

Einfluss von Veredelungs- und Kornfeinungsmittel auf die Speisewirkung der Gusslegierungen EN AC-42100

Olivier Dünkelmann*, Mile B. Djurdjevic**, Robin Unland* and Julian Schröter***

*) IDECO, 46395 Bocholt, Deutschland

***) Nemak Linz GmbH, Linz, Österreich

***) M. Busch GmbH & Co. KG, 59909 Bestwig, Deutschland

Zusammenfassung

*Bei der EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) handelt es sich um eine häufig verwendete Aluminiumlegierung, welche aufgrund ihrer günstigen mechanischen Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit sowie ihrer guten Gusseigenschaften in verschiedenen Anwendungen eingesetzt wird. Eine unzureichende Speisung dieser untereutektischen Legierung führt zur Bildung von Schrumpfungsporosität. Die Zugabe von Kornfeinungs- und Veredelungsmitteln in die Aluminiumschmelze, kann vorteilhaft sein und zu einer besseren Speisung dieser Gusslegierung führen. Thermische Analysen (Abkühlkurven) werden in Aluminiumgießereien routinemäßig durchgeführt, um die Wirkung der zugegebenen Vorlegierungen in die Aluminiumschmelze zu kontrollieren. Die Analyse der Abkühlkurve kann zusätzlich Informationen über charakteristische Erstarrungstemperaturen wie Liquidus, Dendrite-Coherency-Point, Rigidity-Point und Solidus liefern. Diese Temperaturen sind wichtige Parameter bei der Erstarrung von Aluminiumlegierungen. Sie markieren die Übergänge zwischen fünf Arten von Speisemechanismen: Flüssigspeisung, Massenspeisung, interdendritische Speisung, Durchbruchsspeisung und Feststoffspeisung. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie das **IDECO-System zur thermischen Speisungsanalyse** verwendet werden kann, um die verschiedenen Speisungsbereiche der Gusslegierung EN AC-42100 zu quantifizieren. Hierdurch wird es zum ersten Mal möglich sein unter industriellen Bedingungen die Auswirkungen von Legierungszusätzen auf die Speiser von Aluminiumgusslegierungen zu kontrollieren. Die gesammelten Parameter können verwendet werden, um bestehende Simulationsdatenbanken mit korrekteren Informationen zu füttern und auf diese Weise deren Genauigkeit zu verbessern.*

Schlüsselwörter: EN AC-42100 Aluminiumlegierungen, Speisung, Veredelung, Kornfeinung, thermische Analyse, Simulation

Einleitung

Die Legierung EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) ist eine untereutektische Aluminium-Silizium-Gusslegierung mit Magnesium als Hauptlegierungselement. Diese Legierung kann für eine Vielzahl von allgemeinen technischen und strukturellen Komponenten verwendet werden, bei denen ein Gleichgewicht zwischen guten mechanischen Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und Gießeigenschaften (Fließfähigkeit und Gießbarkeit) besteht. Zwei Hauptlegierungselemente, Silizium und Magnesium, in Kombination mit einigen anderen Begleitelementen (Sr, Ti, Fe, Mn, B, Zn, ...) bestimmen die metallurgischen, mechanischen und strukturellen Eigenschaften dieser Legierung [1, 2]. Das Gussgefüge der Legierung EN AC-42100 zeichnet sich durch das Vorhandensein einer primären dendritischen α -Aluminium-Struktur, eines primären Aluminium-Silizium-Eutektikums, sowie magnesiumreicher Intermetallphasen aus. Durch den mäßigen Siliziumanteil besitzt diese Legierung eine gute Fließfähigkeit, während Magnesium ihre Härte, Festigkeits- und Ermüdungseigenschaften verbessert. Während der Flüssig-Fest-Umwandlung schrumpfen die meisten Metalle und Legierungen, wodurch sich ihr Volumen verringert. Auch die Aluminium-Silizium-Gusslegierungen verringern ihr Volumen während der Erstarrung in einem Bereich von 4 bis 8 % [3]. Silizium ist eines der wenigen Elemente, das während der Umwandlung vom flüssigen in den festen Zustand sein Volumen vergrößert. Dank dieser Eigenschaft kompensiert Silizium bis zu einem gewissen Grad die Volumenabnahme von Aluminium-Silizium-Legierungen während der Erstarrung. In der Literatur [4] wird beschrieben, dass die Speisungsfähigkeit eng mit dem während der Erstarrung entstehenden Aluminium-Silizium-Eutektikum zusammenhängt. Durch die Zugabe von Magnesium wird die Erstarrungszeit dieser Legierungen verlängert und ihre Speisungsfähigkeit verringert. Aluminium-Silizium-Legierungen ohne Magnesium weisen einen engeren Erstarrungsbereich mit einer erheblichen Menge an flüssigem Eutektikum auf. Daher sollte die Speisung des flüssigen Eutektikums bei diesen Legierungen relativ einfach sein. Durch das Magnesium wird der Erstarrungsbereich der Aluminium-Silizium-Legierungen deutlich erweitert, was die Speisung des letzten flüssigen eutektischen Anteils während der Erstarrung erschwert und die Bildung von Schrumpfungsporosität verursacht.

Nach Campbell [5] treten während der Erstarrung von Aluminiumgusslegierungen fünf Speisemechanismen auf (Flüssig-, Massen-, interdendritische, Durchbruchs- und Feststoffspeisung). Die Flüssig- und Massenspeisung, die zu Beginn des Erstarrungsprozesses auftreten, sind aufgrund der niedrigen Viskosität der Schmelze, des breiten aktiven Speisungswegs und der relativ hohen Schmelzetemperatur unkompliziert. Die Anzahl der Dendriten, die sich unmittelbar nach der Liquidustemperatur zu entwickeln beginnen, ist noch nicht so groß, dass sie die Schmelzbewegung verlangsamen. Wenn die Schmelzetemperatur während der weiteren Erstarrung sinkt, beginnen die wachsenden Dendriten aufeinander zu stoßen und ein kohärentes dendritisches Netzwerk zu bilden, was den Fluss der restlichen Schmelze zusätzlich verlangsamt. Die Temperatur, bei der dies geschieht, wird als Dendrite-Coherency-Temperatur (DCT) bezeichnet. Diese Temperatur begrenzt bei

allen Aluminiumgusslegierungen den Übergang von den Massen- zu den interdendritischen Speisungsbereichen [6 - 14]. Bei weiterer Erstarrung sinkt der Flüssigkeitsanteil und die Spannung verteilt sich über größere Entfernungen durch das erstarrte Gefüge [15, 16]. Nach Campbell [5] übersteigt bei der Rigidity-Temperatur die Spannung die Festigkeit, was zum Zusammenbruch des festen dendritischen Skeletts führt. Die Rigidity-(Stockpunkt-) Temperatur markiert den Zeitpunkt, an dem die interdendritische Speisung aufhört und die Durchbruchspeisung beginnt. Die Feststoffspeisung beginnt bei der Solidustemperatur, wenn der letzte Tropfen der Schmelze in den Feststoff umgewandelt ist.

Charakteristische Erstarrungstemperaturen wie Liquidus-, Dendrite-Coherency-, Rigidity- und Solidustemperatur sind als wichtige Parameter der Erstarrung von Aluminiumgusslegierungen ermittelt worden, die zur Kennzeichnung von Übergängen zwischen verschiedenen Arten von Speisungsmechanismen verwendet werden können [8 - 14]. Alle diese charakteristischen Erstarrungstemperaturen, wie sie in **Abbildung 1** dargestellt sind, können mit dem IDECO-System für die thermische Speisungsanalyse leicht bestimmt und zur Eingrenzung dieser Speisungsbereiche verwendet werden.

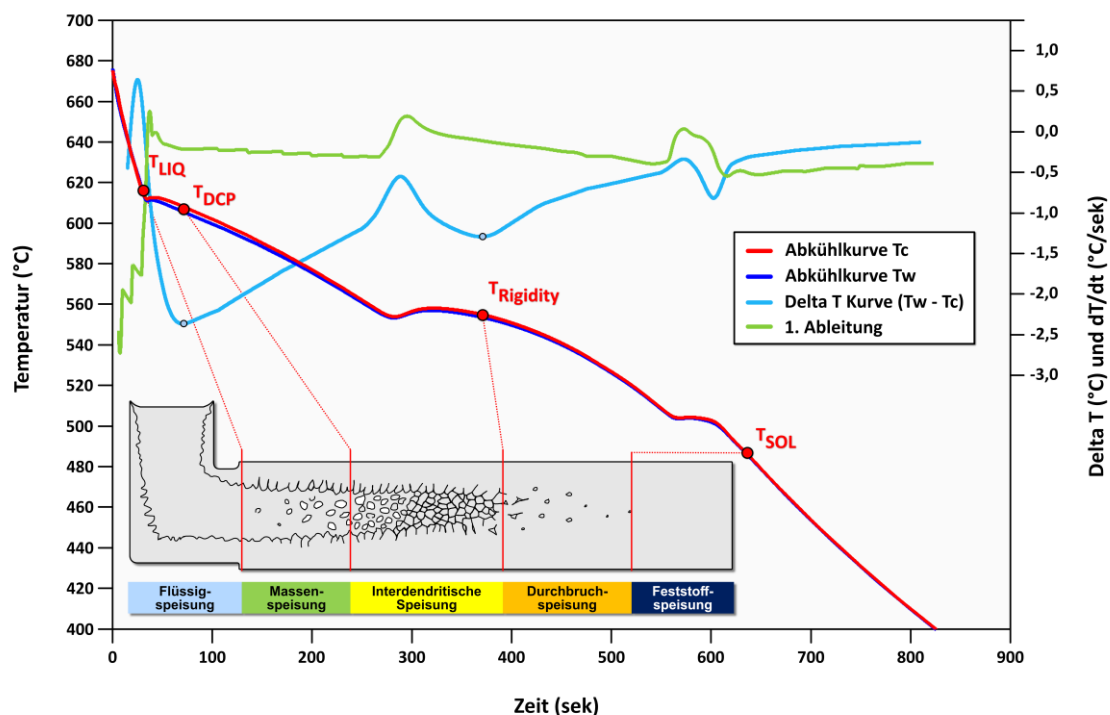


Abbildung 1. Eingrenzung von fünf Speisungsmechanismen unter Verwendung charakteristischer Erstarrungstemperaturen, die aus der Abkühlungskurve ermittelten wurden.

In der Literatur wird beschrieben, wie das Speiseverhalten von Aluminiumgusslegierungen durch ihre chemische Zusammensetzung beeinflusst wird [17,18]. J. Cho et al. [18] fanden heraus, dass Kupfer einen signifikanten Einfluss auf die Speisungseigenschaften von Aluminium-Silizium-Gusslegierungen hat. Durch Magnesium wird die Erstarrungszeit verlängert, der teilflüssige eutektische Bereich ausdehnt, die Speisungsfähigkeit beeinflusst und die Bildung einer großen Menge von

Mikroschrumpungsporosität verursacht [19]. Dash und Makhlouf [17] stellten in ihrer Arbeit fest, dass neben der Abkühlgeschwindigkeit, die einen erheblichen Einfluss auf die Speisung hat, auch die chemische Zusammensetzung einen gewissen Anteil hat. Ihren Ergebnissen zufolge bilden Eisen, Silizium, Magnesium und Kupfer in Aluminiumgusslegierungen während der Erstarrung verschiedene intermetallische Verbindungen wie $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$, Nadeln wie Al_5FeSi oder Al_2Cu . Alle diese Verbindungen bilden eine netzartige Struktur, die das Fließen der Schmelze behindert und zur Bildung von Schrumpungsporosität führt. Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, die Auswirkungen von Veredelungs- und Kornfeinungsmitteln auf die verschiedenen Speiseregionen der Gusslegierung EN AC-42100 mit Hilfe des neuen IDECO-Systems zur thermischen Speisungsanalyse zu analysieren und zu quantifizieren.

Experimenteller Ablauf

Materialien und Schmelzverfahren

Im IDECO-Technikum in Bocholt wurden vier Versuche mit der primären untereutektischen Legierung EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) von Rheinfelden durchgeführt. In **Tabelle 1** ist die chemische Zusammensetzung der untersuchten Legierung nach dem Schmelzen in einem elektrischen Widerstandsofen mit einer Kapazität von 4 kg zusammengefasst.

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung (Gew.%) der untersuchten Legierung – erster Versuch.

Legierung	Si	Mg	Sr	Ti	Cu	Fe	Mn	Zn
Al Si7 Mg0,3	7,138	0,337	0,0001	0,125	0,001	0,056	0,002	0,002

Abbildung 2 zeigt die IDECO-Laboreinrichtung mit den folgenden Geräten: Elektrischer Widerstandsofen von Nabertherm und IDECO SA800SN System zur thermischen Speisungsanalyse.



Abbildung 2. Aufbau der Ausrüstung während der Experimente im IDECO-Technikum.

Drei Kilogramm der Legierung EN AC-42100 wurden in den Ofen gegeben und eingeschmolzen. Die Schmelze wurde weder korngefeint noch veredelt. Während der Versuche wurde die Schmelze auch nicht entgast. Die Schmelztemperatur im Ofen wurde bei allen Versuchen konstant auf 720°C gehalten. Die chemische Zusammensetzung der geschmolzenen Legierung wurde mit einem optischen Emissionsspektrometer bestimmt. Während des ersten Versuchs wurden zehn Thermoanalysen durchgeführt und die entsprechenden Abkühlkurven aufgezeichnet, die später zur Quantifizierung der Speisungseffektivität dieser Legierung verwendet wurden.

Zu Beginn des zweiten Versuchs wurden 3,0 kg der Legierung EN AC-42100 eingeschmolzen. Zusätzlich wurden 63,5 g einer Al10%Sr-Vorlegierung in Stangenform in die Schmelze gegeben, um den Einfluss der Veredelung auf die charakteristischen Erstarrungstemperaturen und die Speisungsfähigkeit der Legierung EN AC-42100 zu analysieren. Die angestrebte Sr-Konzentration in der Schmelze betrug etwa 75 ppm. **Tabelle 2** zeigt die chemische Zusammensetzung der in diesem Versuch verwendeten Schmelze. Insgesamt wurden fünf Abkühlkurven mit der veredelten Schmelze aufgenommen. Die aus diesen Kurven ermittelten

charakteristischen Erstarrungstemperaturen wurden verwendet, um die verschiedenen Speisungsbereiche der Legierung zu ermitteln.

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung (Gew.%) der untersuchten Legierung nach Zugabe des Veredelungsmittels - zweiter Versuch.

Legierung	Si	Mg	Sr	Ti	Cu	Fe	Mn	Zn
Al Si7 Mg0,3	6,866	0,337	0,0072	0,13	0,001	0,052	0,002	0,002

Für den dritten Versuch wurde die veredelte Schmelze aus dem vorangegangenen Versuch verwendet und durch Zugabe von 32,4 g AlTi3B1-Vorlegierung in Stangenform korngefeint, um deren Einfluss auf die Erstarrung dieser Legierung zu analysieren. **Tabelle 3** zeigt die erreichte chemische Zusammensetzung der Schmelze EN AC-42100 nach Zugabe des Kornfeinungsmittels. Es wurden fünf Abkühlkurven mit korngefeinter und veredelter EN AC-42100-Schmelze aufgenommen und die aus den Kurven ermittelten Parameter zur Bewertung des Einflusses von Kornfeinung und Veredelung auf die Speisungsfähigkeit dieser Legierung verwendet.

Tabelle 3. Chemische Zusammensetzung (Gew.%) der untersuchten Legierung nach Zugabe von Veredelungs- und Kornfeinungsmitteln – dritter Versuch.

Legierung	Si	Mg	Sr	Ti	Cu	Fe	Mn	Zn
Al Si7 Mg0,3	7,019	0,328	0,0072	0,154	0,001	0,057	0,0020	0,002

Für den vierten Versuch wurde die ursprüngliche (nicht korngefeinte und veredelte) EN AC-42100 Legierung von Rheinfelden in einer Menge von 2,5 kg in den Ofen gegeben und eingeschmolzen. Nach dem Aufschmelzen wurden 32 g der AlTi3B1-Vorlegierung in Stangenform in die Schmelze gegeben, um nur den Einfluss des Kornfeinungsmittels auf die Erstarrung dieser Legierung zu analysieren. **Tabelle 4** zeigt die erzielte chemische Zusammensetzung der EN AC-42100-Schmelze nach Zugabe von Kornfeinungsmittel. Es wurden fünf Abkühlkurven mit korngefeinter EN AC-42100-Schmelze erstellt und deren charakteristische Erstarrungstemperaturen verwendet, um den Einfluss der Kornfeinung auf die Speisungsfähigkeit zu bewerten.

Tabelle 4. Chemische Zusammensetzung (Gew.%) der untersuchten Legierung nach Zugabe von Kornfeinungsmitteln **ohne** Veredelungsmittel – vierter Versuch.

Legierung	Si	Mg	Sr	Ti	Cu	Fe	Mn	Zn
Al Si7 Mg0,3	7,188	0,327	0,0001	0,123	0,001	0,054	0,002	0,002

Verfahren der thermischen Speisungs-Analyse

Es wurden thermische Analyseproben mit einer Masse von ca. 200 ± 20 g in eine IDECO-Keramik-Probenkokille mit einer Höhe von 59,5 mm und einem Durchmesser von 54 mm gegossen. Zwei kalibrierte Thermoelemente des Typs K wurden in die Schmelze eingeführt und Temperaturen zwischen 700 und 400 °C aufgezeichnet. Wie **Abbildung 3** zeigt, befand sich ein Thermoelement im Zentrum der Kokille (TC), während das zweite etwa 5 mm von der Kokillenwand entfernt angebracht ist (TW). Die Spitze des Thermoelements wurde immer auf einer konstanten Höhe gehalten, etwa 20 Millimeter vom Boden der Keramik entfernt. Die Kühlbedingungen wurden während aller Versuche konstant gehalten. Während aller Versuche wurden zehn Werte (Temperatur/Zeit/Sensor) pro Sekunde aufgezeichnet.



Abbildung 3. Thermische Analyse Probekokille mit zwei Thermoelementen

Ergebnisse und Diskussionen

Um den strengen Anforderungen der Industrie gerecht zu werden, hat IDECO ein neuartiges System zur thermischen Speisungsanalyse entwickelt und eingeführt. Das neue System ist in der Lage, den Erstarrungsverlauf einer beliebigen Aluminiumgusslegierung zu bestimmen und ihre Speisungsfähigkeit als Funktion von Temperatur, Zeit und Feststoffanteil zu quantifizieren. Die stabile Probenmasse, die optimale Prüfkokille und die Schmelzeentnahmetechnik zusammen mit den verwendeten hochauflösenden Thermoelementen vom Typ K ermöglichen ein hohes Maß an Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit jeder Messung sowie eine unverfälschte Analyse. Das System ist benutzerfreundlich und einfach zu bedienen.

Das IDECO-System zur thermischen Speisungsanalyse wurde in allen Experimenten mit dem Hauptziel eingesetzt, den Einfluss von Veredelungs- und Kornfeinungsmitteln auf die charakteristischen Erstarrungstemperaturen von EN AC-42100-Legierungen zu analysieren. Veredelungs- und Kornfeinungsmittel sind wichtige Zusatzstoffe, die beim Gießen von Aluminiumlegierungen verwendet werden, um deren Gefüge und mechanische Eigenschaften zu verbessern. Veredelungsmittel werden Aluminiumlegierungen zugesetzt, um die Größe, Form und Verteilung der Siliziumphase im erstarrten Gefüge zu verändern. Der Hauptzweck von Veredelungsmittel besteht darin, die Speisungsfähigkeit der Legierung zu verbessern, indem sie die Bildung von feinen,

kugelförmigen Siliziumpartikeln fördern. Kornfeinungsmittel werden Aluminiumlegierungen zugesetzt, um die Größe der primären α -Aluminiumkörner zu verringern und die Speisungsfähigkeit der Aluminiumgusslegierungen zu verbessern. Darüber hinaus können diese Zusätze zur Verringerung von Gussfehlern beitragen und ein zuverlässigeres und gleichmäßigeres Gussgefüge gewährleisten. Die **Abbildungen 4 bis 7** zeigen Abkühlungskurven, ihre erste Ableitung und die entsprechenden Delta-T-Kurven (TW - TC) für die Legierung EN AC-42100 ohne Zusatz von Veredelungs- und Kornfeinungsmittel (**Abbildung 4**), mit Zusatz von Veredelungsmittel (**Abbildung 5**) mit Zusatz von Veredelungs- und Kornfeinungsmittel (**Abbildung 6**) und nur mit Zugabe von Kornfeinungsmittel (**Abbildung 7**). Die Abkühlungskurve, ihre erste Ableitung und die Delta-T-Kurve wurden zur Bestimmung der Liquidus-, Dendrite-Coherency-, Rigidity- und Solidustemperaturen der untersuchten Legierung verwendet. Diese Temperaturen grenzen die fünf Speisungsbereiche dieser Legierung ab.

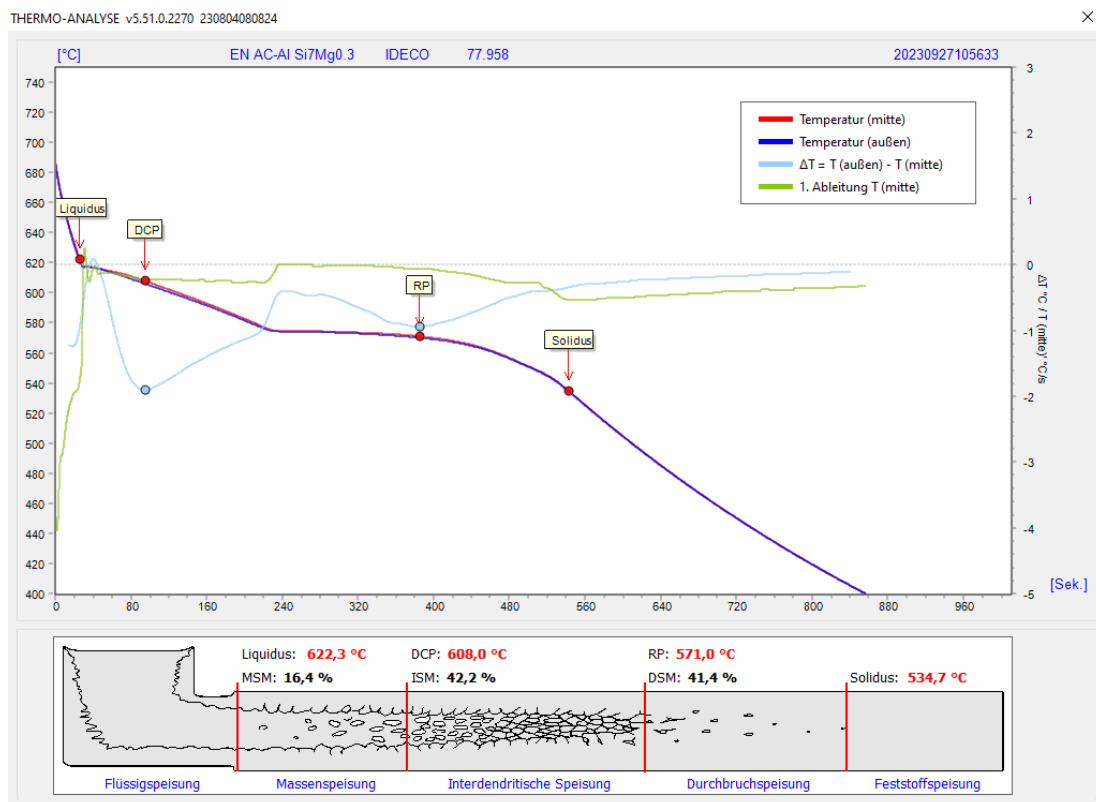


Abbildung 4. Die Abkühlungskurve, ihre erste Ableitung und Delta-T-Kurve für die Legierung EN AC-42100 ohne Zusatz von Veredelungs- und Kornfeinungsmittel.

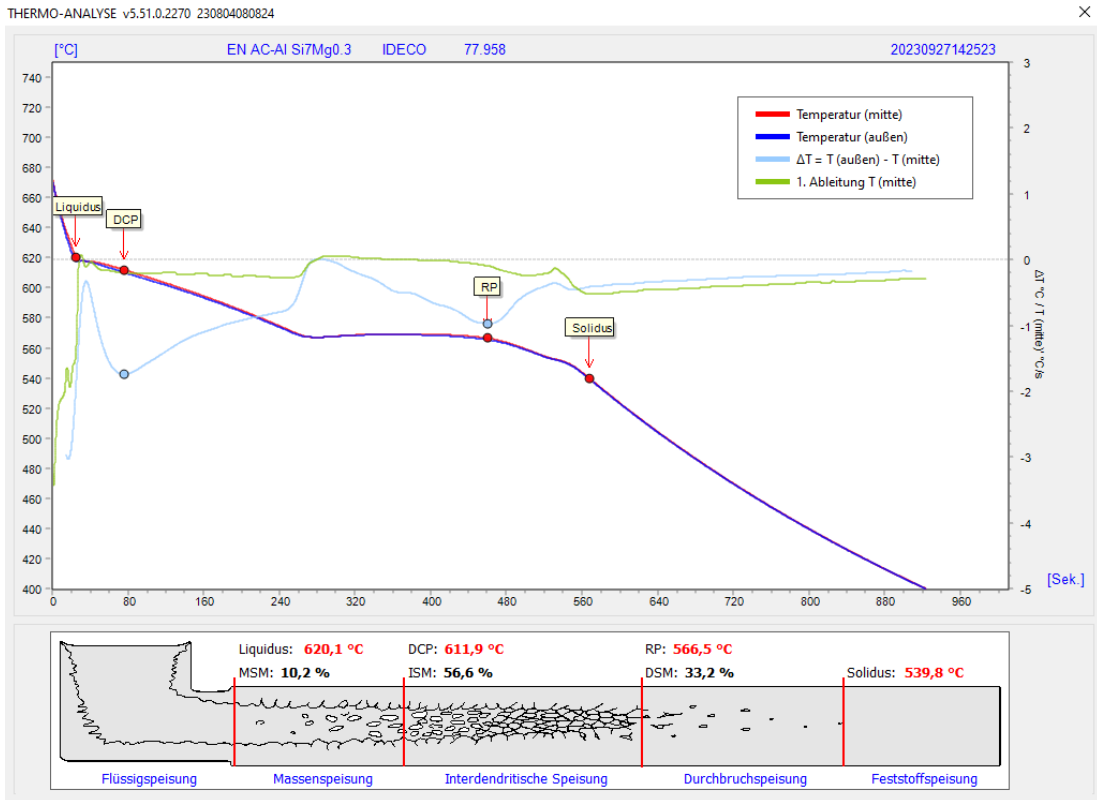


Abbildung 5. Die Abkühlungskurve, ihre erste Ableitung und Delta-T-Kurve für die Legierung EN AC-42100 mit Zusatz von Veredlungsmittel.

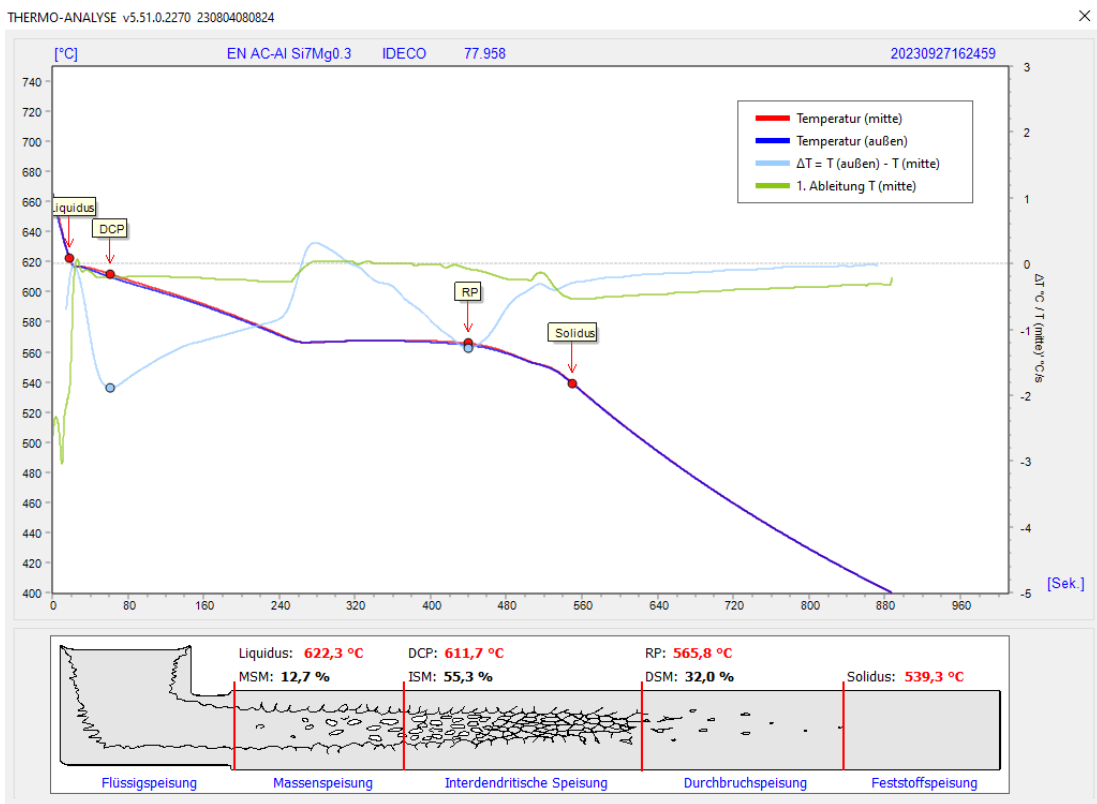


Abbildung 6. Die Abkühlungskurve, ihre erste Ableitung und Delta-T-Kurve für die Legierung EN AC-42100 mit Zusatz von Veredlungs- und Kornfeinungsmittel.

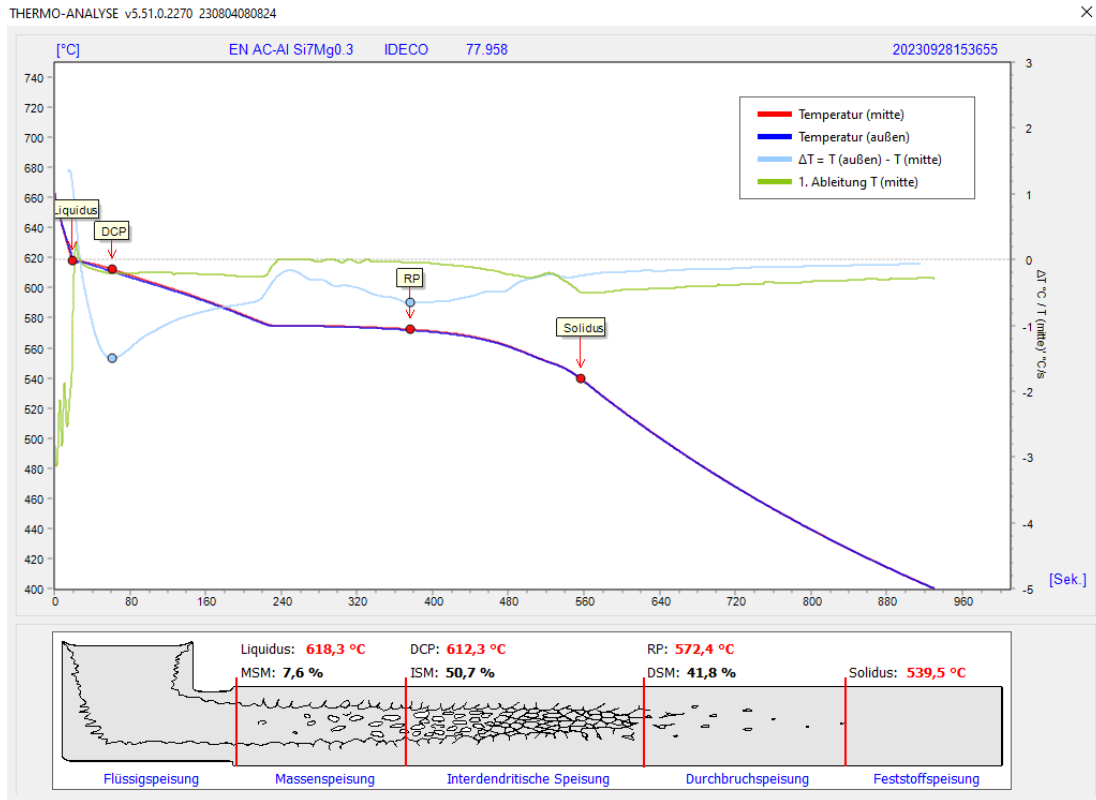


Abbildung 7. Die Abkühlungskurve, ihre erste Ableitung und Delta-T-Kurve für die Legierung EN AC-42100 mit Zusatz von Kornfeinungsmittel.

Alle vier charakteristischen Erstarrungstemperaturen (Liquidus, Dendrite-Coherency, Rigidity und Solidus) aus den vier zuvor beschriebenen Versuchen sind in **Tabelle 5** zusammengefasst.

Tabelle 5. Einfluss von Veredelungs- und Kornfeinungsmittel auf die charakteristischen Erstarrungstemperaturen der Legierung EN AC-42100. Es handelt sich um Durchschnittswerte aus Mehrfachmessungen.

Legierung	T _{LIQ}	DCP	Rigidity	T _{SOL}
Al Si7 Mg0.3	621,2	610,4	571,3	535,6
Al Si7 Mg0.3 + Sr 0.0072	620,4	612,6	566,3	540,0
Al Si7 Mg0.3 + TiBor 0.154 + Sr 0.0072	625,4	612,8	565,8	540,8
Al Si7 Mg0.3 + TiBor 0.123	620,0	612,2	569,4	538,0

Wie **Tabelle 5** und **Abbildung 5** zeigen, hat Strontium nur auf die Rigidity-Temperatur einen signifikanten Einfluss. Die Zugabe von 72 ppm Strontium senkte die Rigidity-Temperatur von 571,3 °C auf 566,3 °C. Die durch die Zugabe von Veredelungsmittel verursachte Senkung der Rigidity-Temperatur führt bei der Legierung EN AC-42100 zu einer Ausweitung des Bereichs der interdendritischen Speisung (IDF) um 5 °C. Die

Zugabe von Kornfeinungsmittel (0,154 Gew.% Ti) in die veredelte Schmelze hat keinen Einfluss auf die Rigidity-Temperatur, wie **Abbildung 7** zeigt, wirkt sich aber auf die Dendrite-Coherency-Temperatur aus und erhöht diese um 2,2 °C. Die Zugabe von Kornfeinungsmittel in die Schmelze von EN AC-42100 in einer Menge von 0,123 Gew.% hat, wie in **Abbildung 7** und **Tabelle 5** dargestellt, keine signifikanten Einfluss auf die Rigidity-Temperatur zur Folge und wirkt sich mäßig auf die Dendrite-Coherency-Temperatur aus, die im Vergleich zur Schmelze ohne Zugabe von Kornfeinungs- und Veredelungsmittel um 2,4 °C steigt.

Schrumpfungsporositäten sind eine der häufigsten Fehler in Aluminiumgussteilen, die durch ein nicht ordnungsgemäßes Speisungsverhalten verursacht werden. Das Verständnis des Speisungsverhaltens von Aluminium-Silizium-Legierungen ist ein wichtiger Aspekt für eine solide Gussproduktion. In der verfügbaren Literatur gibt es nur wenige Arbeiten, die eine quantitative Beschreibung einiger Speisungsbereiche in Aluminium-Silizium-Legierungen unter Verwendung des Balkenwaagenprinzips versuchen [19, 20, 21]. Engler und Michel [19-21] haben durch Messung der Zeit der Massenspeisung und der Gesamtspeisung während der Erstarrung in Gussteilen zwei Kriterien aufgestellt, die zur Beschreibung der Massenspeisung (bis zum Dendrite-Coherency-Point) und der Gesamtspeisung (vom Dendrite-Coherency-Point bis zur Solidustemperatur) verwendet werden können. Der größte Nachteil dieser Kriterien war, dass sie nicht in der Lage waren, Speisungsbereiche wie interdendritische Speisung oder Durchbruchspeisung quantitativ zu beschreiben. Insbesondere interdendritische Speisungen und Durchbruchspeisungen sind von großer Bedeutung für die Herstellung fehlerfreier Gussteile im Kokillen- und Druckgussverfahren. Diese Bereiche sind meist für die Bildung von Defekten im Gussgefüge verantwortlich, wie z.B. Schwindungsporosität, Warmrisse und Entmischungen. Darüber hinaus ist bekannt, dass die Zeit eine starke Eigenschaft ist, die sehr empfindlich auf die Masse der erstarrten Proben reagiert. Jeder Unterschied in der Größe der Probe für die thermische Analyse kann die Gesamterstarrungszeit erheblich beeinflussen und sich auf die Genauigkeit der quantitativ beschriebenen Speisungsbereiche auswirken. Daher benötigt die Gießereiindustrie eine bessere analytische Beschreibung dieser beiden Speisungsbereiche. Ein neues thermisches Speisungssystem von IDECO schlägt drei Gleichungen vor, die auf früheren Arbeiten [22] basieren und zur quantitativen Beschreibung der folgenden drei Speisungsbereiche von Aluminiumgusslegierungen verwendet werden können:

$$MF = \frac{TLIQ-TDCP}{TLIQ-TSOL} \times 100 \quad (1)$$

$$IDF = \frac{TDCP-TRigidity}{TLIQ-TSOL} \times 100 \quad (2)$$

$$BF = \frac{TRigidity-TSOL}{TLIQ-TSOL} \times 100 \quad (3)$$

- MF – Temperaturverhältnis für Massenspeisung, %
- IDF – Temperaturverhältnis für interdendritische Speisung, %
- BF – Temperaturverhältnis für Durchbruchspeisung, %
- TLIQ – Liquidustemperatur, °C
- TDCP – Dendrite-Coherency-Temperatur, °C
- TRigidity – Rigidity-Temperatur, °C
- TSOL – Solidustemperatur, °C

Aus **Abbildung 1** ist ersichtlich, dass vier charakteristische Erstarrungstemperaturen (Liquidus, Dendrite-Coherency, Rigidity und Solidus) als Parameter zur quantitativen Beschreibung verschiedener Speisungsintervalle erforderlich sind. Durch die Anwendung der Gleichungen (1 - 3) und die Berechnung des entsprechenden Temperaturverhältnisses für verschiedene Speisungsbereiche kann der Einfluss von Kornfeinungs- und Veredelungsmitteln quantifiziert werden.

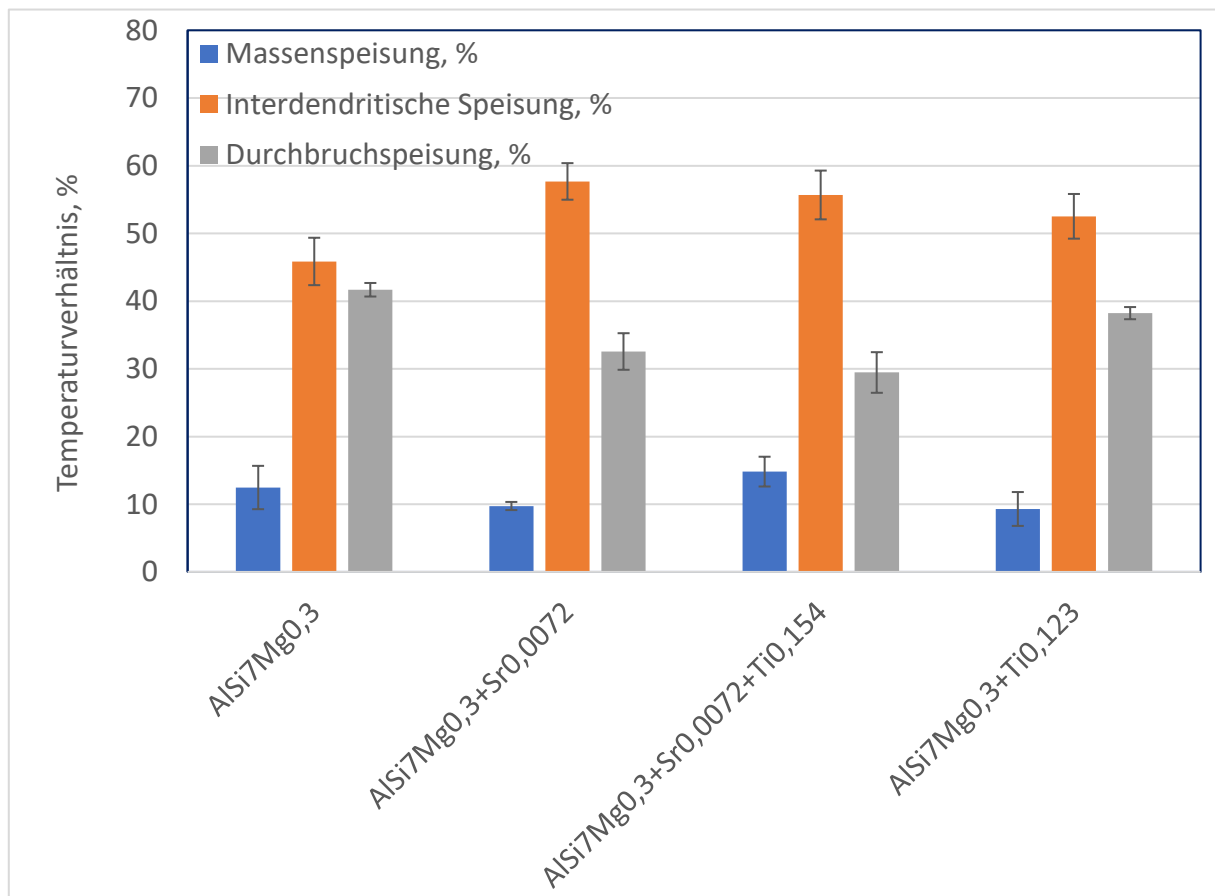


Abbildung 8. Auswirkung der Zugabe von Veredelungs- und Kornfeinungsmitteln (getrennt oder zusammen) auf das Temperaturverhältnis verschiedener Speisungsbereiche. Alle Werte, die mit diesen Speisungsbereichen verbunden sind, wurden aus dem Durchschnitt mehrerer Messungen ermittelt. Die vertikalen Linien auf den Balken stellen die Standardabweichungen der entsprechenden Messungen dar.

Abbildung 8 veranschaulicht, dass die Zugabe von Strontium zu einer etwa 12%igen Ausweitung des Temperaturverhältnisses bei der interdendritischen Speisung (IDF) und gleichzeitig zu einer bemerkenswerten 9%igen Verringerung des Temperaturverhältnisses bei der Durchbruchsspeisung (BF) führte. Der Einfluss von Strontium deckt sich mit den Erwartungen. Es ist allgemein bekannt, dass Strontium keinen Einfluss auf die Dendrite-Coherency-Temperatur hat, aber die Rigidity-Temperatur deutlich senkt und damit den interdendritischen Speisungsbereich erweitert [21]. Insbesondere Kornfeinungsmittel, die üblicherweise auf Elementen wie Titan oder Bor basieren, werden in Aluminiumlegierungen eingesetzt, um die Kornstruktur zu verfeinern. Sie erleichtern die Bildung kleinerer und gleichmäßiger verteilter Körner in der Legierung. Ein feineres Korngefüge verbessert die Speisungsfähigkeit der Legierung, indem es mehr Keimbildungsstellen für das Wachstum von Erstarrungsfronten bietet. Dies wiederum fördert einen gleichmäßigeren und kontrollierteren Erstarrungsprozess, der das Risiko von Schwindungsfehlern verringert und eine korrekte Formfüllung gewährleistet. Die Analyse von **Abbildung 8** zeigt, dass die Zugabe von Titan (0,154 Gew.%) zu einer nicht veredelten Aluminiumschmelze (Versuch-Nr. 4) das IDF-Temperaturverhältnis um etwa 7% erhöht und das BF-Temperaturverhältnis um etwa 3,5% verringert hat. Die gleichzeitige Zugabe eines Veredelungs- und eines Kornfeinungsmittels in die Aluminiumschmelze führte zu einer Erhöhung des IDF-Temperaturverhältnisses um 10% und zu einer Verringerung des BF-Temperaturverhältnisses um 12%. Die niedrige Standardabweichung in **Abbildung 8** zeigt die hohe Wiederholbarkeit aller Messungen, was die Fähigkeit der IDECO-Speisungs-Thermoanalyse belegt, die verschiedenen Speisungsbereiche mit hoher Genauigkeit zu quantifizieren.

In den modernen Aluminiumgießereien wird die **Simulation** als Routineverfahren bei der täglichen Arbeit eingesetzt, wodurch die Anzahl der Versuche drastisch reduziert, die Qualität der Gusserzeugnisse verbessert und die Kosten für die Entwicklung neuer Produkte gesenkt werden. Auf diese Weise sind die Gießereingenieure in der Lage, die Entwicklungszeit zu verkürzen und ein neues Produkt früher auf den Markt zu bringen. Um diese Aufgaben erfüllen zu können, müssen die Simulationssoftwarepakete über eine genaue Datenbasis für verschiedene Aluminiumgusslegierungen verfügen. Die derzeit verwendeten Datenbanken verwenden thermische, physikalische und chemische Parameter für standardmäßige Aluminiumlegierungen mit exakten chemischen Zusammensetzungen. Diese Datenbanken sind nicht empfindlich genug, um Änderungen in der tatsächlichen Chemie der verwendeten Legierung zu berücksichtigen. Die Auswirkungen der Kornfeinungsmittel, der Veredelungsmittel und/oder des Einflusses kleinerer Legierungselemente auf die Erstarrung von Aluminiumgusslegierungen werden in diesen Standarddatenbanken normalerweise nicht berücksichtigt. Kommerzielle Softwareanbieter stellen in ihren Datenbanken meist nur Parameter für Standardlegierungen mit vordefinierten chemischen Zusammensetzungen zur Verfügung. Wenn zusätzliche Materialparameter für erweiterte Legierungszusammensetzungen benötigt werden, müssen diese gekauft, gemessen oder berechnet werden. Daher ist es notwendig, andere Quellen zu finden, die die bestehende Datenbank mit genaueren Informationen erweitern können. Wie in diesem Beitrag gezeigt wurde, ist das IDECO-System zur

thermischen Speisungsanalyse eine gute Möglichkeit, neue Informationen zu erhalten. Dieses System ermöglicht es, fehlende Parameter wie charakteristische Erstarrungstemperaturen, die entsprechende Menge der Feststofffraktion bei jeder charakteristischen Temperatur, die Menge der latenten Wärme und den Temperaturbereich der verschiedenen Speisungsbereiche zu ermitteln und die Genauigkeit der Simulation zu verbessern.

Schlussfolgerungen

In der verfügbaren Literatur gibt es nur wenige Informationen zur quantitativen Beschreibung der fünf von Campbell vorgeschlagenen Speisungsmechanismen. In dieser Arbeit wurde die Auswirkung des Veredelungsmittels (AlSr10) und des Kornfeinungsmittels (AlTi3B1) auf die verschiedenen Speisungsbereiche der Legierung EN AC-42100 mit Hilfe des IDECO-Systems für die thermische Speisungsanalyse analysiert. Es wurden drei neue Kriterien zur Charakterisierung des Speisungsverhaltens während des Erstarrungsprozesses vorgeschlagen, und zwar das Temperaturverhältnis für Massenspeisung, das Temperaturverhältnis für interdendritische Speisung und das Temperaturverhältnis für Durchbruchspeisung. Diese Kriterien gehen davon aus, dass Erstarrungsparameter wie Liquidus-, Dendrite-Coherency-, Rigidity - und Solidustemperatur Übergänge zwischen verschiedenen Arten von Speisungsmechanismen markieren. Es wurde festgestellt, dass die Zugabe von Veredelungs- und Kornfeinungsmitteln einen Einfluss auf die Temperaturbereiche der interdendritischen (IDF) und Durchbruchspeisungsregion (BF) hat. Ein Strontium Zusatz von bis zu 72 ppm erhöht das IDF-Temperaturverhältnis um 12% und verringert das BF-Temperaturverhältnis um 9%. Kornfeinungsmittel (0,123 Gew.% Ti) erhöhen das IDF-Temperaturverhältnis um 6,7% und verringern das BF-Temperaturverhältnis um 3,5%. Die kombinierte Zugabe von Veredelungs- und Kornfeinungsmittel (72 ppm Sr und 0,154 Gew.% Ti) erhöht das IDF-Temperaturverhältnis um 10% und verringert das BF-Temperaturverhältnis um 12%. In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass das IDECO-System zur thermischen Speisungsanalyse genau dazu verwendet werden kann, verschiedene Speisungsbereiche zu quantifizieren und die bestehende Datenbank mit neuen Daten zu füttern, die bisher noch nicht in der Simulation verwendet wurden.

Literatur

1. J. Gubicza, N.Q. Chinh, Z. Horita, T.G. Langdon, "Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminum", *Materials Science and Engineering A* 387–389 (2004) 55–59.
2. A.M.A. Mohamed, F.H. Samuel and S.Alkahtani, "Bewertung der Wirkung einer Magnesiumzugabe auf der Erstarrungsverhalten von Al-Si-Cu-Gusslegierungen", *Giesserei Praxis*, 2013, Vol. 7-8, s. 286-294, ISBN 978-3-446-43169-0.
3. O. E. Okorafor, "Some Considerations of the Volume Shrinkage of Aluminium-Silicon Alloy Castings Produced in Full Moulds", *Transactions of the Japan Institute of Metals*, Vol. 27, No. 6 (1986), pp. 463 to 468.
4. J. M. Kim at all., Porosity formation in relation to the feeding behavior of AlSi alloys, *AFS Transactions* 1997.
5. Campbell, J., "Feeding Mechanisms in Castings". *AFS Cast Metal Research Journal*, 1969. 5: p. 1-8.].
6. Paul L. Schaffer, Young C. Lee and Arne K. Dahle; "The Effect of Aluminum Content and Grain Refinement on Porosity Formation in Mg-Al Alloys", *Magnesium Technology 2001*, Edited by J. Hryn, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society, 2001, pp. 87-94).
7. Arnberg, L.; Dahle, A.; Paradies, C.; Syvertsen, F., "Feeding Mechanism in Aluminum Foundry Alloys", *AFS Transactions*, 1995, 115, 753- 759.
8. Arnberg, L.; Chai, G.; Backend, L., "Studies of dendrite coherency in solidifying aluminum alloy melts by rheological measurements", *Mater. Sci. Eng.*, 1993, A173, 101-103.
9. Chai, G., "Dendrite Coherency During Equiaxed Solidification in Aluminum Alloys", *Chemical Communications*. No. 1, Stockholm University, Stockholm, Sweden 1994.
10. Chai, G.; Bäckerud, L.; Rolland, T.; Arnberg, L., "Dendrite Coherency during Equiaxed Solidification in Binary Aluminum Alloys", *Metall. Mater. Trans. A*, 1995, 26A, 965-970.
11. Veldman, N.; Dahle, A.; St. John, D., "Determination of Dendrite Coherency Point", *Die Casting & Tooling Technology Conference*, 22-25 June, 1997, Melbourne, Australia.
12. Claxton, R.J., "Aluminum alloy coherence", *Continuous Casting*, AIME Metallurgical Society, New York (1973), pp. 341-352.
13. Zamarripa, R.C.; Ramos-Salas, J.A.; Talamantes-Silva. J.; Valtierra, S.; Calas, R., "Determination of the Dendrite Coherency Point during Solidification by means of Thermal Diffusivity Analysis", *Metall. Mater. Trans. A*, 2007, 38A, 1875-1879.

14. Djurdjevic, M.; Kierkus, W. T.; Sokolowski, J. H., "Detection of the Dendrite Coherency Point of Al 3XX Series of Alloys Using a Single Sensor Thermal Analysis Technique", 40th Annual Conference of Metallurgists of CIM 2001.
15. Eskin, D.; Katgerman, L.: "A Quest for a new hot tearing criterion", Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, pp.1511-1519.
16. Bäckerud, L.; Chai, G.; Tamminen, J., "Solidification Characteristics of Aluminum Alloys", Vol. 2: Foundry Alloys, AFS/ScanAluminium, Oslo, Norway, 1990.
17. M. Dash, M. Makhlof "Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum–silicon casting alloys", Journal of Light Metals 1 (2001) 251–265;
18. J. Cho, C. Jeong, Y. Kim, S. Choi and C. Kang, "The effect of copper on feeding characteristics of aluminum casting alloys", Proceedings of the 12th international conference on aluminum alloys, September 5-9, 2010, Yokohama, Japan, pp. 745-750.
19. Michel W. and Engler S; "Speisungskinetik von Aluminium-Silizium Gußlegierungen", Giesserei 75, Nr. 14, 1988, s. 445-448.
20. Michel W. and Engler S; "Erstarrungsmorphologie und Speisungsablauf von Aluminium-Silizium Legierungen bei Kokillenguß", Giesserei 77, Nr. 3, 1990, s. 79-82.
21. Michel W and Engler S., " Speisungsverhalten und Porosität von Aluminium-Silizium – Gußwerkstoffen", Giessereiforschung 41, 1989, Nr. 4, pp.174-187.
22. G. Huber, M. B. Djurdjevic and M. Rafetzeder, "Impact of silicon, magnesium and strontium on feeding ability of AlSiMg cast alloys", Material Science Forum, 2016, Vol. 879, pp. 784-789, ISSN: 1662-9752.