

Reduzierung von Oxideinschlüssen in Aluminium-Zylinderköpfen durch virtuelle Versuchsplanung*)

Reduction of Oxide Inclusions in Aluminum Cylinder Heads through Virtual Design of Experiments



Dr.-Ing. Jörg C. Sturm,
Geschäftsführer bei der MAGMA Gießereitechnologie GmbH in Aachen, D



Dr.-Ing. Lubos Pavlak,
Projektingenieur bei der MAGMA Gießereitechnologie GmbH in Aachen, D

Schlüsselwörter: Al-Zylinderkopf, Oxideinschlüsse, Gießprozesssimulation der Oxidbildung, Oxideinschlussreduzierung, virtuelle Versuchsplanung

Zusammenfassung

Oxideinschlüsse, die während des Gießens von Aluminiumlegierungen entstehen, sind eine Hauptursache für Undichtigkeiten im Gussteil. Dieser Artikel zeigt, wie mit Hilfe der Integration der Gießprozess-Simulation in eine virtuelle Versuchsplanung wichtige Prozessparameter auf die Bildung und Verteilung von Oxiden für die Herstellung von Zylinderköpfen beim Schmelzetransport und bei der Formfüllung analysiert und optimiert werden können. Dabei können gleichzeitig unterschiedliche Qualitätskriterien, die eine Oxidbildung während der Herstellung von Zylinderköpfen beschreiben, quantitativ bewertet werden. Die Durchführung von virtuellen Versuchen im Computer erlaubt eine automatisierte Variation sowohl des Gießsystems (Geometrie) als auch von Fertigungsparametern. Es wird gezeigt, dass die virtuelle Versuchsplanung zu einer optimierten Gestaltung der Gießtechnik und zu verbesserten Produktionsabläufen mit einer signifikanten Reduzierung von Oxiden im Gussteil führt. Die simulationsgestützten Untersuchungen werden mit hochauflösender Videotechnik und der PREFIL-Messtechnik experimentell begleitet und verifiziert.

Einleitung

Oxideinschlüsse, die während des Gießprozesses von Aluminiumlegierungen entstehen, gelten bei dünnwandigen und filigranen Gussteilen wie Zylinderköpfen als Hauptursache für Undichtigkeiten. Aufgrund des höheren Schmelzpunkts wird die auf der Schmelzbadoberfläche in Bruchteilen von Sekunden gebildete Oxidhaut beim Gießen nicht mehr auf- oder umgeschmolzen und bleibt im festen Zustand im Gussteil vorhanden. Jede Formfüllung führt zu Turbulenzen der Schmelzeoberfläche. Dadurch wird die Oxidhaut aufgebrochen und in die Schmelze eingetragen. Oxidhäute führen zu einer Materialtrennung im Gefüge und damit, abhängig von ihrer Größe, entweder zur Reduzierung der lokalen mechanischen Eigenschaften oder speziell in dünnen Wänden zu Undichtigkeiten.

Im realen Versuch kann die schädigende Wirkung von Oxiden auf die Qualität im Gussteil nur nach der Herstellung, beispielsweise durch Lecktests, bewertet werden. Eine genaue Vorhersage der Verteilung und des genauen Ortes von Oxiden und damit von Undichtigkeiten am Ende der Formfüllung ist anspruchsvoll und quantitativ kaum möglich. In der Literatur [1,2] sind potentielle Ursachen für die Bildungsmechanismen von Oxiden beim Schmelzen und Gießen der Aluminiumlegierungen beschrieben worden. Die qualitative und quantitative Bewertung einzelner Quellen für die Bildung von Oxiden in einzelnen Prozessschritten des Fertigungsprozesses für einen Zylinderkopf ist jedoch bislang nur in Ansätzen untersucht worden.

Eine effektive Untersuchung der vielfältigen unterschiedlichen Einflüsse des Formfüllprozesses auf die Gussqualität eines Zylinderkopfes ist nur durch Simulationstechniken möglich. Die Simulation von Strömungsvorgängen und der Formfüllung ist heute Stand der Technik. In den letzten Jahren sind darüber hinaus unterschiedliche Simulationsmodelle zu Bildung und Transport von Oxiden während der Formfüllung vorgeschlagen worden [3 bis 7]. Allerdings sind diese Modelle aufgrund der Komplexität und des Rechenaufwandes in vielen Fällen entweder nur zwei-dimensional verfügbar, nicht für die speziellen Randbedingungen von Aluminiumlegierungen geeignet oder aufgrund des Berechnungsaufwands für einen praktischen Einsatz in der Gießerei nur sehr bedingt einsetzbar.

Die aktuelle Version der Simulationssoftware MAGMA⁵ bietet einfache, aussagekräftige und quantitative Bewertungsmöglichkeiten der potentiellen Oxidbildung während der Formfüllung realer komplexer Gussteile. In Verbindung mit den voll integrierten Möglichkeiten zur automatischen Versuchsplanung und Prozessoptimierung ist so die Optimierung von Gießsystemen und Prozessbedingungen in kurzer Zeit bereits im Entwicklungsprozess möglich.

*) Diese Veröffentlichung beruht auf der Dissertation von Dr.-Ing. Lubos Pavlak und weiterführenden Arbeiten bei der MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung seitens der Gießerei Nematik GmbH in Wernigerode/D und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg/D.

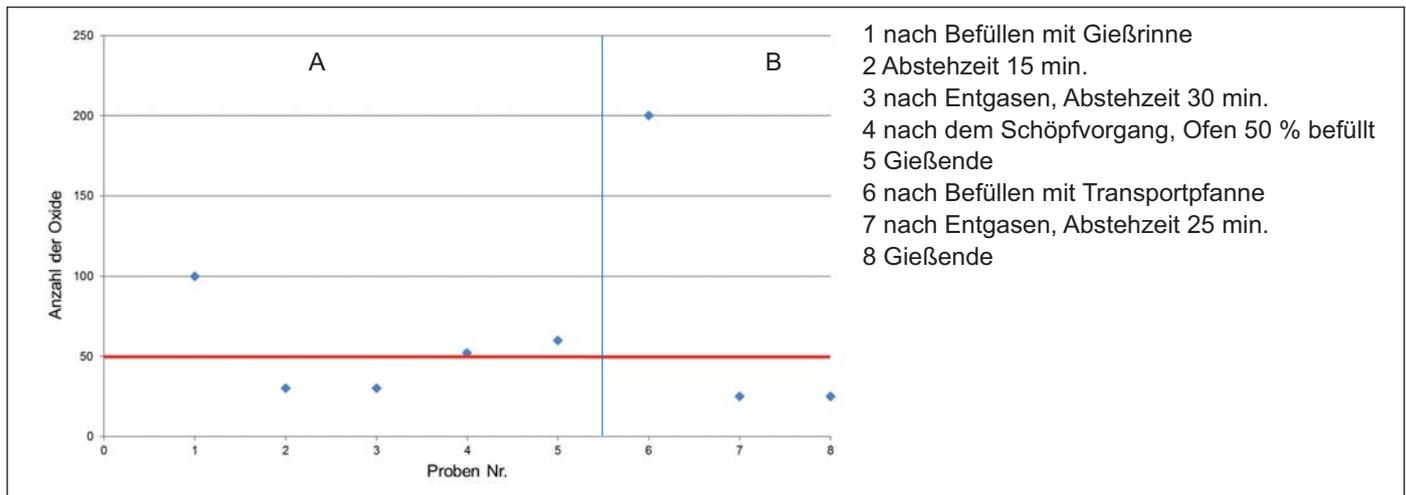


Abb. 1: Gemessene Anzahl an Oxiden in der Schmelze (PREFIL-Verfahren) für unterschiedliche Prozessschritte in zwei Zylinderkopf-Fertigungslinien A und B. Die rote Linie kennzeichnet den Grenzwert von 50 Oxidhäuten/kg Schmelze.

Experimentelle Bewertung der Schmelzequalität

Die Schmelzequalität wurde für unterschiedliche Prozessschritte experimentell bewertet. Das hierfür genutzte PREFIL-System basiert auf der Filtration einer Probe mit flüssigem Aluminium durch einen Keramikfilter unter kontrollierten Bedingungen. Die qualitative Auswertung der Einschlüsse erfolgt an Proben, die in der Nähe des Filters entnommen werden. Dabei wird die Anzahl der Oxide wie auch ihre Stärke und Länge aus den Proben metallographisch ausgewertet (Abb. 1).

Die Proben Nr. 1 bis Nr. 5 wurden von einer Fertigungslinie für Zylinderköpfe (A) genommen, bei der die Schmelze zu 84 % aus Blockmaterial und zu 16 % aus Kreislaufmaterial zusammengesetzt war. Die Proben Nr. 6 bis Nr. 8 entstammen einer zweiten Fertigungslinie (B) mit einem Aluminium, das zu 45 % aus Blockmaterial und zu 55 % aus Kreislaufmaterial erschmolzen wurde.

Die Anzahl der gemessenen Oxidhäute in den Proben Nr. 1 und Nr. 6 liegt deutlich über dem auf Erfahrung beruhenden Grenzwert von 50 Oxidhäuten/kg Schmelze und ist damit nicht akzeptabel. Diese extrem hohen Werte werden durch Umfüllvorgänge in die Gießöfen verursacht, vor allem beim Entleeren der Transportpfanne. Am Ende des Gießvorganges liegt die Anzahl der Oxidhäute im Gießofen (Proben Nr. 5) nach

wie vor knapp über der kritischen Grenze. Eine Reduzierung des Oxidhautgehaltes der Schmelze, besonders nach den Umfüllvorgängen, kann beispielsweise durch eine ausreichende Abstehezzeit vor oder nach der Entgasungsbehandlung erreicht werden. Dann liegt die Anzahl der Oxidhäute deutlich unter der kritischen Grenze (Proben Nr. 2, Nr. 3, bzw. Nr. 7). Die Ergebnisse bestätigen, wie sinnvoll es ist, gerade bei Umgießvorgängen aus der Pfanne eine möglichst turbulenzarme Umfüllmethode anzustreben.

Experimentelle Untersuchung von Strömungsvorgängen

Für die qualitative Bewertung der Strömungsvorgänge während der einzelnen Prozessschritte wurde hochauflösende Videotechnik verwendet, die eine Bildfrequenz von bis zu 1.000 Aufnahmen pro Sekunde liefert.

Der Schmelzetransport vom Schmelzofen in den Warmhalteofen erfolgt durch die Gießrinne oder die Transportpfanne, wenn sich der Gießofen in größerer Distanz zum Schmelzaggregat befindet. Nach der Schmelzebehandlung wird die Schmelze mit einem Gießlöffel vom Warmhalteofen in die eigentliche Form gefüllt. Bei jedem Umfüllprozess entstehen Verwirbelungen auf der freien Schmelzbadoberfläche (Abb. 2). Dies ist eine wichtige Ursache für die Erzeugung neuer Oxide in der Schmelze.

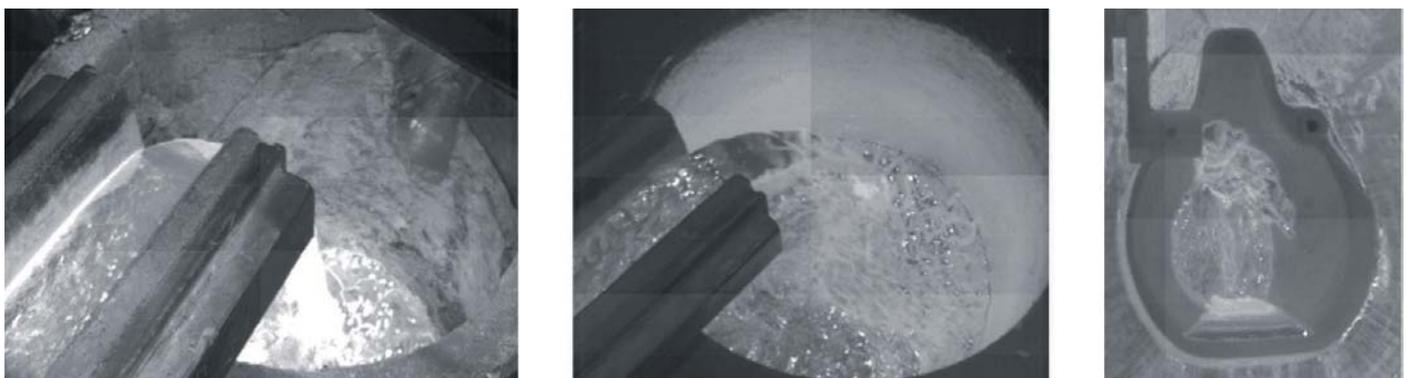


Abb. 2: Untersuchung der Umfüllprozesse durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Befüllen der Transportpfanne (links), Füllen des Warmhalteofens (mittig), Füllen der Gießpfanne (rechts).



Abb. 3: Änderung der Strömungsrichtung während der Formfüllung eines Zylinderkopfes. Der Deckkern wurde so präpariert, dass der Strömungsverlauf der Schmelze vom Gießlauf über den Anschnitt mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen werden kann.

Auf den Bildern der Videoaufnahmen lassen sich diese Verwirbelungen gut erkennen. Die Vermischung des auf der Badschmelzoberfläche gebildeten Oxidschaums durch den fallenden Schmelzestrom ist sichtbar. Diese Beobachtung der Umfüllvorgänge bestätigt die Ergebnisse der PREFIL-Messungen. Bei allen Proben, die nach dem Befüllen des Warmhalteofens von der Transportpfanne oder direkt vom Gießstrahl entnommen wurden, konnte eine Überschreitung der kritischen Grenze für Oxidhäute nachgewiesen werden (vgl. Abb. 1). Nach der Schmelzebehandlung im Gießofen (Entgasen und Abstehen) sinkt die Anzahl der Oxidhäute in der Schmelze.

Die Füllung eines Zylinderkopfes im Kopfgussverfahren ist ein komplexer Strömungsvorgang. Verwirbelungen beim freien Fall der Schmelze in das Gießsystem und aus dem Laufsystem in den Formhohlraum lassen sich im Schwerkraftguss nicht vermeiden, nur reduzieren. Die Schmelze strömt zwischen unterschiedlichen Kernen durch. Eine gezielte Schmelzeführung zur Reduzierung von Turbulenzen in den filigranen Formhohlräumen eines Zylinderkopfes mit Wandstärken von 4 mm verlangt daher viel Erfahrung und grundlegende Kenntnisse der Strömungstechnik.

Bei der Gestaltung des Gießlaufs und der Anschnittpositionen sind sowohl die Fließgeschwindigkeit als auch die stabile Strömung der Schmelze aus den Anschnitten wichtige Einflussgrößen, um eine unerwünschte Umströmung der Kerne zu vermeiden. Eine ungünstige Strömungsrichtung während der Formfüllung

kann zu einem lokalen Einfrieren der Schmelze an der Kernkontur führen. An der Schmelzoberfläche bildet sich dabei eine Oxidhaut, die im Laufe des Füllvorgangs eingeschlossen wird und im Gussteil verbleibt (Abb. 3). Die filigrane Innenkontur der Form und die dünnen Wände des Zylinderkopfes erhöhen das Risiko von Defekten im Gefüge durch Oxideinschlüsse und damit von Undichtigkeiten, wie durchgeführte Untersuchungen im Schwerkraftguss gegossener Zylinderköpfe bestätigen (Abb. 4).

Quantitative Analyse der Oxidbildung und Optimierungsmöglichkeiten mit Hilfe der Gießprozess-Simulation

Die Möglichkeiten der Gießprozess-Simulation ermöglichen eine quantitative Bewertung des Einflusses von Prozessgrößen auf die Bildung von Luftporen und Oxiden für den gesamten Prozessablauf, vom Abstecken der Schmelze aus dem Schmelzaggregat bis zum Gießen des Bauteils.

Zur Bewertung der Gesamtmengen an eingeschlossener Luft und der Bildung von Oxideinschlüssen werden unterschiedliche berechnete Qualitätskriterien genutzt:

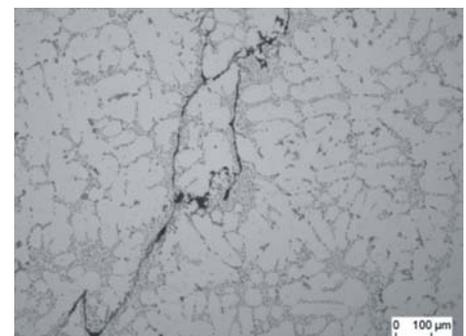
1. Die Menge an eingeschlossener Luft während der Formfüllung
2. Die kumulierte Menge an freier Oberfläche der Schmelze über den Füllverlauf



(a) Schnitt durch undichten Zylinderkopf



(b) Bruchstelle durch undichte Wand



(c) Metallographisch präparierte Probe

Abb. 4: Ursachenanalyse für einen undichten Zylinderkopf. Lecktests unter Wasser zeigen undichte Stellen durch aufsteigende Blasen an (a). Die Bruchstelle zeigt den Verlauf einer Oxidhaut quer durch die dünne Wand (b). Das Schliffbild bestätigt die Ursache für die Leckage (c).

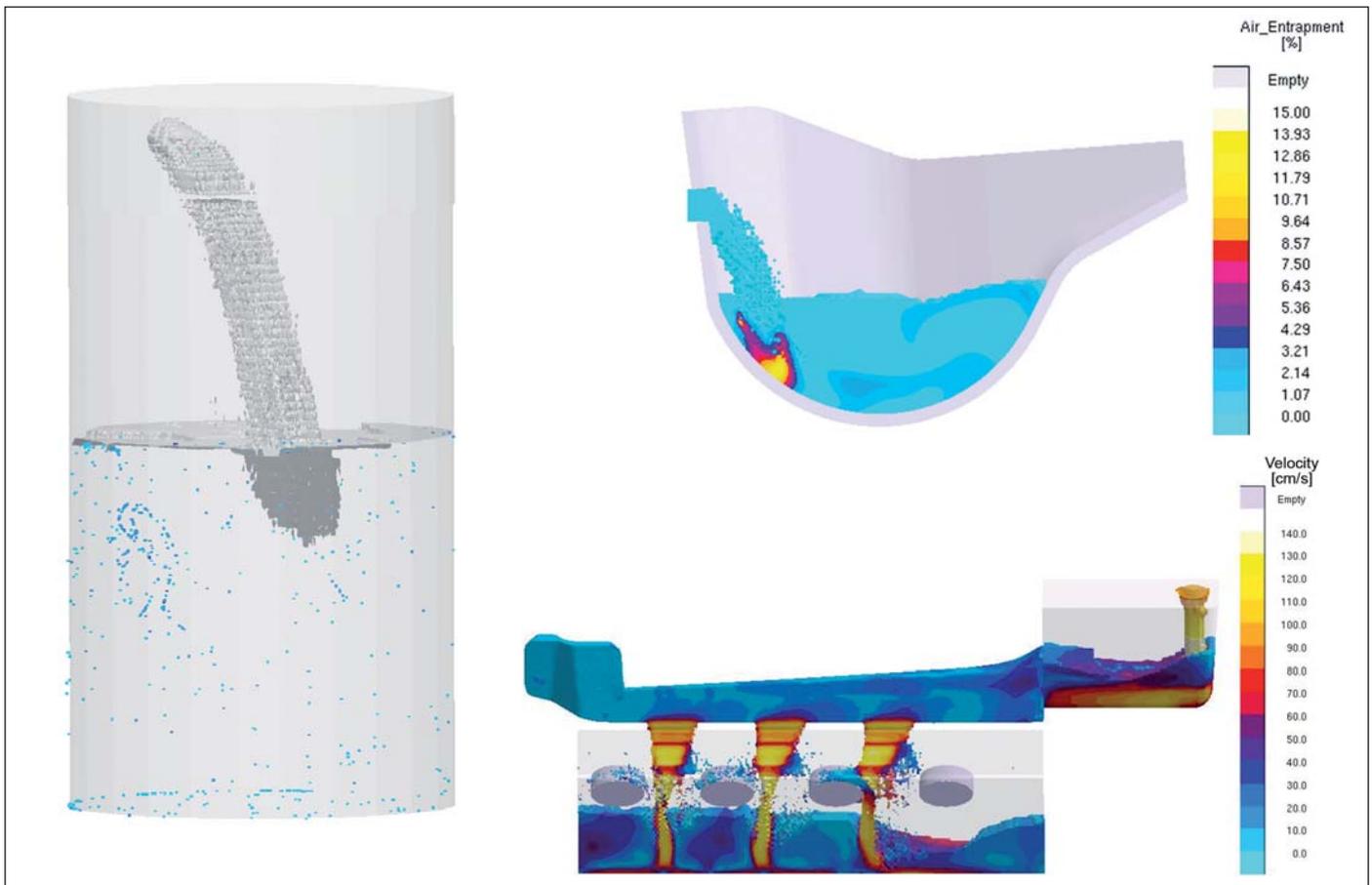


Abb. 5: Ausgewählte Qualitätskriterien der Gießprozess-Simulation für die Bewertung der Bildung von Oxiden. Oxideintrag (links), eingeschlossene Luft (rechts oben) und Strömungsgeschwindigkeiten (rechts unten).

3. Die Zeit, die die Schmelze während des Füllvorgangs in Kontakt mit Luft steht (die Kriterien 2 und 3 sind Indikatoren für die Oxidneigung)
4. Ein Kriterium, an welchen Stellen Luft während der Formfüllung in die Schmelze eingetragen wird
5. Virtuelle Teilchen in der Schmelze (Tracer), die zusätzlich während der Füllvorgänge mit verfolgt werden, um den Strömungsverlauf anzuzeigen. Diese Teilchen können darüber hinaus aufgrund eigener Masse und Größe durch Auftrieb in der Schmelze aufsteigen.

Abb. 5 zeigt exemplarisch ausgewählte Qualitätskriterien: den simulierten Eintrag von Oxiden durch Tracer beim Füllen eines Warmhalteofens, die berechnete Menge an eingeschlossener Luft beim Füllen eines Gießlöffels und die Geschwindigkeitsverteilung in der Schmelze während der Formfüllung eines Zylinderkopfes. Wichtig für alle berechneten Qualitätskriterien ist es, dass sie quantitative Ergebnisse liefern. Dadurch können die Auswirkungen von Änderungen in der Gießtechnik oder von Prozessparametern (Designgrößen) bewertet und mit einer Zielfunktion im Programm automatisiert optimiert werden.

Optimierung des Gießsystems für Zylinderköpfe

Durch Oxideinschlüsse verursachte Undichtigkeiten sind für den untersuchten Zylinderkopf eine der wesentlichen Fehlerursachen. Die Analyse der Formfüllung

mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sowie die Simulation der Formfüllung der Ursprungsgeometrie zeigen das Potential für die Optimierung des Gießsystems auf. Dabei nimmt sowohl die Schmelzequalität als auch die Art der Formfüllung direkten Einfluss auf die Menge und Verteilung von Oxideinschlüssen im Gussteil.

Für die ursprüngliche Gießtechnik wurden folgende Hauptursachen für Oxidbildung festgestellt:

- große Turbulenzen der Schmelze im Gießtumpel
- hohe Schmelzegeschwindigkeiten im Gießlauf
- eine ungünstige Strömungsrichtung aus den Anschnitten in das Gussteil

Mit Hilfe eines virtuellen Versuchsplans wurde der Einfluss von unterschiedlichen geometrischen Änderungen am Gießsystem beziehungsweise von Prozessbedingungen auf die Oxidbildung und den Eintrag von bereits vorhandenen Oxiden simulationstechnisch quantifiziert.

Als erste Zielsetzung für die optimierte Auslegung des Gießsystems wurde mit dem virtuellen Versuchsplan die Minimierung von Turbulenzen (und damit der Oxidbildung) im Gießtumpel angestrebt. Um die in der Ursprungsversion beobachteten Verwirbelungen beziehungsweise den Überschlag der Schmelze an den Wänden des Gießtumpels zu vermindern, wurden die Gießhöhe und die Lage des Gießstrahls (Gießen an die hintere Tumpelwand statt auf den Boden des Gießtumpels) variiert, Abb. 6 (1).

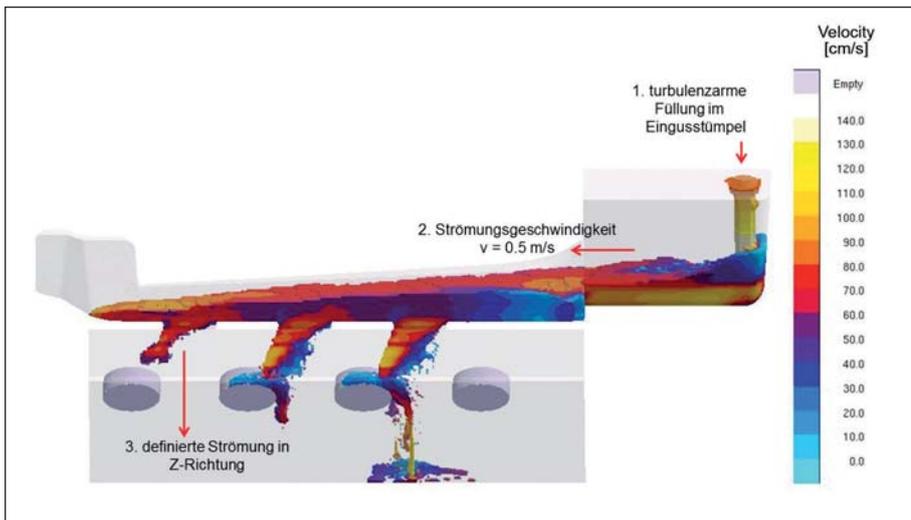


Abb. 6: Schematische Darstellung der Optimierungsziele für den virtuellen Versuchsplan

Gießtümpel mit flacher/stufiger Gießlaufanbindung		Variante	Anschnitthöhe	Fließweg
1		A	6 mm	ohne
2		B	16 mm	ohne
3		C	6 mm	6 mm dick
4		D	16 mm	6 mm dick

Abb. 7: Versuchsplan und Nomenklatur für die 16 untersuchten Varianten

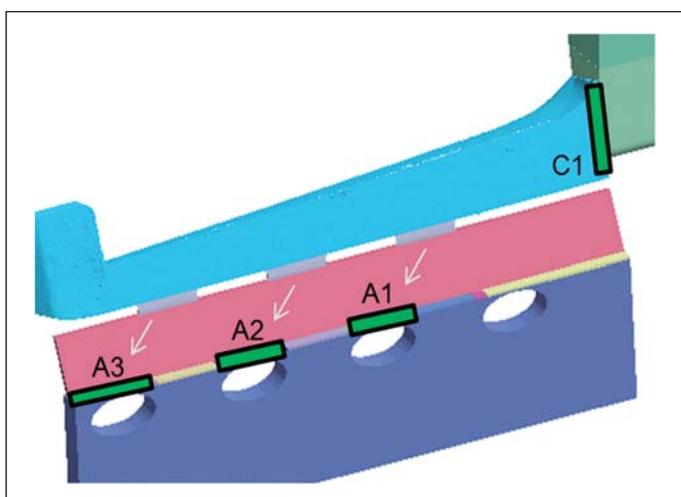


Abb. 8: Definition der Auswertgebiete A1, A2, A3 für die Untersuchung der von der gewünschten Z-Richtung abweichenden Schmelzeströmung und des Kontrollpunktes C1 für die Geschwindigkeitsermittlung

Die zweite Zielsetzung betraf die Reduzierung der Schmelzgeschwindigkeit aus dem Gießtümpel in den Gießlauf. Als Option wurde neben dem direkt an den Lauf angebrachten Gießtümpel ein Umlenk-tümpel untersucht. Unterschiedliche Alternativen für die Anbindung des Gießtümpels an den Gießlauf (steigend oder stufig statt flach) sollten die gewünschte Geschwindigkeitsreduzierung unterstützen, **Abb. 6 (2)**.

Im Falle des untersuchten Zylinderkopfes fließt die Schmelze vom Anschnitt über die Wand in das Gussteil. Durch die optimierte Gestaltung des Anschnittsystems sollte als drittes Ziel der Optimierung eine konstante vertikale Strömung aus den Anschnitten in Richtung Wasserraumbereich realisiert werden. Damit sollte ein Auftreffen der Schmelze auf den Kanalkernen und das damit verbundene lokale Einfrieren möglichst vermieden werden. Als Prozessvariablen wurden verlängerte Anschnitte und zusätzliche Fließhilfen unter den Anschnitten untersucht, **Abb. 6 (3)**.

Für die Optimierung wurde die Originalgeometrie des Gießsystems verwendet und in MAGMA⁵ parametrisiert. Die komplexe Geometrie des Zylinderkopfes wurde aus Effizienzgründen durch ein Ersatzgussteil ersetzt. Die Wandstärke und die Neigung der Wand unter dem Anschnitt sowie die Position der Kanalkerne entsprechen denen im realen Zylinderkopf (**Abb. 6**).

Die folgenden geometrischen Variablen wurden variiert: Eingusstümpel (direktes Eingießen oder Umlenkung), Anbindung vom Eingusstümpel zum Gießlauf (flach oder steigend), Anschnitthöhe (kurz oder lang) und Fließhilfen (vorhanden vs. nicht vorhanden). Die Kombination aller variierten Eingangsparameter ergibt 16 zu berechnende Varianten (**Abb. 7**).

Für die Auswertung der Simulationsergebnisse wurden die folgenden Zielfunktionen definiert:

1. Minimierung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit im Kontrollpunkt C1 am Übergang zwischen dem Eingusstümpel und dem Gießlauf
2. Minimierung des Schmelzevolumens durch die Anschnitte A1, A2 und A3 mit unerwünschter Strömungsrichtung (Abweichung von der z-Richtung) (**Abb. 8**)
3. Reduzierung der kumulierten „freien Oberfläche“ der Schmelze während des Füllens

Die Abarbeitung des virtuellen Versuchsplans inklusive der notwendigen Geometrieänderungen, der Ver-

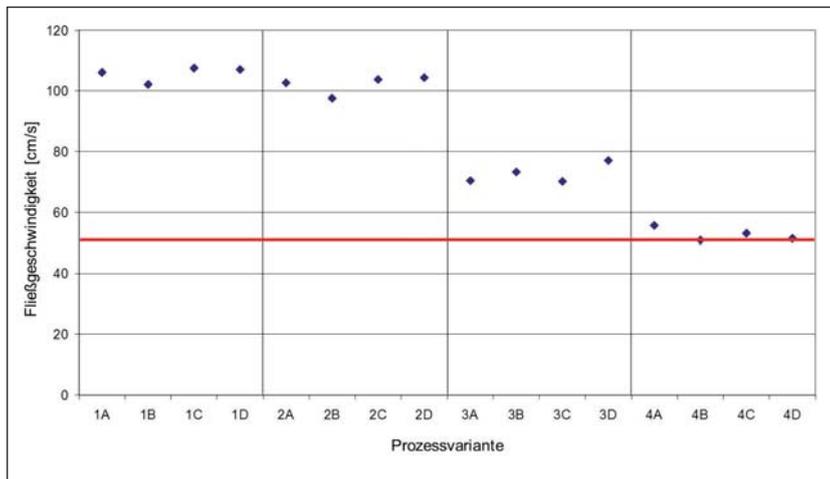


Abb. 9: Durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeiten am Übergang Gießtumpel-Gießlauf (Messpunkt C1) für alle berechneten Designs. Die rote Linie kennzeichnet den angestrebten Grenzwert von 50 cm/s Strömungsgeschwindigkeit.

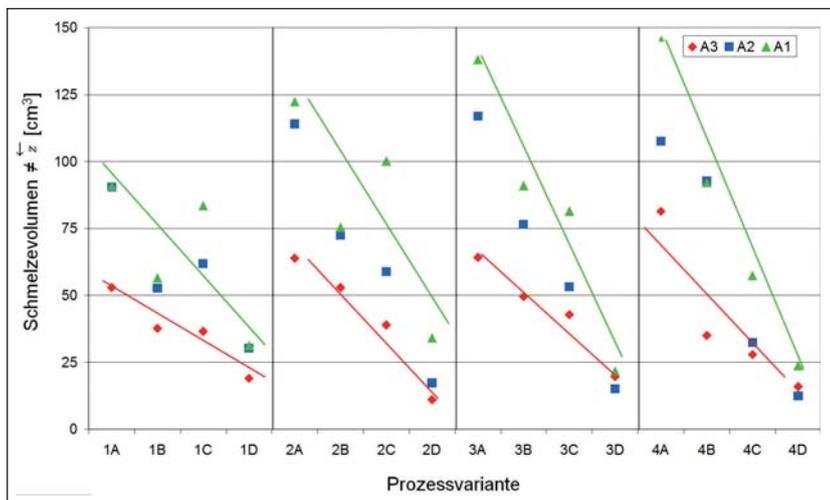


Abb. 10: Schmelzevolumen [cm³] außerhalb der senkrechten (gewünschten) Strömungsrichtung in den Anschnitten A1 bis A3 für alle 16 untersuchten Varianten

netzung neuer Geometrien, der Berechnungen und der Auswertung von Qualitätskriterien und Zielfunktionen erfolgt in MAGMA⁵ Rel. 5.3 automatisch.

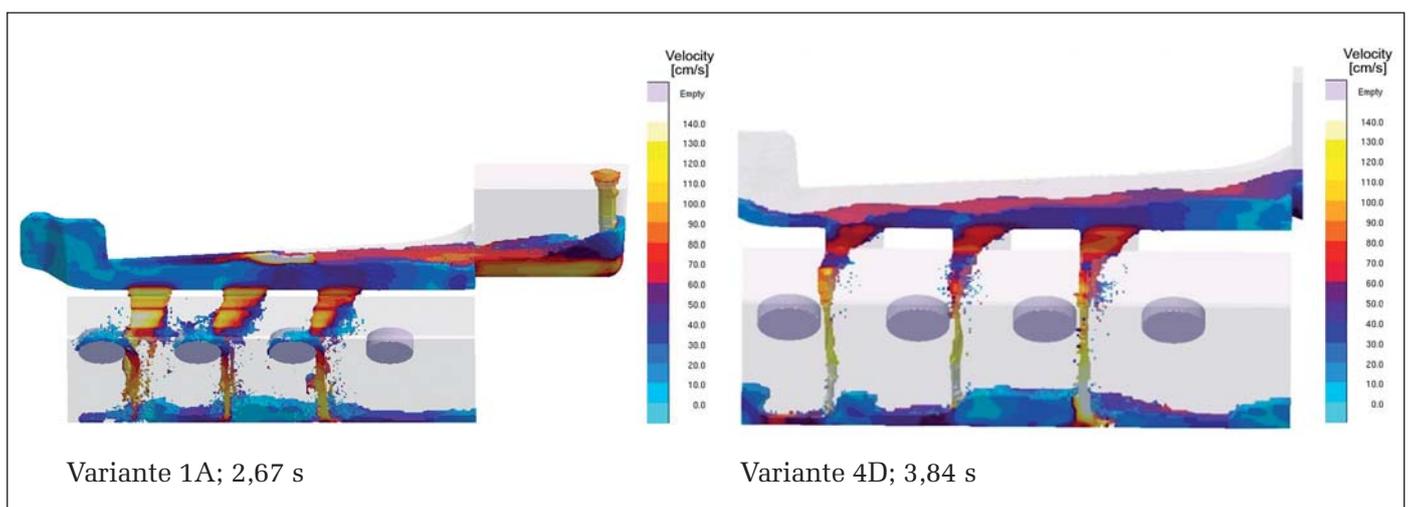
Auswertung der Optimierung Reduzierung der Geschwindigkeit im Gießlauf

Die Strömungsgeschwindigkeit bei Aluminiumlegierungen sollte 50 cm/s nicht überschreiten, da es ansonsten zu Instabilitäten und Oberflächenturbulenzen an der Schmelzefront kommen kann [1]. Die damit verbundene Vergrößerung der freien Oberfläche führt zur Bildung von Oxideinschlüssen. Die Reduzierung der Schmelzgeschwindigkeiten im Gießlauf kann darüber hinaus die Einstellung der gewünschten vertikalen Strömungsrichtung der Schmelze aus den Anschnitten unterstützen.

Die Auswertung zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen den untersuchten Design- und Prozessvarianten und der Geschwindigkeit der Schmelze im Messpunkt (Abb. 9). Das Ziel einer Fließgeschwindigkeit von unter 50 cm/s erfüllen die Varianten 4A bis 4D am besten. Bei der Variante 4D war die durchschnittliche Geschwindigkeit im Gießlauf mit 52,9 cm/s am geringsten. Im Vergleich zu der Ursprungsvariante 1A mit 105,7 cm/s entspricht das einer Halbierung der Strömungsgeschwindigkeit.

Kontrolle der Strömungsrichtung aus den Anschnitten

Mit der zweiten Zielsetzung sollte die Schmelze aus den Anschnitten möglichst senkrecht, ohne auf die Kerne zu treffen, in das Bauteil fließen. In Abb. 10 ist das Volumen der Schmelze, das in den Auswertebereichen A1 bis A3 nicht in die gewünschte z-Richtung fließt, über alle untersuchten Varianten aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Strömungsrichtung der



Variante 1A; 2,67 s

Variante 4D; 3,84 s

Abb. 11: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen für die untersuchten Varianten 1A und 4D für einen Zeitpunkt.

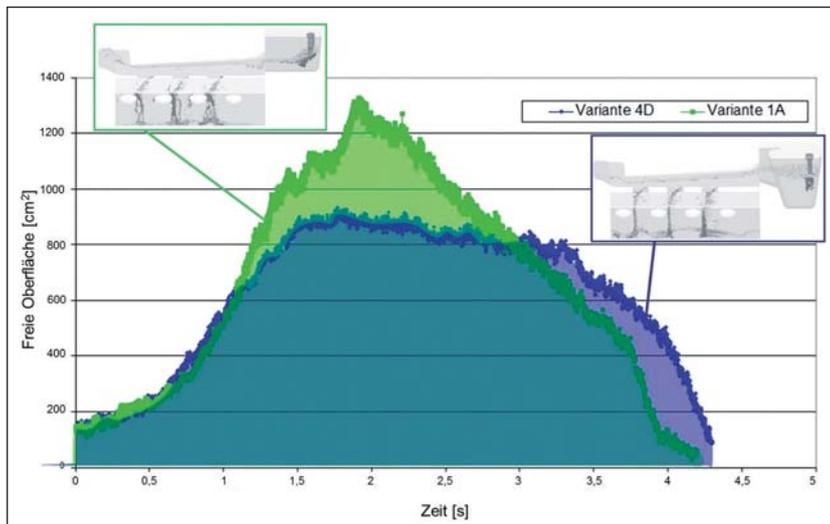


Abb. 12: Der Verlauf der freien Oberfläche der Schmelze als Funktion der Zeit für die Varianten 1A und 4D.

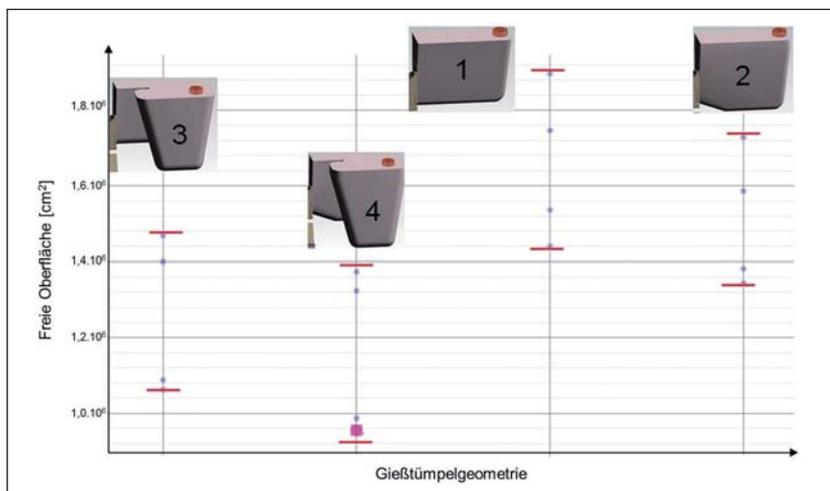


Abb. 13: Über die gesamte Füllzeit kumulierte „freie Oberfläche“ der Schmelze [cm²] für unterschiedliche Varianten von Gießtumpelgeometrien und Anbindungen an den Gießlauf.

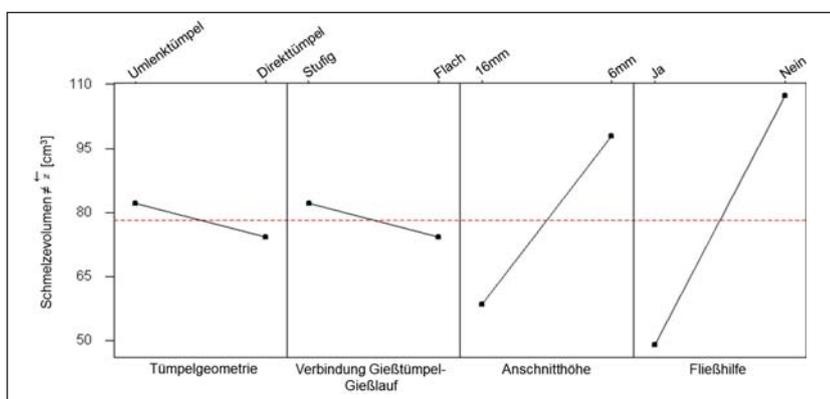


Abb. 14: Das Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Variablen auf die Zielfunktion „Schmelzevolumen mit unerwünschter Strömungsrichtung“ für den Anschnitt A1

Schmelze im ersten Anschnitt A1 für alle Varianten jeweils am weitesten von der gewünschten z-Achse abweicht. Dies liegt an den Druckverhältnissen und der kinetischen Energie der Schmelze, die von Anschnitt zu Anschnitt abnehmen. Der Vergleich der einzelnen Versuche zeigt, dass für alle D-Varianten, d. h. unabhängig von der Geometrie des Eingusstümpels und der Anbindung an

den Gießlauf, die geringsten Schmelzevolumina in die unerwünschte Richtung fließen. Die beste Variante ist die Version 4D, bei der über die gesamte Formfüllung insgesamt nur 52 cm³ Schmelze aus allen drei Anschnitten von der gewünschten Fließrichtung abweichen. Die Auswertung der simulierten Ergebnisse zeigt, dass die Schmelze für diese Variante die Kanalkerne nur geringfügig von der Seite berührt (Abb. 11).

Reduzierung der freien Oberfläche der Schmelze

Mit dem Kriterium „freie Oberfläche“ wird in MAGMA⁵ die während der Formfüllung mit Luft in Kontakt stehende Schmelze gemessen. Dieses Kriterium kann zu definierten Zeitpunkten der Formfüllung (Abb. 12) oder kumuliert (Abb. 13) bewertet werden. Aufgrund der Geometrieänderungen im Gießsystem bestehen zwischen einzelnen berechneten Varianten Volumen- beziehungsweise Gewichtsunterschiede. Das Schmelzevolumen der Variante 4D beträgt 4,48 l und ist im Vergleich zu der Variante 1A mit 2,82 l um 62 % größer. Dennoch hat sich die berechnete kumulierte freie Oberfläche der Schmelze von 120.678 mm² bei der Variante 1A auf 114.944 mm² bei der Variante 4D um etwa 5 % reduziert. Das potentielle Risiko, dass Oxideinschlüsse entstehen, wurde damit deutlich verringert (Abb. 13).

Auswertung der Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen und Zielfunktionen

Die Signifikanz der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen veränderten Prozessgrößen und den untersuchten Zielfunktionen kann in der Software mit sogenannten Haupteffektdiagrammen dargestellt und bewertet werden (Abb. 14).

Auf der y-Achse ist das durchströmende Schmelzevolumen durch Anschnitt A1, das nicht in die gewünschte z-Richtung fließt, dargestellt. Die einzelnen Linien zeigen den Einfluss der vier Variablen auf die untersuchte Zielfunktion. Geringe Steigungen der Geraden bei den Varianten „Tümpel“ und „Anbindung zwischen Tümpel-Gießlauf“ zeigen, dass diese Veränderungen keinen signifikanten Einfluss auf die Zielfunktion haben. Dagegen dokumentiert das Haupteffektdiagramm den klaren Einfluss der Anschnitthöhe und des Einsatzes von Fließhilfen auf einen optimierten Strömungsverlauf.

Den Einfluss der Fließhilfe auf den Strömungsverlauf in z-Richtung in einem

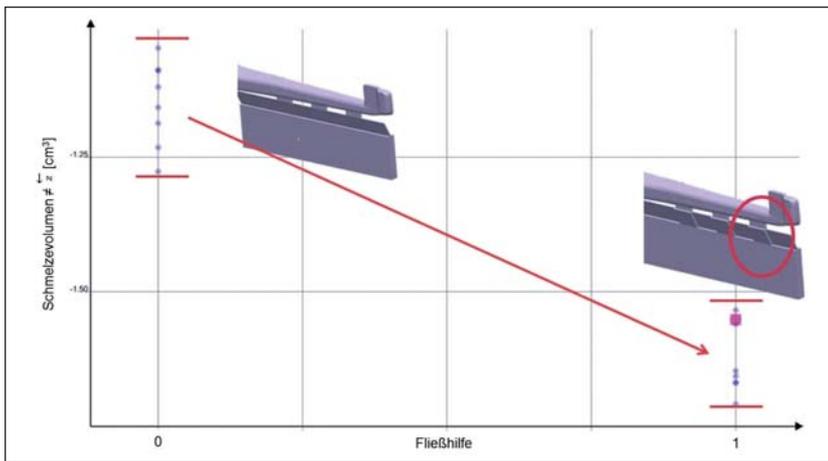


Abb. 15: Einfluss der Fließhilfe auf die senkrechte Strömungsachse in z-Richtung (0 keine Fließhilfen, 1 Fließhilfen)

Streudiagramm zeigt **Abb. 15**. Die gefrästen Fließhilfen haben einen bedeutenden Einfluss auf die gewünschte senkrechte Fließrichtung der Schmelze.

Parallel zu den drei bisher diskutierten Zielen wurden in den Simulationen mit sogenannten virtuellen Tracerteilchen auch Oxidpartikel bewertet, die nur beim Eintritt der Schmelze in die Form, nicht aber während der Formfüllung selbst, durch Verwirbelungen der Schmelze entstehen. Den Partikeln wurden die Dichte von Aluminiumoxid und die typische Größe einer Oxidhaut zugewiesen. Die Teilchen bewegen sich im Wesentlichen aufgrund der Strömungsdynamik in der Schmelze, erfahren aber aufgrund der Dichteunterschiede von Schmelze und Oxid auch Auftrieb. Da die Schmelzequalität durch vorausgegangene Umfüllprozesse eine bedeutende Rolle für die Gesamtmenge an potenziellen Oxiden im Gussteil spielt, wurde untersucht, wie groß der ins Gussteil gestromte Anteil an

Teilchen für die einzelnen Versuchs- und Prozessvarianten ist.

Bei der Auswertung der Anzahl an Oxidteilchen im Gussteil wird sowohl für die Ausgangsvariante 1A und das für alle anderen Kriterien beste Design 4D der Einfluss der Gestaltung der Eingsusstümpelgeometrie und der Anbindung zwischen Eingsusstümpel und Gießlauf auf die Gesamtanzahl an Teilchen im Gussteil deutlich (**Abb. 16**). Obwohl aufgrund des größeren Schmelzevolumens in der Variante 4D in Summe insgesamt mehr Oxidpartikel entstanden sind, gelangen durch die optimierte Gestaltung des Umlenktümpels und die stufige Anbindung zum Gießlauf deutlich weniger Teilchen in den Gießlauf und weiter ins Gussteil. Der Anteil der Teilchen im Gussteil halbiert sich von 11,7 % auf 5,7 %.

Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Experimenten

Für sämtliche betrachtete Kriterien ist die Variante 4D die beste Lösung zur Vermeidung von Oxideinschlüssen. Daher wurde dieses Gießsystem im Vergleich zur Ausgangssituation für Abgüsse von Zylinderköpfen formtechnisch realisiert. Die für beide Varianten untersuchten Zylinderköpfe wurden mit den üblichen Prüfmethode auf Undichtigkeiten hin untersucht. Die statistischen Auswertungen zeigen eine klare Reduzierung der durch Oxide hervorgerufenen Undichtigkeiten und belegen damit die Richtigkeit der in der Simulation für die Bewertung genutzten Kriterien (**Abb. 17**).

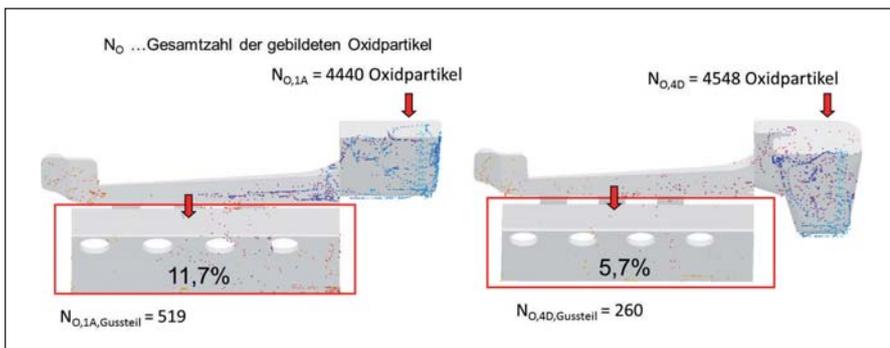


Abb. 16: Gesamtzahl der gebildeten Oxidpartikel N_{O} , Gesamtzahl im Gussteil $N_{O,Gussteil}$ und prozentuale Anteile an Oxidpartikeln, die sich am Ende der Formfüllung im Gussteil befinden im Vergleich (für die Varianten 1A und 4D).

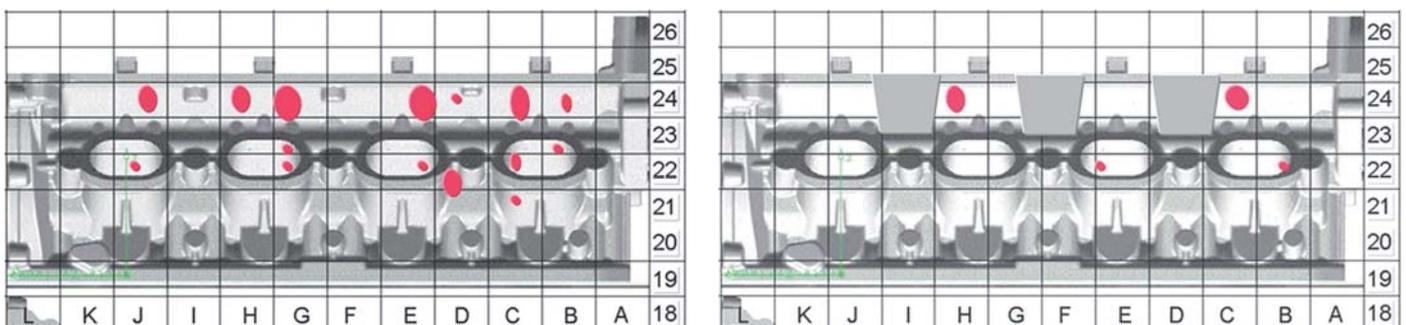


Abb. 17: Auswertung der Undichtigkeit durch Oxideinschluss am Zylinderkopf für die Variante 1A (links) und die Variante 4D (rechts). Die roten Punkte stellen die Lage und die Häufigkeit der Undichtigkeiten dar

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Gießprozess-Simulation wurden potentielle Quellen der Oxidbildung beim Gießen von Zylinderköpfen im Schwerkraftkokillenguss analysiert. Die experimentelle Bewertung der Schmelzequalität für die Umfüllprozesse mit Hilfe der PREFIL-Messmethode bestätigte, dass der freie Fall der Schmelze beim Umgießen und die damit verbundenen Verwirbelungen der freien Schmelzoberfläche ein hohes Risiko zur Oxidbildung darstellen. Am Beispiel des Befüllens eines Gießlöffels wurde gezeigt, wie mit der in MAGMA⁵ integrierten Versuchsplanung und der Variation von Prozessparametern das Risiko für Oxidbildung schnell und effektiv minimiert werden kann. Es wurde gezeigt, dass mit den im Simulationsprogramm MAGMA⁵ integrierten Möglichkeiten zur virtuellen Versuchsplanung und Optimierung von Prozessparametern und Gießtechnik bereits im Vorfeld des realen Versuchs Verbesserungsideen für die gießtechnische Gestaltung von Gießsystemen effektiv überprüft werden können. Über die konkrete Lösung für Zylinderköpfe hinaus erlaubt diese neue Methodik die Ermittlung umfassender Erkenntnisse über die quantitativen Zusammenhänge von Prozessvariablen und Qualitätskriterien und ermöglicht die Verfolgung unterschiedlicher, auch miteinander im Konflikt stehender Zielsetzungen.

Literatur

- [1] Campbell, J.: Castings (second edition), ELSEVIER, 2004
- [2] Carlsson, K.D.; Beckermann, Ch.: Modeling of Reoxidation Inclusion Formation during Filling of Steel Casting, Defect Formation, Detection, and Eliminating during Casting, Welding, and Solidification, TMS Materials Science and Technology Conference and Exhibition, September 2005, Pittsburgh, Pennsylvania, S. 35-46
- [3] Yang, X.; Huang, X.; Dai, X.; Campbell, J.; Tatler, J.: Numerical Modelling of the Entrainment of Oxide Film Defects in Filling of Aluminium Alloy Casting, International Journal of Cast Metal Research, vol. 17, No.6, 2004, 321-331
- [4] Campbell, J.: The modeling of entrainment defects during casting, Simulation of Aluminum Shape Casting Processing: From Alloy Design to Mechanical Properties, (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006
- [5] Lai, N. W.; Griffiths, W.D.; Campbell, J.: Modeling of the potential for oxide films entrainment in light metal alloy castings, Modeling of casting welding and advanced solidification processes, Warrendale, TMS, 2003
- [6] Lin, J.; Sharif, M. A. R.; Hill, J. L.: Numerical simulation of the movement, brake up and entrapment of oxide films during aluminum casting, Aluminium Transaction 1, 1999, S.: 71-78
- [7] Reilly, C.: Development Of Quantitative Casting Quality Assessment Criteria Using Process Modelling, PhD Thesis, The University of Birmingham, 2010
- [8] Pavlak, L.: Experimentelle und simulationstechnische Ursachenanalyse der Oxidbildung beim Zylinderkopfgießen, Dissertation, Shaker Verlag 2011

Kontaktadresse:

MAGMA Gießereitechnologie GmbH
 D-52072 Aachen | Kackertstraße 11,
 Tel.: +49 (0)241 88901 0 | Fax: +49 (0)241 88901 60
 E-Mail: info@magmasoft.de,
 www.magmasoft.de