

Strömungskontrolle beim Formfüllen mit Hilfe von Magnetfeldern

VON SVEN ECKERT, VLADIMIR GALINDO, GUNTER GERBETH, WILLY WITKE, DRESDEN, RALF GERKE-CANTOW, HANS-PETER NICOLAI, ULRICH STEINRÜCKEN, BESTWIG

Neue Anwendungen speziell im Automobil- und Luftfahrtsektor stellen die Gießereitechnik heute vor neue Herausforderungen. Es geht vor allem um die Herstellung immer größerer dünnwandigerer und komplexerer Gussteile bei gleichzeitig geforderten, höheren spezifischen Festigkeitseigenschaften.

Die Fertigung von Gussteilen, die den hohen Qualitätsansprüchen genügen, erfordert eine durchdachte Prozessführung mit speziellen Maßnahmen, die beispielsweise die Reinhaltung der Schmelze oder eine kontrollierte Erstarrung des Gusskörpers gewährleisten. Es ist aber auch bekannt, dass das Einfüllen der Schmelze in die Form als eine entscheidende Phase bei der Herstellung hochwertiger Gussteile ist. Beim Füllen der Form treten Probleme auf, wenn es an hydraulisch kritischen Punkten der Gussform wie Umlenkungen oder dem Eintritt der Schmelze in die Gusstraube zur Bildung starker Wir-

bel kommt, die einen Transport von den an der Oberfläche der Schmelze vorhandenen Oxidhäuten in das Innere der Schmelze bewirken. Im Ergebnis entstehen Inhomogenitäten im Gefüge, die in wesentlichem Maße die mechanischen Eigenschaften des Bauteils verschlechtern. In diesem Zusammenhang werden im erstarrten Gussteil anzutreffende Defekte, die zu mangelnden Festigkeitseigenschaften führen, oft auf ein mangelhaftes Design des Gieß- und Anschnittsystems zurückgeführt.

Aus bisherigen Studien und praktischen Untersuchungen liegen Erkenntnisse vor, dass beim Formfüllvorgang eine in ihrem exakten Zahlenwert unbekannte, vom Strömungsquerschnitt und Materialsystem abhängige Maximalgeschwindigkeit der einströmenden Schmelze nicht überschritten werden darf, um ein Auftreten von Oxideinschlüssen im Gussteil ausschließen zu können. Campbell [1] gibt für metallische Schmelzen einen Zahlenwert von 0,5 m/s an, oberhalb dessen das Auftreten von Instabilitäten (Tropfenbildung) an der freien Oberfläche des strömenden Flüssigmetalls erwartet

wird. Für eine Strömung flüssigen Aluminiums in einem geraden Rohr mit einem Innendurchmesser von 15 mm ist bereits bei Geschwindigkeiten von ca. 0,1 m/s ein Übergang von einem laminaren Strömungsregime zur Turbulenz zu erwarten. Diese Überlegungen implizieren zwangsläufig die Notwendigkeit einer strikten Kontrolle der Fließgeschwindigkeit der einströmenden Schmelze, sprich eine drastische Verminderung der Maxima der Strömungsgeschwindigkeit. Andererseits ist es wünschenswert, dass die Dauer des gesamten Füllvorganges durch das Abbremsen der Strömung möglichst wenig verlängert wird.

Methoden zur Kontrolle der Formfüllgeschwindigkeit

Beim konventionellen Schwerkraftgießen resultiert die Maximalgeschwindigkeit der Schmelze in erster Linie aus der Höhe der Form, die durch die Höhe des Gussteils und zusätzlicher gießtechnischer Anordnungen vorbestimmt ist. Da die Formen in der Regel immer höher sind als für das Erreichen der gewünschten, maximalen Geschwindigkeit erforderlich, behilft man sich bisher z. B. beim Kokillenguss damit, die Formen schräg anzustellen, um die Höhe geometrisch zu reduzieren. Im Laufe des Gießens wird dann die Form wieder aufgerichtet. Dieses Vorgehen ist für eine Vielzahl von Geometrien ausreichend, stößt bei großen oder komplexen Gussteilen aber auch an Grenzen.

Kontaktlose Methoden zur Kontrolle des Formfüllens sind von grundlegendem Interesse für Gießverfahren. Eine Möglichkeit der kontaktlosen Strömungskontrolle ist durch den Einsatz magnetischer Felder gegeben. Der Feinguss bietet durch die dünne Formschale die räumliche Freiheit, entsprechende Magnetfelder sehr nahe an den Strömungskanal heran bzw. heranzuführen. Mittels geeigneter Kombi-

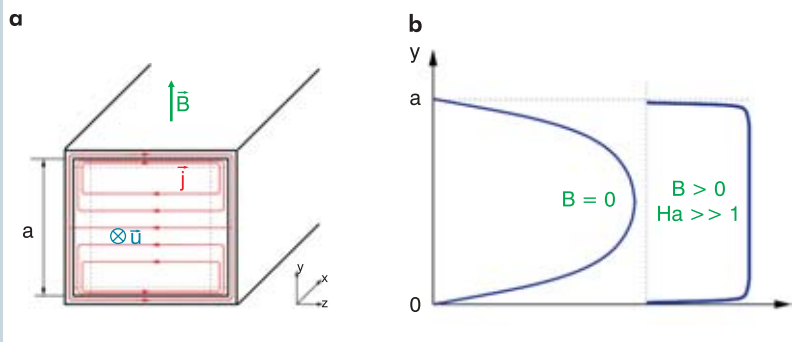


Bild 6: Schematische Darstellung des Bremsseffekts eines stationären, transversalen Magnetfeldes auf eine Kanalströmung: Verteilung des induzierten elektrischen Stroms im Kanalquerschnitt (a) und Vergleich der Geschwindigkeitsprofile einer gewöhnlichen, laminaren Kanalströmung und einer Strömung bei großen Hartmann-Zahlen (b)



Bild 2: Plexiglasmodell für Laborexperimente installiert an einem DC-Magnetsystem

nation bekannter Wirkprinzipien von Magnetfeldern kann die Strömung am Bedarf orientiert maßgeschneidert werden. Entsprechend der Lenz'schen Regel bremsen statische Magnetfelder die Bewegung eines elektrisch leitfähigen Mediums quer zu den Magnetfeldlinien. Mit Hilfe eines statischen Magnetfeldes können ebenfalls die turbulenten Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit wirkungsvoll gedämpft werden. Rotierende oder lineare Wanderfelder kommen dagegen zur Anwendung, um Strömungen zu erzeugen. Es existieren bereits Einsatzfälle in der Metallurgie, in denen derartige zeitabhängige Magnetfelder zum Pumpen, Dosieren oder Rühren genutzt werden. Ein Beispiel bietet das sogenannte AGSC-Verfahren [2], bei dem der Formhohlraum von unten mit Hilfe einer elektromagnetischen Pumpe gefüllt wird. Gesteuerte Strömungsbewegungen in der Schmelze werden auch benutzt, um die Erstarrungsmorphologie von Gussteilen gezielt zu beeinflussen [3, 4].

Nachfolgend werden einige Ergebnisse systematischer Studien über den Einfluss eines transversalen DC-Magnetfeldes auf die Merkmale der Zuströmung beim („Schwerkraft-“)Aluminium-Feinguss vorgestellt. Es handelt sich hierbei um das Prinzip einer elektromagnetischen Bremse, deren strömungsphysikalische Grundlagen im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden. Die Wirkung im speziellen Fall des Füllens einer Form wurde durch numerische und experimentelle Ergebnisse im Labor- als auch im industriellen Maßstab quantifiziert.

Wirkung eines DC-Magnetfeldes auf eine Strömung

In **Bild 1** ist das Prinzip einer so genannten elektromagnetischen Bremse schematisch dargestellt. Ein mit Schmelze gefüllter Kanal befindet sich zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten, der ein homogenes, zeitlich konstantes Feld \vec{B} erzeugt. Bewegt sich die metallische Schmelze entlang der Kanalachse in x-Richtung quer zu den magnetischen Feldlinien (hier in y-Richtung) mit der Geschwindigkeit \vec{u} , wird nach dem Faradayschen Induktionsgesetz ein elektrischer Strom \vec{j} induziert, der im vorliegenden Fall im Wesentlichen parallel zur z-Richtung fließt. In Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Kanalwände schließen sich die Stromlinien in den Kanalwänden (hohe Wandleitfähigkeit) oder in den Randschichten der Strömung, wenn, wie bei verlorenen Formen der Fall, die Schmelze den elektrischen Strom besser leitet als das Wandmaterial. Zur Erfüllung der Stromrandbedingung muss im allgemeinen ein elektrisches Feld \vec{E} berück-

sichtigt werden. Die Wechselwirkung der induzierten Stromdichte mit dem angelegten Magnetfeld erzeugt eine elektromagnetische Volumenkraft:

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} = \sigma (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (1)$$

Die Lorentzkraft außerhalb der Randschichten versucht entsprechend der Lenz'schen Regel die Bewegung der Schmelze zu hemmen, während die Strömung in den Randschichten dagegen beschleunigt wird. Damit bildet sich ein für Strömungen der Magnethydrodynamik typisches Geschwindigkeitsprofil heraus, als dessen wesentliche Merkmale eine Reduktion und Vergleichmäßigung der Geschwindigkeit im Kern der Strömung bei einer gleichzeitigen Zunahme der Gradienten in den Grenzschichten zu nennen sind. Neben den viskosen Kräften wird die Strömung nun zusätzlich durch die elektromagnetische Kraft gebremst. Die Hartmann-Zahl Ha ist eine wichtige Kennzahl, die das Verhältnis zwischen elektromagnetischer und viskoser Kraft widerspiegelt:

$$Ha = B \cdot a \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \quad (2)$$

In der Gleichung (2) bezeichnen die Größen B und a die magnetische Feldstärke und die für das jeweils zu betrachtende Problem typische Längenskala (hier die Abmessung des Strömungskanals). Außerdem werden die Materialparameter elektrische Leitfähigkeit σ und die dynamische Viskosität η berücksichtigt. Bei einer Hartmann-Zahl, die deutlich größer ist als eins, dominiert der Einfluss der Lorentzkraft im Vergleich zur Wandreibung. Die in unseren Experimenten maximal erreichbare Hartmann-Zahl betrug ungefähr 500.

Modellexperimente

Als sinnvolle Möglichkeit zur Untersuchung metallurgischer Prozesse haben sich Modellexperimente im Labormaßstab mit „kalten“ Metallschmelzen erwiesen, die am Forschungszentrum Rossendorf (FZR) durchgeführt werden. Hierbei wird auf Legierungen zurückgegriffen, die bei Raumtemperatur (GaInSn) bzw. bei Temperaturen unterhalb 300 °C (SnPb, SnBi) flüssig sind. Diese Möglichkeit ist bisher für Strömungsuntersuchungen von Gießverfahren kaum genutzt worden, verfügt jedoch über ein großes Erkenntnispotential. Im Temperaturbereich bis 300 °C kann die Strömung mit Hilfe am FZR vorhandener Strömungsmesstechniken wie Potentialsonden oder Ultraschall orts- und zeitaufgelöst ausgemessen werden. Dies ist wesentlich für eine Validierung der numerischen Rechnungen. In unserem Projekt wurden die

numerischen Simulationen für das reale Aluminium-Feinguss-Verfahren ausgeführt, nachdem deren Vertrauenswürdigkeit quantitativ anhand der Modellexperimente überprüft wurde. Auf dieser Basis lieferte die Numerik u. a. wesentliche Informationen hinsichtlich der Auslegung des Magnetsystems, welches bei ersten Experimenten im industriellen Maßstab bei der Titan-Aluminium-Feinguß GmbH zum Einsatz kam.

Die Nutzung der eutektischen Legierung Ga68In20Sn12 (Schmelzpunkt 10 °C) als Modellfluid erlaubte die Durchführung der Formfüllexperimente in transparenten Formen aus Plexiglas. Dies gewährleistet eine hohe Flexibilität bei der Versuchsdurchführung, d. h. es war möglich, eine Vielzahl experimenteller Durchläufe in überschaubaren Zeiträumen durchzuführen, wobei gleichzeitig gewünschte Modifikationen der experimentellen Konfiguration relativ problemlos umgesetzt werden konnten. Ein typischer Versuchsaufbau ist in **Bild 2** zu sehen. Die wesentlichen Komponenten einer im Feinguss üblicherweise verwendeten Form finden sich auch im Modell wieder: der Eingusstrichter, der vertikale Abstieg, der horizontale Verteiler und die Gusstraube, die in ihrer einfachsten Form hier als Zylinder ausgebildet wurde.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wirkung des Magnetfeldes dann besonders effizient ist, wenn das Magnetsystem dort positioniert wird, wo die höchsten Fluidgeschwindigkeiten während des Füllens erwartet werden. Dies geschieht in der Regel am Ende des vertikalen Abstiegs, bevor die Strömung in den horizontalen Verteiler umgelenkt wird. In diesem Bereich wurden die Polschuhe des Magnetsystems angeordnet.

Die Vorteile der Modellexperimente bestanden in erster Linie in den vielfältigen Möglichkeiten, den Formfüllvorgang detailliert zu beobachten und quantitativ zu charakterisieren. Die transparenten Wände der Form gestatten einen Zugang für die Videotechnik, um die einzelnen Stadien beim Einströmen der Schmelze visuell abzubilden. **Bild 3** zeigt in einem Ausschnitt des horizontalen Verteilers und des unteren Bereiches der Gusstraube zwei Momentaufnahmen der Füllung ohne Magnetfeld (**Bild 3a**) und mit Magnetfeld (0,5 T, **Bild 3b**), in denen deutlich eine starke Verwirbelung der Strömung mit Gaseinschlüssen im Horizontalkanal bzw. Instabilitäten der Schmelzefront beim Eintritt in die Form zu beobachten sind.

Quantitative, orts- und zeitaufgelöste Messungen der Strömungsgeschwindigkeit wurden mit Hilfe des Ultraschall-Doppler-Verfahrens (UDV) durchgeführt. Diese Messtechnik ist nichtinvasiv, er-

möglicht Messungen in nichttransparenten Fluiden und liefert vollständige Geschwindigkeitsprofile entlang des Ultraschallstrahls in Echtzeit [5]. In den letzten Jahren liefen am FZR intensive Entwick-

lungsarbeiten [6, 7], die erfolgreiche Messungen in verschiedenen Schmelzen (SnPb, PbBi, Na, CuSn, Al) bei Temperaturen bis zu 750 °C möglich machten. Bei den hier betrachteten Experimenten wur-

de der Ultraschallwandler von außen akustisch an die Kanalwand angekoppelt und sendet durch diese hindurch Ultraschallpulse in die vorbeiströmende GaInSn-Legierung. Die zeitliche Entwicklung der lokalen Geschwindigkeit an einer Position im vertikalen Abstieg (Mitte des Kanalquerschnitts, 50 mm über dem Boden) ist beispielhaft für drei verschiedene Magnetfeldstärken in Bild 4 dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird begonnen, die Schmelze in den Eingusstrichter zu gießen. Das Flüssigmetall erreicht nach wenigen Sekunden die Messposition. Erwartungsgemäß werden am Beginn des Prozesses jeweils die höchsten Geschwindigkeiten registriert, bevor sich die Strömung infolge der fortschreitenden Verringerung der Höhendifferenzen in der Form verlangsamt. Der Füllvorgang endet bei diesem Experiment nach ca. 18 s. Das danach aufgezeichnete Geschwindigkeitssignal wird durch ein Nachschwingen des Flüssigmetalls in der einem U-Rohr ähnlichen Form verursacht. Die Bremswirkung des Magnetfeldes ist offensichtlich. Besonders erfreulich ist die Beseitigung der Geschwindigkeitsspitzen am Anfang des Formfüllens um ca. 60 % bei einer Feldstärke von 0,85 T. Genauere Analysen der einzelnen Messungen offenbaren weitere positive Effekte infolge des Magnetfeldeinsatzes. So wurden die turbulenten Schwankungen der Geschwindigkeit deutlich verringert, Rezirkulationsgebiete an Ecken und Umlenkungen verkleinert bzw. ganz beseitigt sowie das Auftreten von Gaseinschlüssen signifikant vermindert.

Basierend auf den in Bild 4 dargestellten Datensätzen wurde unter der Annahme eines parabolischen Geschwindigkeitsprofils der mittlere Durchfluss berechnet und mit entsprechenden Werten, die mittels numerischer Simulation erhalten wurden, verglichen. Das Ergebnis ist in Bild 5 dokumentiert. Sowohl Experiment als auch die numerischen Rechnungen zeigen deutlich eine kontinuierliche Abnahme des Durchflusses der Schmelze mit wachsendem Magnetfeld. Details zur numerischen Simulation des Formfüllprozesses werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

Numerische Simulation

Für die numerische zeitabhängige Simulation des Füllvorgangs wurde die Navier-Stokes-Gleichung mit zusätzlicher elektromagnetischer Kraft unter Anwendung der kommerziellen Finite-Elemente-Software FIDAP gelöst. Die Berücksichtigung der elektromagnetischen Kräfte erfordert die Lösung einer zusätzlichen Gleichung für das elektrische Potential, die in Form einer sogenannten „species equation“ dem

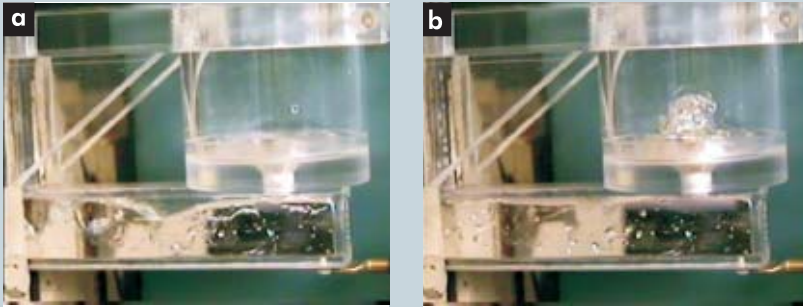


Bild 3: Momentaufnahmen des Einströmens der Schmelze in die Modellform (horizontaler Verteiler und unterer Teil der Gießtraube): B=0 (a), B=0,5 T (b)

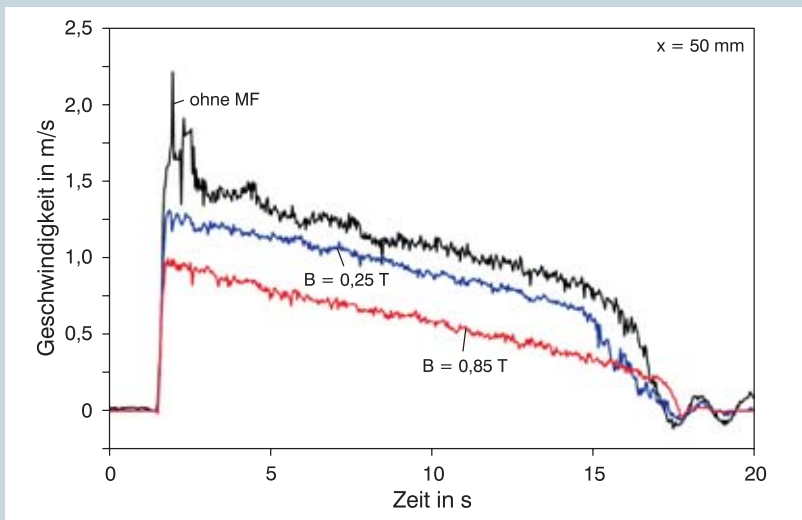


Bild 4: Zeitlicher Verlauf der lokalen Geschwindigkeit im vertikalen Abstieg (Messposition: Kanalmitte, 50 mm über Boden)

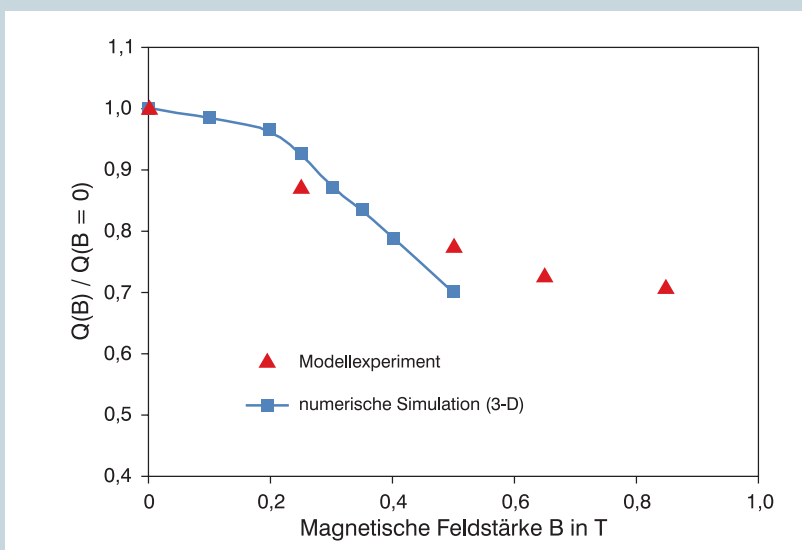


Bild 5: Mittlerer Durchfluss als Funktion der magnetischen Feldstärke (bezogen auf den Wert bei B = 0)

zu lösenden Gleichungssystem beigefügt wurde. Für die Beschreibung der sich frei einstellenden Oberfläche im Gussteil wurde die in FIDAP vorhandene Möglichkeit einer Volume-of-Fluid (VOF) Simulation genutzt. Das 3-D-Rechengitter besteht aus linearen Quader-Elementen mit jeweils 8 Knotenpunkten. Für die Simulation des Füllvorgangs benötigt man ca. 3 Tage Rechenzeit auf einem PC (2,4 GHz-Prozessor-Taktfrequenz) für eine Sekunde reelle Prozesszeit.

Bild 6 zeigt die dreidimensionale Geometrie einer Form, die als Modell in den Versuchen unter realen, industriellen Bedingungen bei der Titan-Aluminium-Feingießerei bei der Titan-Aluminium-Feingießerei GmbH benutzt wurde. Das Gussstück besitzt in diesem Fall zugegebenermaßen ein ungewöhnliches Aussehen. Diese hydraulisch unvorteilhafte Ausführung wurde bewusst so gewählt, um Gussfehler verstärkt zu provozieren. Die Inhomogenitäten des Magnetfeldes in der Nähe der magnetischen Polschuhe wurden in der Rechnung berücksichtigt.

Nachfolgend sollen einige Beispiele aus unseren numerischen Rechnungen die wesentlichen Effekte des Magnetfeldes bei der Formfüllung verdeutlichen. In **Bild 7** sind Vektorplots des Geschwindigkeitsfeldes für zwei Fälle gegenübergestellt: (a) der konventionelle Prozess ohne Magnetfeld und (b) derselbe Vorgang mit einem angelegten Magnetfeld von 0,5 T. Bei den Rechnungen wurde angenommen, dass der Eingusskanal stets mit Schmelze gefüllt war. Diese Momentaufnahmen des Füllvorganges zeigen deutlich die dämpfende Wirkung des Magnetfeldes auf die Strömung speziell an kritischen Punkten wie Ecken und in Wandnähe.

Bild 8 zeigt den zeitlichen Verlauf des Durchflusses sowie der lokalen Geschwindigkeit an einem ausgewählten Punkt im vertikalen Abstieg kurz vor der Umlenkung im Verlauf des Prozesses. Die Bremswirkung des Magnetfeldes auf die Strömung ist in allen Phasen des Formfüllvorganges zu erkennen. Besonders deutlich fällt die Reduzierung der maximalen Werte der Geschwindigkeit am Beginn des Einfüllens der Schmelze auf. In Kenntnis von Gleichung (1) ist dieser Effekt zu erwarten und beruht in einfacher Weise darauf, dass mit steigender Geschwindigkeit die Stärke des im Kanal induzierten Stroms und damit auch die resultierende Bremskraft zunimmt. Dies ist für den hier betrachteten Anwendungsfall natürlich von Vorteil.

Gießversuche unter produktionsnahen Bedingungen

Die im Modellversuch erzielten Ergebnisse bildeten die Grundlage für das Design des Prototyps eines statischen Magnetfeldes,

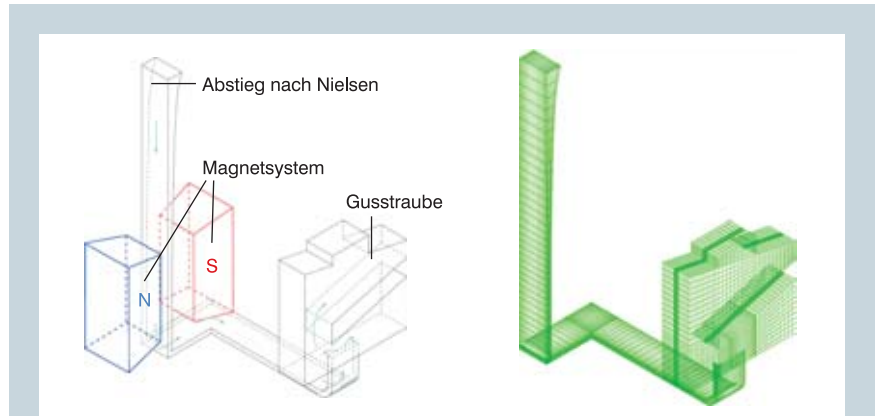


Bild 6: Skizze des 3-D-Modells der Probegeometrie und verwendetes Rechengitter

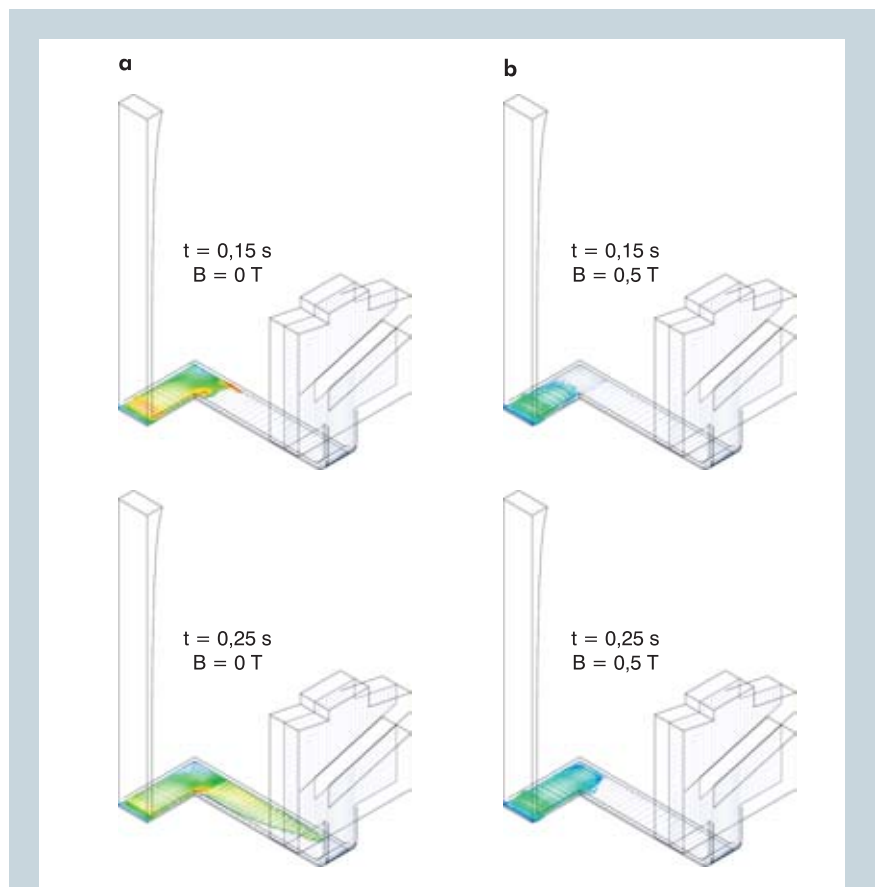


Bild 7: Geschwindigkeitsplots auf einer Schnittebene im horizontalen Kanal zu zwei verschiedenen Momenten des Füllvorganges zeigen deutlich die Bremswirkung des Magnetfeldes (b), die Farbe rot entspricht einer Geschwindigkeit von 1,25 m/s

der in der nachfolgend beschriebenen Form von der Firma Schüler Magnetik Dortmund gefertigt worden ist und in der Aluminium-Gießerei der Firma TITAL installiert und getestet wurde. Der Elektromagnet ist aus 4 Teilspulen aufgebaut, die mit Kunststoff vergossen sind und jeweils einen Bimetallschalter enthalten, um Überhitzungen zu vermeiden. Diese Teilspulen werden mit Hilfe von Kühlscheiben, bestehend aus Cu-Rohr, mit Wasser gekühlt. Um eine Temperatur-Dauerstandsfestigkeit von ca. 800 °C zu erreichen, kann auf den Polflächen zu deren Schutz eine spe-

zielle Keramikabschirmung (Dicke 8 mm) angebracht werden. Die Geometrie der Polschuhe kann flexibel gestaltet werden. Neben den hohen Temperaturen während des Gießens bestand ein weiteres Problem in der Beschränktheit des für die Installation des Elektromagneten zur Verfügung stehenden Platzes zwischen Schmelzofen und Gussform. Deshalb war eine höchstmögliche Kompaktheit der Spulenanordnung eine wesentliche Forderung. Dieses Magnetsystem erzeugt eine maximale Feldstärke von 1,1 T und erfüllt alle Kriterien seiner Auslegung.

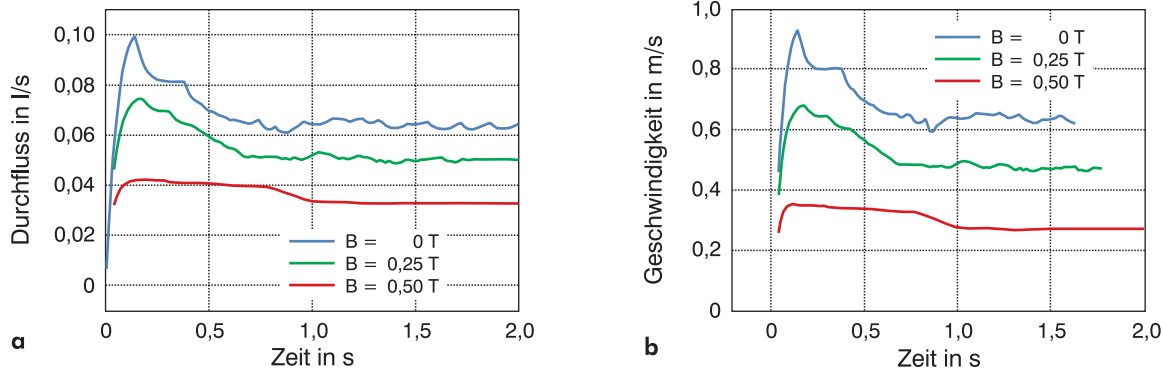


Bild 8: Durchfluss (a) und lokale Strömungsgeschwindigkeit (b) an einem Kontrollpunkt im Abstieg bei verschiedenen Feldstärken als Funktion der Zeit

Die Gießversuche erfolgten mit der Legierung EN AC-Al Si7Mg0,6 (A357). Es wurde sowohl mit offenen als auch mit geschlossenen, keramischen Formen bei einer Gusshöhe von 430 mm gearbeitet. Als geschlossene Formen werden in diesem Zusammenhang Formen mit integrierter Gusstraube bezeichnet. Der Gießprozess wird damit durch das Füllen der Traube terminiert. Die offenen Formen verfügen über keine Gusstraube. Im Anschluss an den vertikalen Abstieg und horizontalen Kanal fließt das Aluminium durch ein schräg nach oben geneigtes Austrittsrohr in ein Sandbett. Die Bestimmung der Austrittsweite erlaubt eine Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit der Strömung. Im Fall der geschlossenen Formen erhält man durch die Messung der Füllzeiten ein Maß für den Durchfluss gemittelt über den gesamten Füllvorgang. Die erstarrten Gussteile wurden auf Formfüllfehler hin untersucht.

Vor dem Füllvorgang werden die keramischen Formen in einem Ofen, wie beim Feinguss üblich, vorgeheizt. Die vorgeheizten Formen wurden dem Ofen entnommen und am Magnetsystem so positioniert, dass sich der untere Teil des Abstieges genau zwischen den Polschuhen befand. Die Befüllung der Trauben erfolgte mit konventionellen Gießlöffeln.

Bei den Versuchen mit den offenen Formen wurde die Austrittsweite x_m des flüssigen Strahls aus der Form vermessen und daraus die mittlere Geschwindigkeit der Schmelze v_0 abgeleitet. Eine drastische Verringerung der Austrittsweite mit steigendem Magnetfeld war bereits visuell zu beobachten. Wie die in **Tabelle 1** dokumentierten Daten zeigen, verringert sich die mittlere Geschwindigkeit bei einer Feldstärke $B = 1 \text{ T}$ um mehr als die Hälfte.

Bei den Experimenten mit den geschlossenen Formen wurde die Geometrie des

Tabelle 1: Gemessene Austrittsweiten und daraus berechnete mittlere Geschwindigkeiten bei Abgussversuchen mit offenen Formen

Magnetfeldstärke	x_m [m]	v_0 [m/s]
B = 0 T	0,50	2,25
B = 0,5 T	0,25	1,60
B = 1,0 T	0,10	1,00

Tabelle 2: Bewertung der Gussteile nach Schulnotensystem

(erste Note - visuelle Beurteilung, zweite Note - UV-Prüfung)

	0,0 T	0,25 T	0,5 T	0,75 T	0,75 T; 5 s
ROF	6-4	4-4	4-2	4-4	3-2
RMF	4-4	4-3	4-1	3-3	1-2
FOF	4-2	4-2	2-2	2-2	2-3
FMF	6-2	3-2	2-1	1-1	2-1

horizontalen Strömungskanals variiert und wahlweise ein Keramikfilter eingesetzt. Die entsprechenden Variationen eines flachen und runden Anschnittes (in der Kurzbezeichnung F bzw. R) jeweils mit (MF) und ohne (OF) Anwendung eines Keramikfilters wurden unter Anwendung verschiedener Magnetfelder (0; 0,25; 0,5; 0,75 und 0,75 Tesla nur für die ersten Sekunden des Gießens) gefüllt. Eine Bewertung der resultierenden Gussteile wurde durch eine visuelle Beurteilung der Gussoberfläche sowie durch eine UV-Prüfung und

eine Beurteilung der Referenz-Oberfläche der Probe vorgenommen (**Bild 9**).

Entsprechend einem Schulnotensystem wurden an jedes Gussteil eine Note für die visuelle Beurteilung und die UV-Prüfung vergeben. **Tabelle 2** zeigt den Vergleich der verschiedenen Gussteile.

Aus **Tabelle 2** lässt sich bereits eine klare Tendenz herauslesen: Der Magnetfedeinsatz verbessert offensichtlich die Qualität der Gussteile. Gleichzeitig ist zu sehen, dass neben dem Magnetfeld selbstverständlich auch die Geometrie oder das Vorhandensein eines Filters das Ergebnis beeinflussen. So ist beispielsweise die in den Varianten mit rundem Lauf zu erwartende Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des kleineren Kanalquerschnittes größer als in den Formen mit flachem Lauf. Folglich macht sich die Wirkung des Magnetfeldes in unseren Untersuchungen bei rundem Lauf erst bei höheren Intensitäten bemerkbar.

Die numerischen Rechnungen als auch die Modellexperimente haben bereits offenbart, dass die Maxima der Strömungsgeschwindigkeit ausschließlich in der Anfangsphase des Füllvorganges auftreten. Somit ist die Tendenz nicht unerwartet, dass eine Anwendung des Magnetfeldes nur während der ersten 5 s des Abgusses ausreichend für die gewünschte Verbesserung des Oxideintrages in das Gussteil ist. Entsprechend den eingangs dargelegten Vorstellungen hinsichtlich des Oxideintrages in das Gussteil während des Formfüllens kommt es vor allen Dingen darauf an, die Geschwindigkeitsspitzen grundsätzlich zu vermeiden. Die Anwendung des Magnetfeldes während der gesamten Dauer des Füllvorganges liefert in der Tendenz keine weitere Verbesserung der Gussteilqualität mehr, verzögert aber unter Umständen den Gießprozess unnötigerweise.

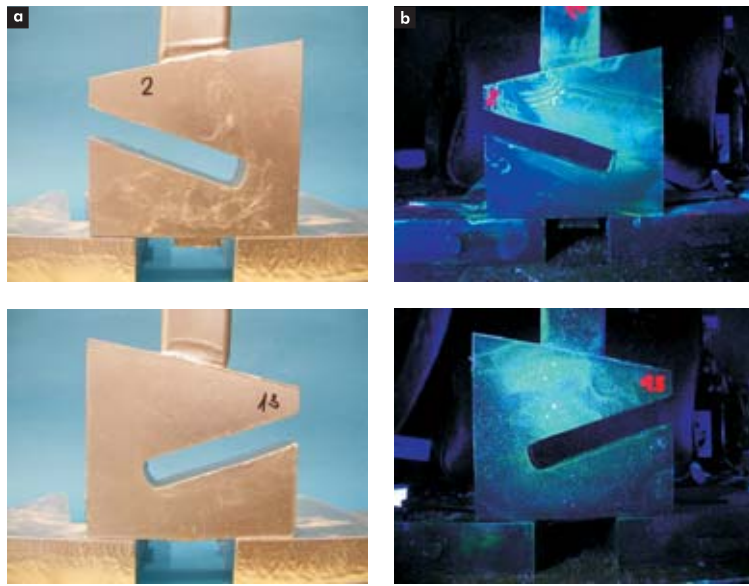


Bild 9: Fotos der Gussoberfläche (a) und UV-Bilder (b) der Füllproben. Oben: Flacher Lauf mit Filter (FMF), B=0; Unten: Flacher Lauf mit Filter (FMF), B=0,5 T.

Zusammenfassung

Ein stationäres, transversales Magnetfeld ist geeignet, die Strömung einer Metallschmelze während des Formfüllens beim Gießen deutlich abzubremsen. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag geleistet, um den Eintrag von Oxiden, mit ihren typischen Erscheinungsformen als „Oxide-Lap“ oder „internal Oxide“, in das Innere des Gussteils zu vermeiden und damit ein „gesundes“ Gussgefüge auszubilden, welches sich durch hervorragende, mechanische Eigenschaften auszeichnet.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation im Zusammenhang mit den Modellexperimenten im Labormaßstab mit GaInSn erwiesen sich als wesentlich für das Verständnis der Strömungsvorgänge beim Füllen. Mit Hilfe des Ultraschall-Doppler-Messverfahrens konnte der zeitliche Verlauf der Füllgeschwindigkeit quantifiziert und die örtliche Position der Geschwindigkeitsmaxima in der Form sowie der Zeitpunkt ihres Auftretens ermittelt werden. Außerdem zeigten die Messungen den positiven Effekt des Magnetfeldes im Hinblick auf die wirkungsvolle Dämpfung der turbulenten Schwankungen in der Bewegung der Schmelze und einer Verringerung von Gaseinschlüssen in den Strömungsquerschnitten. Anhand der vorliegenden experimentellen Datenbasis konnte eine Validierung der numerischen Rechnungen vorgenommen werden. Mit Hilfe der Numerik wurden Prognosen für den realen Prozess mit der Legierung A357 erstellt und wesentliche Parameter des Prototypsystems einer Magnetbremse ermittelt.

Die Abgussversuche unter industriellen Bedingungen bestätigten eindrucksvoll die numerischen Vorhersagen und die Laborexperimente. Auch beim Aluminiumguss wurde die deutliche Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit durch Anwendung der Magnetbremse nachgewiesen. Ganz klar trat die Tendenz zu Tage, dass sich die Beschaffenheit der Gussteile im Ergebnis des Magnetfeldeinsatzes generell verbessert.

Diese Resultate müssen in weiterführenden Arbeiten auch unter Anwendung weiterer Auswertemethoden (Fehlercharakterisierungen, Analyse der mechanischen Eigenschaften) noch spezifiziert und statistisch abgesichert werden. In diesem Zusammenhang ist es auch nicht unwesentlich, darauf hinzuweisen, dass in keinem der hier untersuchten Fälle das Magnetfeld erkennbare Verschlechterungen der Qualität der Gussteile verursachte.

Besonders effektiv ist die Vorgehensweise, das Magnetfeld nur in der Anfangsphase des Formfüllens einzusetzen. Diese auf wenige Sekunden beschränkte Wirkdauer spart Energie und hat keine praktischen Konsequenzen für die Dauer des Füllvorganges.

Dr.-Ing. Sven Eckert, Dr. rer. nat. Vladimir Galindo, Dr. rer. nat. Gunter Gerbeth, Dipl.-Ing. Willy Witke, Forschungszentrum Rossendorf, Dresden; Dipl.-Ing. Ralf Gerke-Cantow, Dipl.-Ing. Hans-Peter Nicolai, Dipl.-Ing. Ulrich Steinrücken, Titan-Aluminium-Feingieß GmbH, Bestwig

Danksagung:

Das Forschungsvorhaben war Teil des vom VDG Düsseldorf betreuten und vom BMBF, Projektträger Umweltforschung und -technik Bonn, geförderten Projektverbundes „In-Guss“ im Förderprogramm „Integrierter Umweltschutz in der Gießereiindustrie“. Die Autoren bedanken sich bei beiden Institutionen für die wohlwollende Unterstützung der Arbeiten.

Literatur:

- [1] Campbell, J.: *The revolution in casting production*, ALFED Light Alloy Conference, Northampton 1998.
- [2] *Giesserei* 91 (2004) Nr. 1, S. 76-80.
- [3] *Giesserei-Forschung* 26 (1974) Nr. 4, S. 133-146.
- [4] Willers, B.; Eckert, S.; Michel, U.; Zouhar, G.: *Effect of fluid convection driven by a rotating magnetic field on the solidification of SnPb alloys*. In: „Solidification and Crystallization“. D. Herlach (Ed.), Wiley-VCH GmbH.
- [5] *Nucl. Eng. Design* 126 (1991), S. 277-284.
- [6] Eckert, S.; Gerbeth, G.: *Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry*, *Exp. Fluids* 32 (2002), S. 542-546.
- [7] Eckert, S.; Gerbeth, G.; Melnikov, V.I.: *Velocity measurements at high temperatures by ultrasound Doppler velocimetry using an acoustic wave guide*, *Exp. Fluids* 35 (2003), S. 381-388.

