstarrungszeit und komplizierten Formen gilt. Das vorliegende Verfahren kann auf tatsächliche Gussprodukte angewendet werden.

**Vorhersage und tatsächliche Ergebnisse großer dickwandiger Gussteile**

Das in der vorliegenden Studie entwickelte Expansions-/Kontraktionsverhalten und seine Vorhersagemethode wurden auf tatsächliche Gussteile angewendet. Bild 9 zeigt das Verfahren zur Bestimmung des Expansions-/Kontraktionsverhaltens.

Die Differenz wurde zwischen der höchsten Temperatur des nicht erstarrten Bereichs und der Temperatur der Soliduslinie zu dem Zeitpunkt berechnet, als alle gegossenen Oberflächen erstarrt waren und sich die erstarrte Schale gebildet hatte. Dieser Temperaturunterschied hing von der Form des Gussteils ab. Tatsächlich war die Temperaturdifferenz bei dem flachen Block bei gleichem Modulwert von 2 cm kleiner als bei dem würfelförmigen Block. Die Temperaturdifferenz wurde auch für die zu analysierenden Gussteile berechnet. Das Expansions-/Kontraktionsverhalten der Versuchsblöcke, deren Temperaturdifferenz am nächsten war, wurde auf das eigentliche Gussteil angewendet. Diese Methode wird aus folgenden Gründen verwendet. Vor der Bildung der erstarrten Schale hatte der nicht er-

Bild 8: Das Diagramm zeigt den Vergleich zwischen experimentellem und simuliertem Ergebnis für die Lunker-Verteilung; Ansicht (a) würfelförmige Blöcke; und (b) flache Blöcke

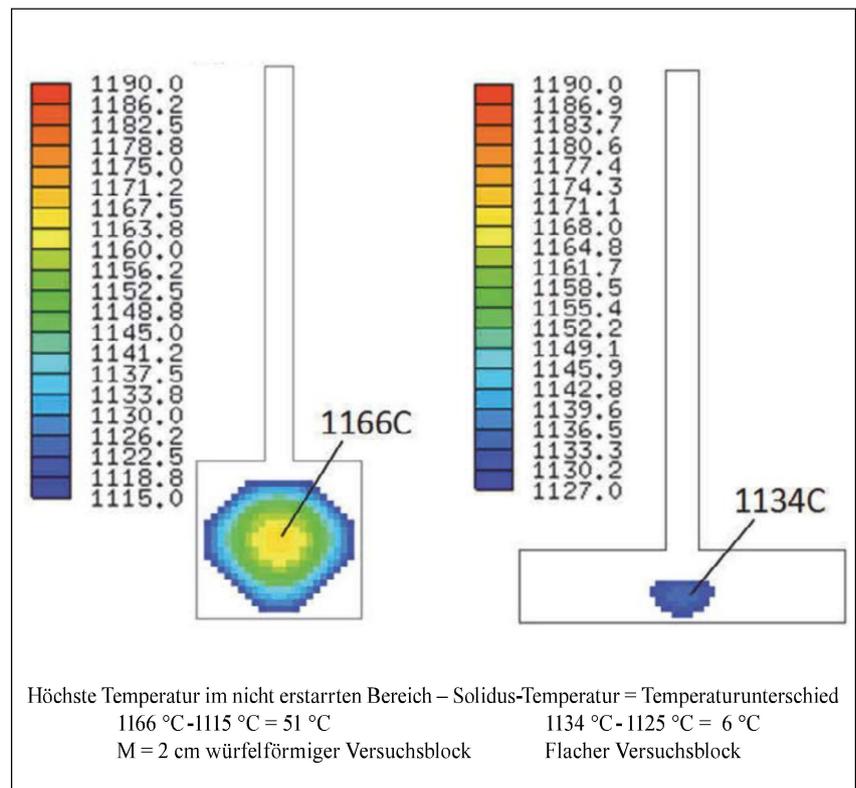
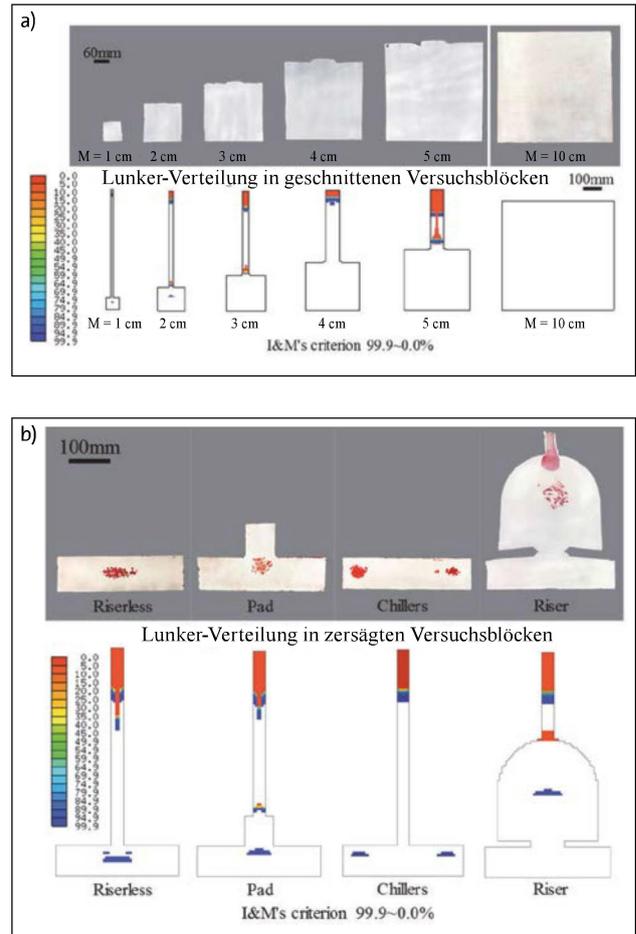


Bild 9: Verfahren zur Bestimmung des Expansions-/Kontraktionsverhaltens durch Differenz zwischen der höchsten Temperatur des nicht erstarrten Bereichs und der Solidustemperatur bei Entstehung der erstarrten Schale

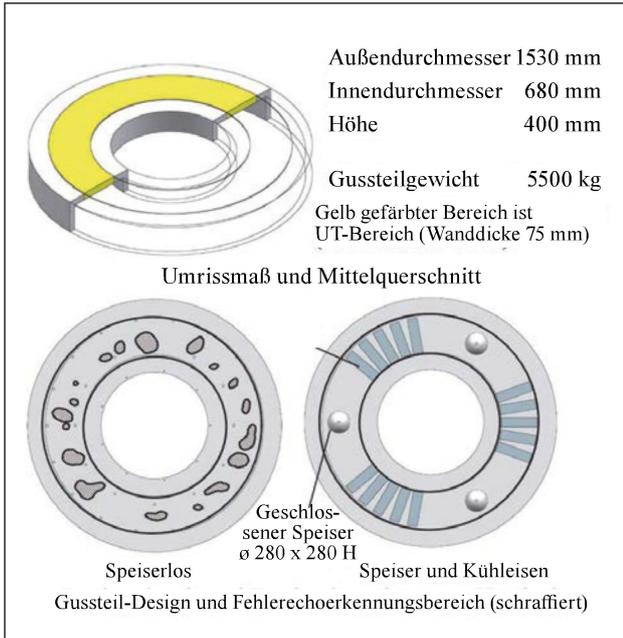


Bild 10: Aussehen und Querschnitt der ringförmigen Gussteile und Fehlerechoerkennungsbereiche

starre Teil Kontakt mit der Form. Daher führte die Ausdehnung des eutektischen Kristalls zur Übertragung in die Formwand. Die Schale nahm nach ihrer Bildung die Rolle einer Metallform ein. Daher nahm die eutektische Expansion innerhalb des nicht erstarrten Bereichs zu. Das Vorhandensein der Lunker wurde durch das Volumengleichgewicht der im Inneren zunehmenden eutektischen Expansion und die Austenitkontraktion zwischen den eutektischen Zellen am Ende der Erstarrung bestimmt. Daher wäre eine der Ursachen für die Lunker-Erzeugung die Entstehungszeit der erstarrten Schale. Daher ist, wenn der oben erwähnte Temperaturunterschied gering ist, die erzeugte Menge an akkumulierter eutektischer Expansion am Ende des Erstarrungsprozesses gering, was zur Bildung von Lunkern führt. Die vorliegende Studie ergab, dass der Temperaturunterschied bei den flachen Blöcken geringer war, was die Entstehung von Lunkern zur Folge hatte.

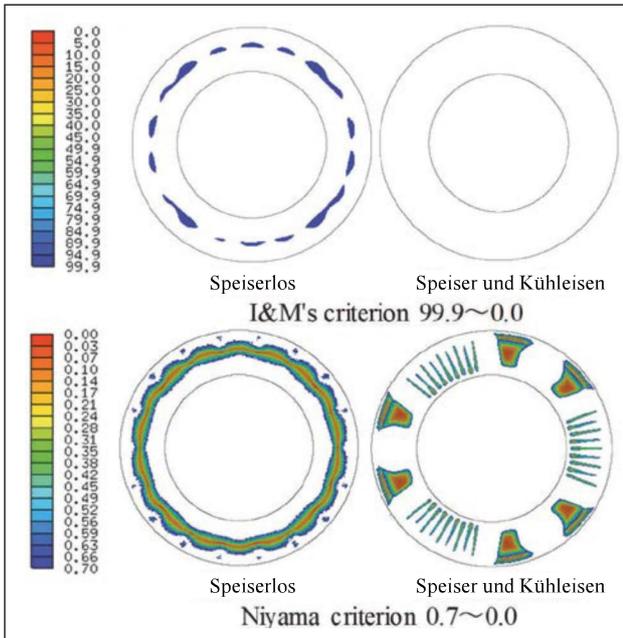


Bild 11: Simulationsergebnisse für Lunker

**Bild 10** zeigt das äußere Erscheinungsbild und den Querschnitt des ringförmigen Gussteils. Der gefüllte Bereich ist der Bereich für Ultraschallprüfungen (ultrasonic testing – UT). Der schraffierte Bereich des speiserlosen Designs ist der Bereich, in dem das Fehlerecho im UT-Bereich zu sehen ist. Die Fehlererkennungsbedingungen umfassen einen Sondendurchmesser von 28 mm, eine Frequenz von 2,25 MHz und eine Empfindlichkeit von 6,4 mm (Durchmesser). Bei der Ausführung mit Speisern und Kühlleisen wird kein Fehlerecho festgestellt. **Bild 11** zeigt die Vorhersageergebnisse für Lunker. Zum Vergleich wird auch das Niyama-Kriterium gezeigt. In beiden Gussteil-Designs liegt die Vorhersage mit unserer Methode näher an den tatsächlichen Vorhersageergebnissen.

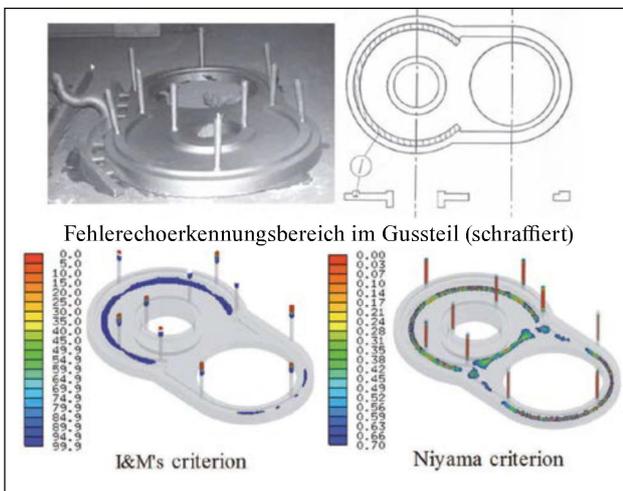


Bild 12: Aussehen des flachen Gussteile und Simulationsergebnisse für Lunker

**Bild 12** zeigt die Simulationsergebnisse des flachen Gussteils. Die Größe beträgt 1900 mm x 1200 mm x 155 mm (Breite x Länge x Dicke), bei einem Gewicht von 580 kg. Der schraffierte Bereich entspricht dem Bereich, in dem das Fehlerecho bei der Ultraschallprüfung beobachtet wurde. Die Fehlerbedingungen umfassen einen Sondendurchmesser von 28 mm, eine Frequenz von 2,25 MHz, eine Empfindlichkeit von 3,0 mm (Durchmesser) und einen Abstand von 250 mm. Beide Gussteil-Designs zeigen, dass die Vorhersage mit der vorliegenden Methode Ergebnisse liefert, die der Realität näherkommen.

**Bild 13** zeigt schematisch die Form eines großen und dickwandigen Gussteils und die Analyseergebnisse. Der schraffierte Bereich repräsentiert die wichtigen Bereiche im Maschinenbetrieb. In diesen

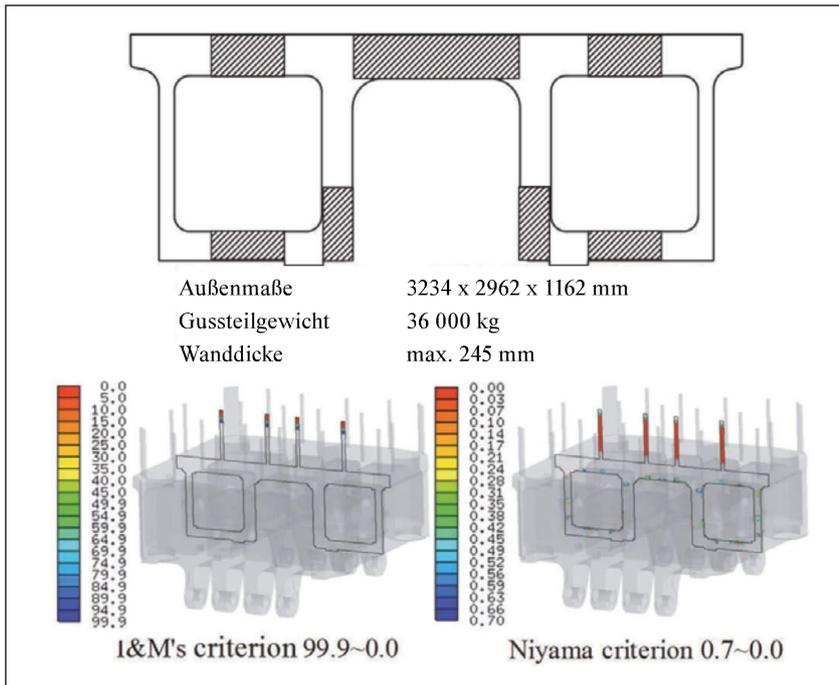


Bild 13: Die schematische Darstellung zeigt die Form und die Analyseergebnisse eines großen und dickwandigen Gussteils

Bereichen wurden weder in den tatsächlichen Bewertungsproben noch bei der Ultraschallprüfung Defekte wie zum Beispiel Lunker beobachtet. Das Analyseergebnis stimmte sowohl mit dem I&M-Kriterium, bei dem keine Lunker gebildet werden, als auch mit den tatsächlichen Versuchsergebnissen überein.

**Möglichkeit der Lunker-Analyse in kleineren Gussteilen**

Kleine Gussteile mit einer Wandstärke von weniger als  $M = 3$  cm können mit ähnlichen Methoden analysiert werden, wenn die Beziehung zwischen den Knickpunkten und dem Mikrogefüge-Fortschritt auf der Erstarrungskurve besser verstanden wird. Dies wird in der nächsten Studie versucht.

**Schlussfolgerung**

Das volumetrische Expansions-/Kontraktionsverhalten bei der Erstarrung wurde auf eine Guss simulationssoftware für dickwandige Kugelgraphit-Gussteile angewendet; die Ergebnisse für Lunker wurden mit dem tatsächlichen Verhalten verglichen. Es wurden folgende Ergebnisse erzielt.

Die Erstarrungsrate der würfelförmigen Blöcke neigte dazu, bei ansteigendem M-Wert kleiner zu werden.

Die Kontraktion von Austenit zwischen den am Ende der Erstarrung auftretenden eutektischen Zellen neigte dazu, bei zunehmender Erstarrungszeit kleiner zu werden.

Wenn das äquivalente Verfahren der spezifischen Wärmekapazität angewendet wurde, um die quasi-schwammartige Erstarrung zu reproduzieren, zeigte die vorhergesagte Position der Lunker sowohl für würfelförmige Versuchsblöcke mit einem M von mehr als 3 cm als auch für flache Versuchsblöcke eine gute Übereinstimmung mit den Tatsächlichen Verhältnissen.

Die Präzision der Lunker-Vorhersage wurde durch das in dieser Studie entwickelte Verfahren verbessert. Dieses Verfahren kann für die praktische Analyse von Lunkern bei Gussteilen mit einem M von mehr als 3 cm hilfreich sein.

**Literatur**

[1] Karsay, S.I.: Ductile Iron I-Production. Quebec Iron and Titanium (1992).  
 [2] Chang, B.: The Riserless Design of Ductile Cast Iron- Imono, Nr. 55, S. 113ff (1983).  
 [3] Taffazzoli, M., Kondic, V.: Making Sound Ductile Iron Castings without Risers. Foundry Management and Technology Nr.104 (12), S. 86ff (1976).  
 [4] Chang, B., Akechi, K., Hnawa, K.: Spheroidal Graphite Cast Iron Basis, Theory, Practice. (1983).  
 [5] Ishikawa, K., Kotani, T., Ogin, T., Itofuji, H.: Effect of Heat Balancer Technique applied for Heavy Section Ductile Iron Castings. 12th Asian Foundry Congress, Taiwan (November 2013).  
 [6] Niyama, K., Uchida, T., Morikawa, M., Saito, S.: A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice. International Cast Metals Journal Nr.7 (3), S. 52ff (1982).  
 [7] Yoshida, T., Yano, K., Kawabata, M.: Evaluation of Molten Spheroidal Graphite Cast Iron Shrinkage Tendency by Solidification Time Ratio Between Casting Surface and Inside. Journal of Japan Foundry Engineering Society Nr. 71(2), S. 104ff (1999).  
 [8] Kim, S., Kwon, E., Roh, D., Yim, Y.: Development of Numerical Model for Improvement of Shrinkage Prediction Accuracy in Ferrous Alloy Castings.

14th Asian Foundry Congress, Korea (November 2017).

[9] Sato, A., Iwane, J., Nomoto, S., Ohnaka, I.: Analysis of Residual Deformation of Spheroidal Graphite Cast Iron by Elasto-Plastic VOXEL-FEM. Journal of Japan Foundry Engineering Society, Nr. 76 (5), S.359ff (2004).  
 [10] Hajkowski, J., Roquet, P., Khamashta, M., Codina, E., Ignaszak, Z.: Validation Tests of Prediction Modules of Shrinkage Defects in Cast Iron Sample. Archives of Foundry Engineering, Nr. 17 (1), S. 57ff (2017).  
 [11] Perzyk, M., Kocharński, A., Mazurek, P., Karczewski, K.: Selected Principles of Feeding Systems Design: Simulation vs Industrial Experience. Archives of Foundry Engineering, Nr.14 (4), S.77ff (2014).  
 [12] Gwizdź, A., Pysz, S., Dworak, P.: Magmasoft simulation applied in verification of casting technology to produce new range of alloy steel castings. Archives of Foundry Engineering, Nr. 10 (3), S. 67 (2010).  
 [13] Su, K., Ohnaka, I., Yamauchi, I., Fukusako, T.: Volumetric Change of Columnar Spheroidal Graphite Iron Castings during Solidification. Journal of Japan Foundry Engineering Society, Nr. 58 (10), S. 702ff (1986).  
 [14] Yoshida, T., Kawabata, M.: Evaluation of Shrinkage Tendency of Spheroidal Graphite Cast Iron. Journal of Japan Foundry Engineering Society, Nr.70 (5), S.336ff (1998).  
 [15] Hoched, B., et al.: Diagrammes d'équilibre-Alliages ternaires (1978).  
 [16] Takahashi, I., Uchida, T., Anzai, K.: Automatic Riser Design by Quantitative Prediction of Shrinkage Cavity. Journal of Japan Foundry Engineering Society, Nr. 78 (12), S. 661ff (2006).



**Yutaka Miyamoto**  
 Ube Steel Co., Ltd., Ube, Japan

**Haruki Itofuji**  
 Adstefan Casting Solution Center, Tohoku University, Sendai, Japan

Nachdruck aus Trans. Amer. Foundrym. Soc. Paper 19-012, mit freundlicher Genehmigung der American Foundrymen's Society, Deutsche Bearbeitung von Andreas Nebl, Salzweg.

Solange nicht anders gekennzeichnet, liegen die Bildrechte bei den Autoren des Beitrags.