

Vergleich zwischen Niederdruck- und Schwerkraft-Sandguss für einen dünnwandigen Aluminiumrotor aus der Legierung A356

| Autoren Franco Chiesa, Fabien Lanicot, Gheorghe Marin, Jocelyn Baril

Ein Verdichter-Rotor aus Aluminium A356 wurde mit zwei unterschiedlichen Formfüllverfahren im Sandguss hergestellt: Niederdruckguss und Schwerkraftguss. Das Gussteil hat eine begrenzte Größe (170 mm Durchmesser, 1,2 kg) und eine sehr komplizierte Form, sodass es sich besonders gut für den 3D-Formendruck eignet. Die Herstellung dieses Teils unter Verwendung des herkömmlichen Modell-Kernkasten-Prozesses umfasste die Montage von 12 Kernen innerhalb der Form; hierbei waren sehr enge Maßtoleranzen erforderlich, da die Rotorblätter nur 2 mm dick sind. Folglich wurden die Niederdruck-Gussformen auf dem ExOne M-Flex-Drucker im Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) hergestellt, während die Schwerkraft-Gussformen auf dem Voxeljet VX1000-Drucker bei Lycée Hector Guimard produziert wurden. Eine Anzahl von Rotoren wurde gemäß jedem Verfahren für unterschiedliche Gießtemperaturen und Füllzeiten (nur für Niederdruck) gegossen, um die Formfüllungsfähigkeit des Niederdruckprozesses mit dem Schwerkraftverfahren zu vergleichen. Ein Kriterium zur Vorhersage von Auslauf Fehlern ergab sich aus der numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics - CFD) -Modellierung der Formhohlraumfüllung; dieses Kriterium gilt sowohl für Niederdruck- als auch für Schwerkraftguss.

Schlüsselwörter: Aluminiumguss, 3D-Formendruck, additive Fertigung, Niederdruck-Sandguss, dünnwandige Gussteile.

Comparing Low-Pressure and Gravity Sand Casting of a Thin-Bladed Aluminum A356 Rotor

An aluminum A356 compressor rotor was sand cast with two different cavity-filling methods: low-pressure and gravity. The casting is limited in size (170 mm diameter, 1.2 kg) and very intricate in shape thus lending itself particularly well to 3D mold printing. Producing this part using the traditional pattern-core box route involved mounting 12 cores inside the mold while very stringent dimensional tolerances were required, as the rotor blades are only 2 mm thick. Consequently, the low-pressure molds were produced on the ExOne M-Flex printer at the Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) while the gravity poured molds were produced on the Voxeljet VX1000 printer at Lycée Hector Guimard. A number of rotors were cast according to each technique for different pouring temperature and filling times (for low pressure only) so as to compare the filling capability of the low-pressure process versus gravity. A criterion to predict misruns was obtained from computational fluid dynamics (CFD) modeling of the mold cavity filling, criterion which applies both in low pressure and gravity.

Keywords: aluminum casting, 3D mold printing, additive manufacturing, low-pressure sand casting, thin-walled castings.

Einführung

Jüngste Fortschritte in der additiven Fertigung ermöglichen es Gießereien, Formen ohne die bei herkömmlichen Technologien erforderlichen Werkzeuge (Modell und Kernkästen) herzustellen.¹ Dies ist besonders vorteilhaft beim Umgang mit komplexen Formen, und/oder wenn eine begrenzte

te Anzahl von Teilen innerhalb einiger Tage, anstatt einiger Wochen, wie bei der herkömmlichen Methode, produziert werden muss. Ein zusätzlicher Vorteil ergibt sich bei der Herstellung von Prototypen², da Änderungen viel weniger kosten- und zeitaufwendig sind, wenn sie in einer numerischen 3D-Zeichnung anstatt bei Modellen und Kernkästen vorgenommen werden. Der

3D-Druck ist normalerweise für eine kleine Anzahl von Teilen wirtschaftlich; dies gilt insbesondere dann, wenn das Teil eine geringe Größe und eine sehr komplizierte Form hat (wie zum Beispiel das in dieser Arbeit untersuchte Teil). In anderen Fällen kann der 3D-Druck auch dann wirtschaftlich sein, wenn eine große Anzahl von Teilen hergestellt werden muss.

Andererseits ist der Niederdruckguss ein Gießverfahren mit hoher Integrität, bei dem der Formhohlraum von unten über ein Eingießrohr gefüllt wird; darin steigt das flüssige Aluminium unter dem auf die Oberfläche der Schmelze ausgeübten Druck auf, wie in **Bild 1** dargestellt. Die Formfüllung kann somit gesteuert werden, wodurch die Turbulenzen, die beim Befüllen der Form von oben (Schwerkraftguss) entstehen, beseitigt werden. Der mäßige Druck, der während des Erstarrens auf die Schmelze ausgeübt wird, führt außerdem zu einer ausgezeichneten Speisung des Gussteils, wenn die Bedingungen einer gerichteten Erstarrung erfüllt sind.

Das Niederdruck-Gießverfahren ist auch für seine Eignung bekannt, dass sowohl bei Dauer- als auch bei Sandformen dünne Wände gefüllt werden können. **Bild 2** zeigt ein 400 mm langes Gitter, das ursprünglich maschinell hergestellt wurde (Ansicht unten) und durch ein Niederdruck-

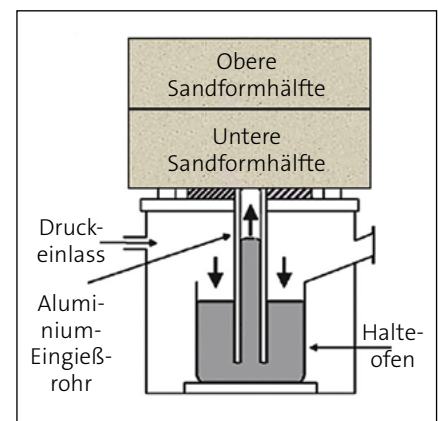


Bild 1: Schematische Darstellung des Niederdruck-Gießprozesses



Bild 2: 400 mm langes, gegossenes Gehäusegitter (oben) vs. maschinell hergestellt (unten).

gussteil (Kokille) mit einer Kostenersparnis von 75 % ersetzt wurde.³ Das Füllen der 6 mm-Äste hätte durch Schwerkraftfüllung nicht erreicht werden können.

Bild 3 zeigt ein außergewöhnlich dünnwandiges, 5 kg schweres, 550 mm hohes Lufteinlassrohr mit einer Wandstärke von 1,7 mm, das mittels Niederdruck-Sandformverfahren hergestellt wurde. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass das Entfernen des losen Sandes bei dünnwandigen Gussteilen, wie oben gezeigt, ein Problem bringen kann; die Form müsste in mehrfach geteilt werden, wodurch einer der Vorteile des Formendrucks abgeschwächt würde.

Umfang der vorliegenden Arbeit

Diese Studie ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit zwischen dem Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) und dem Lycée Technique Hector Guimard. An dem Bereich Niederdruck des Projekts war auch die Technologie du Magnésium et de l'Aluminium (TMA), eine Leichtmetall-Gießerei für die Herstellung von Prototypen, beteiligt. Diese Studie verfolgte zwei Ziele:

- Vergleichen der Füllfähigkeit dünnwandiger Bereiche zwischen Niederdruck- und Schwerkraftfüllverfahren
- Modellieren der Formfüllung in Niederdruck- und Schwerkraftguss. Es wird nach einem Kriterium gesucht, um vorherzusagen, wann Auslauffehler, wie sie bei den tatsächlichen Gussteilen beobachtet werden, auftreten. Idealerweise können durch dieses Kriterium sowohl bei Niederdruck- als auch bei Schwerkraftguss Fehler für andere Gussteile als das vorliegende vorhergesagt werden.

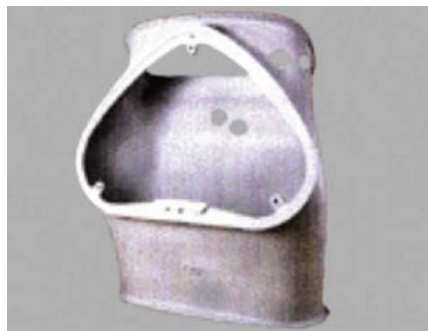


Bild 3: Flugzeug-Lufteinlass, 550 mm hoch, 1,7 mm Wandstärke.

Durch diese Arbeit wird es möglich, die technischen Vor- und Nachteile des 3D-Formendrucks für das Gießen des in **Bild 4** gezeigten Rotors aus A356 zu bewerten. Dieses komplizierte Teil eignet sich aufgrund seiner relativ geringen Größe und der Komplexität besonders gut für die Verwendung des 3D-Drucks; es werden zwölf Kerne benötigt, die bei Anwendung des herkömmlichen Modell-/Kernkastenverfahrens präzise in der Form positioniert werden müssen.

Produktion von Rotoren im Niederdruckverfahren

Herstellung der Formen auf dem Drucker im CMQ

Auf dem in **Bild 5** gezeigten Bindemittel-Strahlendrucker wurden zwölf Niederdruck-Gussformen hergestellt.

Der in 250 µm dicken Schichten abgelagerte Quarzsand hatte eine enge Siebverteilung von 2 (AFS-Feinheitszahl 78,8), was zu einer hohen Gasdurchlässigkeit (200 bis 220 AFS) führte. Die Zugfestigkeit des Sandes wurde mit 196 psi an 1in. x 1in. Zugproben gemessen; die Standardabweichung betrug 22 psi.

Der Bindemittelgehalt, gemessen durch den Glühverlust, lag im Bereich von 2,0-2,2 %.

Niederdruckgießen des Rotors

Bei der Legierung A356 wurde durch Zugabe von 20 ppm Bor mittels AlTi1B-Vorlegierung eine Kornfeinung durchgeführt; es erfolgte keine Veredelung. Die Schmelze wurde 15 Minuten lang mit Argon sorgfältig entgast, bis zu einer Dichte der Unterdruckdichtprobe (Reduced Pressure Test – RPT) von 2,63.

Die mit einer Körnung von 400 polierten Oberflächen der RPT-Proben am Ende der Entgasung (Schmelze bei 750 °C) und am Ende des Auslaufens (Schmelze bei 700 °C) sind in **Bild 6** dargestellt.



Bild 6: Unterdruckdichtproben

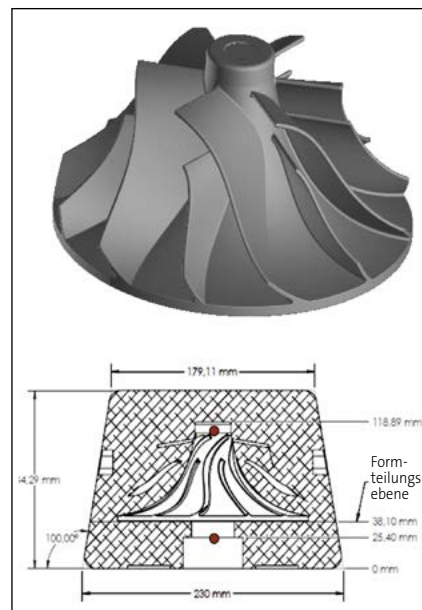


Bild 4: Verdichter-Rotor, 170 mm Durchmesser, 80 mm Höhe (oben) und die Niederdruck-Gussform (unten). Die Position der Thermolemente wird durch die roten Punkte angezeigt.

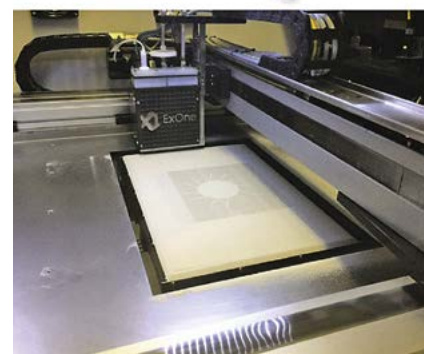


Bild 5: Drucker (oben) und Formaufbau durch Bindemittelstrahl.



Bild 7: Darstellung der Forminstallation und des Gießens auf der Niederdruck-Gießmaschine (Legende siehe oben).

Die Abläufe beim Gießen eines Rotors sind in **Bild 7** in chronologischer Reihenfolge von links nach rechts und von oben nach unten dargestellt:

- a) A356-Aluminiumschmelze nach der Kornveredelung und dem Entfernen der Schlacke; die Legierungszusammensetzung ist in **Tabelle 1** angegeben.
- b) Langsames Absenken des Aluminiumoxid-Transferrohrs in die Schmelze, um einen Temperaturschock zu vermeiden.
- c) Verschrauben des Ofendeckels, um sicherzustellen, dass die Anlage dicht genug ist, um Druck auf die Schmelze auszuüben.
- d) Absenken des oberen Tisches, an dem die Gussform-Baugruppe angeschraubt ist.
- e) Die vierteilige gedruckte Gussform nach 6 h Aushärten des Bindemittels bei 250 °C (dieses Bindemittel wird auch zum Drucken von Metallteilen verwendet, wie es unsere M-Flex-Maschine zulässt, daher die notwendige Thermofixierung).
- f) Zusammengebauete Form mit einer Stahlplatten-Unterlage für einen engen Kontakt mit dem Pressenbodentisch; man beachte die beiden eingebetteten Thermoelemente, deren Verbindungen wie in **Abbildung 4** gezeigt platziert sind.
- g) Neun zum Abguss bereite Formen, plus zwei Ersatzformen, die bei Fehlfunktionen verwendet werden können.
- h) Gussform mit Spritzschutzplatten, auf der Niederdruck-Gießmaschine montiert.
- i) Rotor im Gusszustand nach dem Ausleeren (Oberflächengüte: 640 rms).

Es wurden neun Rotoren gegossen, ein Rotor alle fünfzehn Minuten. Der Druck wurde drei Minuten nach dem Befüllen der Form von einem Maximum von 300 mbar abgesenkt; dies entsprach angesichts des Niveaus der Schmelze im Tiegel einem Kopfdruck von 100 mm flüssigem Aluminium im Formhohlraum. Der Maximaldruck musste nach jedem Abguss leicht erhöht werden, um den geringen Rückgang des Schmelze-Niveaus im Tiegel zu berücksichtigen. Die neun Rotoren-Rohteile nach dem Ausleeren sind in **Abbildung 8** dargestellt; sie sind von 1 bis 9 nummeriert. Die Rotoren #1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 waren mit Thermoelementen zur Messung der jeweiligen Füllzeit bestückt. Nur die Rotoren

#3 und #7 sind nicht vollständig gefüllt; bei der Modellierung der Formfüllung werden sie verwendet, um ein Kriterium zu bestimmen, das die Vorhersage von Auslauffehlern beim Gießen dünnwandiger Gussteile mit dem Niederdruckverfahren ermöglicht.

Einfluss von Gießtemperatur und Füllzeit auf die Formfüllung

Messung der Füllzeit

Das Ansprechverhalten der oberen und unteren Thermoelemente für den Rotor #6 ist in **Bild 9** mit einer Nahaufnahme während der Formfüllung dargestellt (Grafik links in **Bild 9**). Diese Nahaufnahme zeigt die Kontaktzeiten der Schmelze mit den zwei Thermoelementen (das heißt 39,8 s und 42,3 s), und somit eine Füllzeit von 2,5 s an. Ein leichter Abfall der Kurve tritt kurz vor dem Auftreffen der Schmelze auf das Thermoelement auf. Dieses Phänomen trat in allen 14 aufgezeichneten Kurven auf; eine Erklärung für diese Besonderheit wurde nicht gefunden. Die Kurve rechts in **Bild 9** zeigt, dass die Metalltemperatur beim Eintritt in den Formhohlraum (Gießtemperatur) 679 °C betrug.

Zwischen dem Ende der Formfüllung und dem Beginn der Erstarrung sind am unteren Thermoelement große Schwankungen zu beobachten. Diese Schwankungen sind auf die wichtige natürliche Konvektion zurückzuführen, die nach dem Füllen des Formhohlraums stattfindet, da die kühleren Schmelze oben (653 °C) schwerer ist als die Schmelze unten (679 °C). Dieses wenig bekannte und sehr wichtige Phänomen wurde bisher nur selten berichtet. Es wirkt der gerichteten Erstarrung in Richtung des Speisungsmetalls entgegen und kann bei

Tabelle 1: Zusammensetzung der Legierung A356, gegossen im Niederdruckverfahren

Masse-%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Sr
A356	7,14	0,12	0,03	0,02	0,34	0,04	0,01	0,10	< 0,01



Bild 8: Die Rotoren 1 bis 9, gegossen im Niederdruckverfahren; die Rotoren 4 und 5 waren ohne Thermoelement.

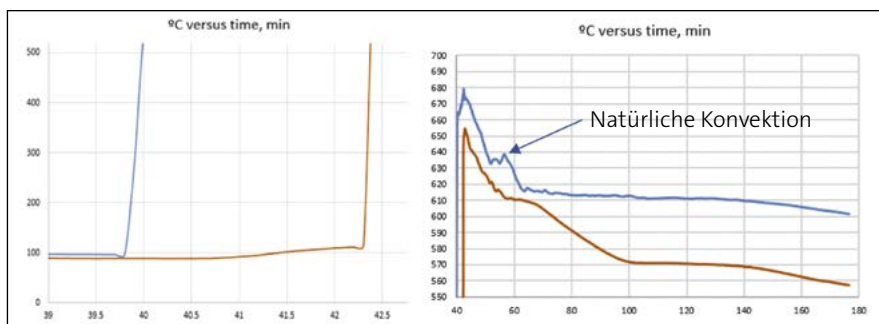


Bild 9: Typisches Ansprechverhalten der beiden Thermoelemente (Rotor #6), Hochschnellen bei der Formfüllung (links).

größeren Gussteilen zu ernsthaften Problemen führen, da eine natürliche konvektive Zirkulation Zeit hat, sich aufzubauen.⁴ Erwartungsgemäß enden die Schwankungen beim Beginn der Erstarrung (613 °C), wenn die Schmelze breiig wird. Die Ergebnisse für die mit Thermoelementen bestückten sieben Rotoren sind in **Tabelle 2** angegeben.

Die berechneten Füllzeiten von zwei, vier und acht Sekunden basieren auf den Druckrampen von +60 mbar in 6 s, +60 mbar in 12 s und +60 mbar in 24 s, die über der Schmelze angewendet werden, in dem Wissen, dass 1 mbar Druck zur Folge hat, dass das Flüssigmetall-Niveau um 4 mm ansteigt. Es fällt auf, dass die gemessene Füllzeit (das heißt die tatsächliche Füllzeit) viel geringer ist als die, aus dem Wert der Druckrampe, berechnete Zeit. Dies wurde durch einen fehlerhaften Druckmesser verursacht; der tatsächlich auf die Schmelze ausgeübte Druck war viel geringer als der auf der digitalen Messanzeige (und der Aufzeichnung) angezeigte Druck.

Zwischen der Schmelze im Tiegel und dem Metall am Eingang des Formhohlraums wird ein erheblicher Temperaturabfall von etwa 50 °C beobachtet; das heißt 67 °C, 85 °C und 78 °C für Abgüsse mit einer Schmelztemperatur im Tiegel von 750 °C; 46 °C und 71 °C für Abgüsse bei 725 °C, und 42 °C und 58 °C für Abgüsse bei 700 °C. Folglich variieren die Eingangstemperaturen der Schmelze in die Form von 642 °C bis 683 °C im Vergleich zu 700 °C bis 750 °C im Tiegel.

Um den Einfluss der Füllzeit auf die Oberflächenbeschaffenheit zu überprüfen, wurden die Rotoren #4 und #5 ohne

Thermoelemente bei 750 °C für tatsächliche Füllzeiten von 1,5 s und 3,0 s gegossen; es wurden keine signifikanten Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit beobachtet (~ 640 rms).

Modellierung der Niederdruckfüllung

Die Formfüllung wurde mit der kommerziellen FlowCast-Software modelliert.⁵ Die Software ermöglicht das grafische Darstellen der Temperatur der Flüssigmetallfront beim Füllen der Form. Die Ermittlung eines Werts für diese Flüssigmetallfront, der die beobachteten Fehler am besten beschreibt, wird als Kriterium für die Vorhersage von Fehlern unter anderen Gießbedingungen, beispielsweise beim Schwerkraft-Gießen, herangezogen. Es ist anzumerken, dass die Position der vorhergesagten Auslauffehler niemals perfekt mit der Position der tatsächlichen Fehler übereinstimmt, wie später veranschaulicht wird. Es wurde festgestellt, dass bei den Rotoren mit Auslauffehlern eine vorzeitige Erstarrung vor dem vollständigen Füllen auftrat, als die Temperatur der vorrückenden Flüssigmetallfront 605 °C erreichte. Dieser Wert kann als Kriterium für die Vorhersage von Auslauffehlern bei dünnwandigen Gussteilen unterschiedlicher Geometrie verwendet werden.

Wenn zum Beispiel die Füllung für die Bedingungen von Abguss #3 modelliert wird (672 °C, Füllzeit 3,7 s), sind die durch die Position der Flüssigmetallfront bei 605 °C vorhergesagten Fehler in **Bild 10** (unten) dargestellt; die tatsächlichen Fehler werden

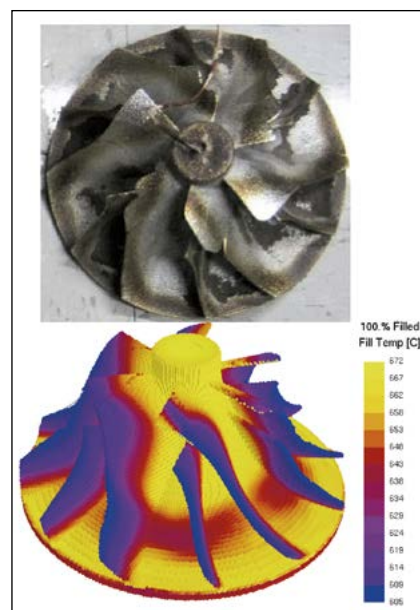


Bild 10: Auslauffehler in Rotor #3 (oben) und vorhergesagt.

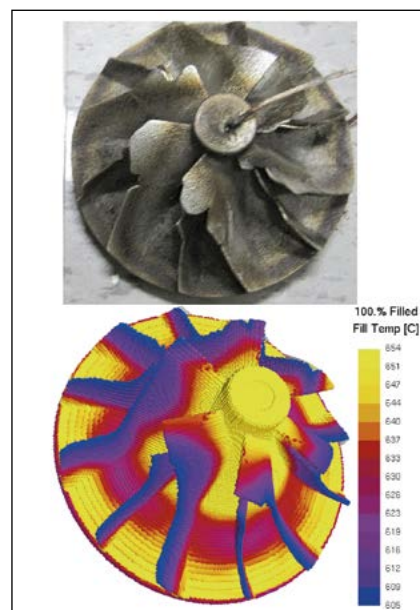


Bild 11: Auslauffehler in Rotor #7 (oben) und vorhergesagt.

in demselben Bild oben angezeigt. Wenn das Gleiche für ein anderes Gussteil mit Auslauffehlern durchgeführt wird (Rotor #7, 654 °C, Füllzeit 3,6 s), ergibt sich **Bild 11**. Wie erwartet sind die Fehler in Rotor #7 stärker ausgeprägt, da die Überhitzung des in

Tabelle 2: Temperatur- und Füllzeit-Ergebnisse bei den Formen mit eingebetteten Thermoelementen

Rotor #	Metalltemperatur im Tiegel °C	Berechnete Füllzeit Sekunden	Am Thermoelement gemessene Füllzeit Sekunden	Maximale Temperatur am oberen Thermoelement °C	Maximale Temperatur am unteren Thermoelement °C
1	750 °C	2	1,4	668 °C	683 °C
2	750 °C	4	1,8	665 °C	665 °C
3	750 °C	8	3,7	655 °C	672 °C
6	725 °C	4	2,5	653 °C	679 °C
7	725 °C	8	3,6	642 °C	654 °C
8	700 °C	2	1,5	645 °C	658 °C
9	700 °C	4	1,6	642 °C	642 °C

den Formhohlraum eintretenden Metalls gegenüber Rotor #3 um 18 °C geringer ist.

Es kann festgestellt werden, dass die tatsächlichen Auslauffehler bei den Schaufeln nicht gleich sind, egal wie identisch die Formfüllung dieser Schaufeln sein sollte; dies ist eine sehr häufige Erscheinung, wenn Phänomene wie Keimbildung und Erstarrung beteiligt sind. Materialwissenschaftler sind sich der diskontinuierlichen und manchmal unregelmäßigen Natur von

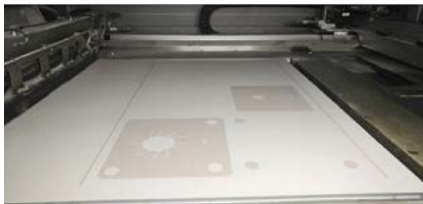


Bild 12: Drucker (2 Ansichten oben) und resultierende Form, im Schwerkraftverfahren gegossen (unten).

Phänomenen wie Keimbildung, Primärphasen-Wachstum, eutektische Verfestigung und Erzeugung von Mikroporosität bewusst. Kein noch so ausgereiftes Modell wird diese oft beobachtete Inkongruenz nachbilden: Gussteile mit perfekter geometrischer Symmetrie, die Fehlerverteilungen (Auslauffehler, Schrumpfungshohlräume, usw.) aufweisen, die eindeutig gegen diese Symmetrie verstoßen. Infolgedessen wäre es in hohem Maße illusorisch, zu versuchen, ein Kriterium zu finden, das die Formen der Auslauffehler präzise vorher sagt. Im vorliegenden Fall kann akzeptiert werden, dass die grafische Darstellung der 605 °C-Isotherme der Füllflüssigkeitsmetallfront eine annehmbare Annäherung an das ergibt, was in Bezug auf Auslauffehler passieren wird.

Herstellung von Schwerkraft-Gussformen auf dem Lycée Guimard-Drucker

Der gleiche Rotor wurde mittels Schwerkraftverfahren in eine 98 AFS-Form aus phenolharzgebundenem Quarzsand gegossen, die in 250 µm dicken Schichten gedruckt war. Der Drucker und die resultierende Form sind in Bild 12 dargestellt.

Auslauffehler bei der Schwerkraftfüllung

Der Aufbau des Schwerkraft-Gussteils ist in Bild 13 dargestellt. Der Einguss mit 20 mm Durchmesser und ein Anschnittverhältnis von 1:3:3 führten zu einer Füllzeit von neun Sekunden.

Die Schaufeln wurden gemäß der Skizze in Bild 14 (rechte Ansicht) von 1 bis 12 nummeriert; die ungeraden Zahlen (nicht gezeigt) entsprechen den kleineren Schaufeln.

Die Gießtemperatur wurde schrittweise gesenkt, bis an den großen Schaufeln erhebliche Auslauffehler auftraten. Bild 15 zeigt die Auslauffehler, die beim Gießen

bei 655 °C auftreten. Alle kleineren Schaufeln sind vollständig gefüllt; die größeren Schaufeln gegenüber dem Einguss (2 und 4) sind fast vollständig gefüllt, während die Schaufeln 6 und 8 die größten Auslauffehler aufweisen; die Schaufeln 10 und 12 zeigen mäßige Auslauffehler.

Die vorhergesagten Auslauffehler, die durch grafische Darstellung der Position der Flüssigmetallfront bei Erreichen von 605 °C auftraten, sind in Bild 16 gezeigt. Die vollständige Füllung der kleineren Schaufeln wurde korrekt vorhergesehen, während bei den Schaufeln #4, 6, 8, jedoch nicht bei den Schaufeln #3, 10 und 12, wie beobachtet, Auslauffehler vorhergesagt wurden. Die Diskrepanz kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die tatsächliche Dicke der sechs größeren Schaufeln von 1,92 mm bis 2,03 mm variierte; auch die Knotengröße der Finite-Differenzen-Wärmeübertragungsmodellierung (0,667 mm) war im Hinblick auf die Dicke der Schaufeln relativ wichtig.

Schlussfolgerungen

Komplizierte Rotoren mit 2 mm dicken Schaufeln wurden mittels Niederdruck-Gießverfahren in Formen gegossen, die auf dem Drucker im CMQ gedruckt wurden. Identische Rotoren wurden durch Schwerkraftguss in Formen gegossen, die auf dem Drucker von Lycée Guimard gedruckt wurden. Die Gießtemperaturen variierten im Niederdruckguss von 642 °C bis 683 °C und im Schwerkraftguss von 710 °C bis 655 °C; die Füllzeit variierte von 1,5 s bis 3,7 s beim Niederdruckguss und betrug neun Sekunden beim Schwerkraftguss. Nach diesen Versuchen gelangten die Autoren zu folgenden Schlussfolgerungen:

Die Oberflächenbeschaffenheit war bei den im Schwerkraftverfahren hergestellten Gussteilen besser (480 rms gegenüber 640

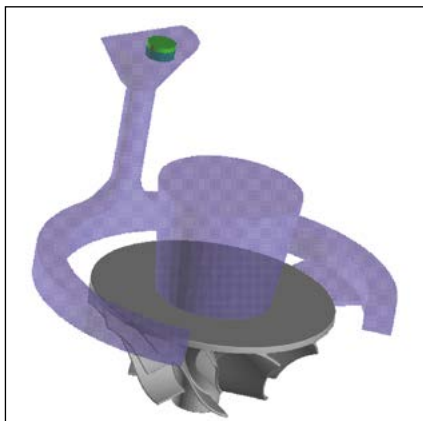


Bild 13: Bei den Schwerkraft-Abgüssen verwendetes Anschnittverfahren (Anschnittverhältnis 1:3:3, Füllzeit 9 Sekunden).



Bild 14: Die größeren Schaufeln wurden von 2 bis 12 nummeriert – die kleineren Schaufeln wurden von 1 bis 11 nummeriert (nicht gezeigt).

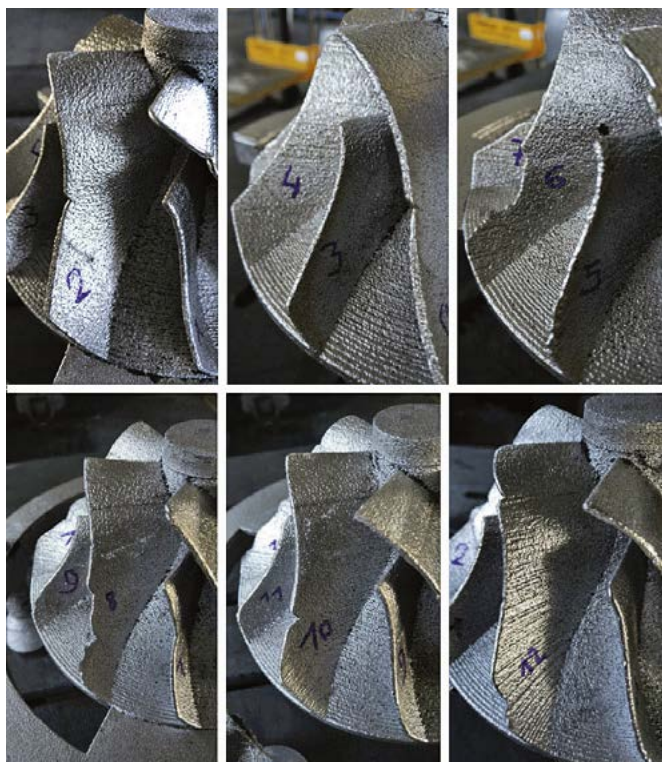


Bild 15: Auslauffehler an den Schaufeln 1 bis 12 bei einem im Schwerkraftverfahren bei 655°C gegossenen Rotor.

rms bei den Rotoren im Niederdruck-Gießverfahren). Ein Grund für diesen Unterschied ist die feinere und breitere Verteilung des Sandes in den mittels Schwerkraft vergossenen Formen (98 AFS, Siebweite 4 gegenüber 82 AFS, Siebweite 2); die Sandschichtdicken waren gleich und entsprachen 250 µm. Ein weiterer Grund für die rauere Oberfläche beim Niederdruckverfahren könnte die schnellere Füllrate sein, obwohl sich die sanftere Aufwärts-Befüllung (im Vergleich zu einer fallenden Befüllung beim Schwerkraftverfahren) möglicherweise in die entgegengesetzte Richtung auswirkt. Der endgültige Kopfdruck in der Form sollte kein Faktor sein, da

er für beide Füllmethoden etwa 100 mm flüssiges Aluminium betrug. Diese raue Oberflächenbeschaffenheit ist ein Nachteil des 3D-Drucks im Vergleich zum herkömmlichen Modell/Kernkasten-Prozess, bei dem die erwartete Oberflächengüte im Bereich von 200-300 rms liegen würde.

Beim Schwerkraftguss traten aufgrund der im Vergleich zum Niederdruckguss relativ längeren Füllzeit Auslauffehler auf, als die Gießtemperatur unter 660 °C fiel.

Beim Niederdruckguss ermöglichte die perfekte Steuerung der Formfüllung über den angewendeten Druck das Füllen der Form bei einer Gießtemperatur von nur 642 °C; dies führte zu einer potenziell höheren

metallurgischen Qualität, was in einer derzeit laufenden Studie noch bestätigt oder widerlegt werden soll.

Mit der Flowcast⁵-Software wurde versucht, das Auftreten von Auslauffehlern beim Niederdruckguss vorherzusagen. Es wurde festgestellt, dass die Auslauffehler auftraten, als die Temperatur der Füllflüssigkeitsmetallfront 605 °C erreichte; durch Anwendung des gleichen Kriteriums auf ein Schwerkraft-Gussteil wurde bei 9 der 12 Schaufeln korrekt das vorhergesagt, was dann auch im Abguss beobachtet wurde.

In einer früheren Veröffentlichung⁶ wurde gezeigt, dass für dieses spezielle Gussteil die Kosten pro Teil unter Verwendung des Formendrucks (im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren) niedriger wären, wenn die Anzahl der hergestellten Gussteile weniger als 26 betragen würde.

Literatur

- [1] Eyad, S., et al., „Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores,“ *International Journal of Metalcasting*, Vol. 10, Issue 3, pp. 240–252 (2016).
- [2] Johnson, O., Mueller, T., Lindberg, M., „Economic and Timing Benefits of 3D Printed Molds for Prototype Production Castings,“ *Proceedings of the American Foundry Society*, Paper 16-151, 6p (2016).
- [3] Chiesa, F., Baril, J., Dubé, P., „Lights, Camera, Castings!“ *Engineered Casting Solutions*, pp 24–26 (March 2009).
- [4] Campbell, J., „Castings,“ Second Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 126–128 (2003).
- [5] SolidCast, FlowCast, OptiCast, Version 8.4.0, Finite Solutions Inc., www.finite.solutions.com (website last accessed 3-26-19).
- [6] Chiesa, F., et al., „Experience in the Low-Pressure Casting in Printed Molds of a Thin Bladed Aluminum A356 Impeller,“ *Proceedings of the ICAA 17th Conference*, McGill University, Paper #393525, June 17-21 (2018).

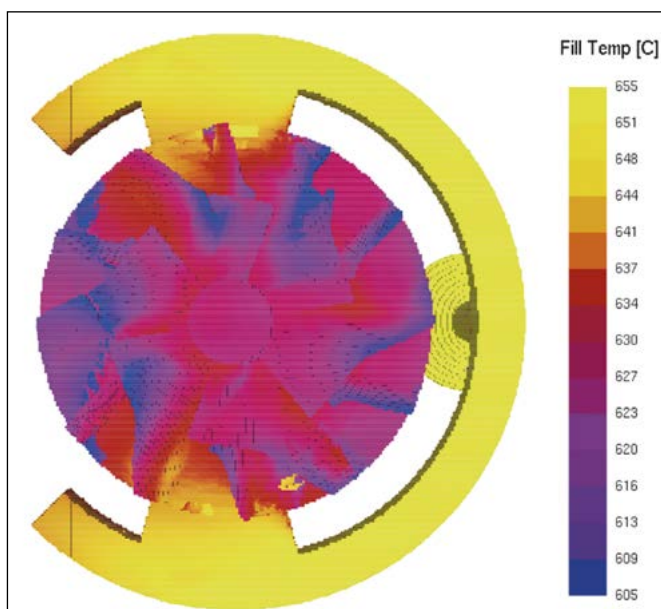


Bild 16: Vorhergesagter Auslauffehler im Schwerkraftguss, gegossen bei 655 °C in neun Sekunden.



Franco Chiesa, Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) Trois-Rivières, QC, Canada

Fabien Lanicot, Lycée Hector Guimard, Lyon, France

Gheorghe Marin, Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) Trois-Rivières, QC, Canada

Jocelyn Baril, Technologie du Magnésium et de l'Aluminium, Trois-Rivières, QC, Canada

Nachdruck aus *Trans. Amer. Foundrym. Soc. Paper 19-018*, 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.