

GIESSEN

Vermeidung von Gussfehlern und Prognose von Eigenschaften durch Modellierung

Michael Hilbinger, Johannes Köpf, Andreas Lohmüller, Martin Scharrer,
Mark Hartmann, Robert F. Singer

Neue Materialien Fürth GmbH (NMF), Dr.-Mack Strasse 81, D-90762 Fürth/Bay.

Einleitung

Für die Auslegung von Bauteilen ist die Kenntnis der Verteilung der Gussfehler und der damit verbundenen mechanischen Eigenschaften vor allem im Leichtbau von zentraler Bedeutung. Der Modellierung der Herstellungsprozesse und der Ableitung der daraus resultierenden Bauteileigenschaften mit Hilfe numerischer Verfahren wird deshalb zunehmend Aufmerksamkeit gewidmet.

Die Ausbildung der Mikrostruktur und das Auftreten von Fehlern, die sich auf die Erstarrung zurückführen lassen, wie z.B. Mikroporosität, kann relativ gut prognostiziert werden [1]. Vor allem für füllbedingte Fehler wie Gasporosität, Kaltfließstellen und Oxidhäute besteht jedoch noch deutlicher Forschungsbedarf, da das Entstehen dieser Defekte durch ein Zusammenwirken von Füllung und Erstarrung bzw. Reaktion mit der Umgebung naturgemäß komplexer ist.

Im Nachfolgenden soll anhand von zwei Bauteiluntersuchungen mit dem Schwerpunkt der Formfüllung die Leistungsfähigkeit numerischer Verfahren aufgezeigt werden. Das angewandte Herstellungsverfahren ist das Thixospritzgießen, betrachteter Werkstoff ist die Magnesiumlegierung AZ91.

Beim Thixospritzgießen werden Magnesiumlegierungen im teilflüssigen Zustand verarbeitet. Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus, die eingehend in [2] beschrieben sind. Da die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung angewandten Festphasengehalte gering sind, können die nachfolgenden Erkenntnisse ebenso auf den Druckguss übertragen werden.

Mechanische Eigenschaften von Gussteilen

Die Herstellung von Bauteilen durch Gießen lässt sich betrachten als die Füllung einer Form mit flüssiger metallischer Schmelze und anschließende Erstarrung. Sowohl beim Druckgießen von Leichtmetallen als auch dem Thixospritzgießen von Magnesium erfolgt die Formfüllung sehr rasch und die Geschwindigkeiten des einströmenden flüssigen Metalls sind im Anschnitt sehr hoch. So werden im Druckguss Teile aus Magnesium für Anschnittgeschwindigkeiten von 40 bis 80 m/s [3] ausgelegt. Durch die turbulente Formfüllung, die mit dem Einspülen von Gasen verbunden ist, und die Volumenschrumpfung entsteht Porosität im Bauteil. Reaktionen mit Luft können zu Oxidhäuten führen. Kaltfließstellen lassen sich auf das Erkalten des Materials bereits während der Füllung und der

mangelhaften Verbindung anschließend aufeinanderprallender Füllfronten zurückführen [4].

Diese Gussfehler bestimmen neben der Mikrostruktur der Legierung maßgeblich die mechanischen Eigenschaften [5]. So steht beispielweise die Wechselfestigkeit in direktem Bezug zu den Defekten [6], die beim Gießen entstanden sind, da Ermüdungsrisse vornehmlich an Poren initiiert werden [7]. Das Einspülen der Gase in der Füllphase führt dabei zu deutlich reduzierten dynamischen Eigenschaften, wenn man die Ergebnisse in [8] für herkömmlichen Druckguss im Vergleich mit anderen Verfahren betrachtet. Aber auch die statischen Eigenschaften werden durch Gussfehler beeinflusst. So wird in [9] eine Abnahme der mechanischen Festigkeiten von Druckgussteilen beobachtet, die neben der Mikrostruktur auf zunehmendes Porenvolumen zurückgeführt wird.

Die mechanischen Eigenschaften von Gussteilen und -legierungen werden auch mit der Fließlänge des Materiales in Zusammenhang gebracht. So ist in [10] die Abnahme der Bruchdehnung mit zunehmender Fließlänge des Materials in Magnesium-Druckgussbauteilen beschrieben. In der Untersuchung des Fließvermögens anhand eines mäandrierenden Fließkanals in [11, 12] wird eine fehlerbehaftete Endzone beobachtet und die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der zurückgelegten Fließlängen gezeigt. Beim Druckgießen von z.B. der Magnesiumlegierung AZ91HP ergibt sich dabei ein Maximum der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung bei mittleren Fließlängen [11].

Vorgehensweise

Zunächst soll ein einfaches Bauteil (Stufenplatte) untersucht werden. Im Anschluss daran wird ein komplexerer Prototyp, das Ölpumpengehäuse eines Motorrades untersucht. Diese Geometrie wird derzeit in Serie für das Motorrad R1200 GS von BMW im Druckguss hergestellt. Die Wandstärken des Bauteiles liegen im Bereich von 2.0 bis 5.0 mm (siehe Abb.1)

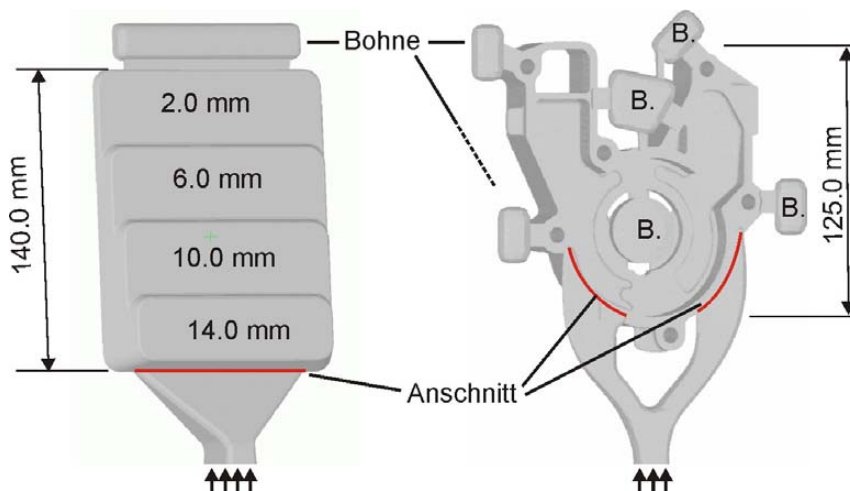


Abb. 1: Im Rahmen dieser Untersuchung betrachtete Geometrien. Links: Stufenplatte; rechts: Ölpumpengehäuse

Die Untersuchung der Stufenplatte erfolgt als reine Füllberechnung ohne Berücksichtigung der thermischen Vorgänge. Für das Ölpumpengehäuse wird eine kombinierte Analyse der thermischen und strömungstechnischen Vorgänge durchgeführt. Als Berechnungsplattform wird das FEM-System ProCast 2004R1 eingesetzt. Die Berechnungen erfolgen auf Tetraedergittern und die räumliche Auflösung beträgt 1,5 mm (Stufenplatte) bzw. 1,0 mm (Ölpumpengehäuse). Die Gesamtzahl der mathematischen Stützstellen beträgt 89.291 bzw. 106.403, die Anzahl der Elemente liegt bei 459.801 bzw. 460.600.

Als Werkstoff kommt die Magnesiumlegierung AZ91 zur Anwendung. Das Material strömt mit einer mittleren Geschwindigkeit von 20 m/s bei einer Temperatur von 590°C an der Düse in die Form. Der Festphasenanteil beträgt 10-15%. Die Temperatur der Form ist 200°C. Als Wärmeübergangskoeffizient wird in Anlehnung an [13, 14] ein Wert von 5000 W/m²K zwischen dem Bauteil und der Form angenommen.

In der Berechnung wird insbesondere auf die zeitliche Entwicklung der Strömung geachtet. Um die numerische Diffusion niedrig zu halten, ist es notwendig einen sehr geringen Courant-Wert zu verwenden [15], der in einer hohen Gesamtzahl an durchgeführten Berechnungsschritten resultiert. Die Stufenplatte benötigt bis zur vollständigen Füllung rund 3500 Zeitschritte, das Ölpumpengehäuse 6000.

Die Auswertung der Formfüllberechnungen zur Bestimmung füllbedingter Fehler und Ableitung mechanischer Eigenschaften erfolgt zum einen nach der Bestimmung des Ortes der letzten Füllung und der Bestimmung des zurückgelegten Weges des Materiales. Für die Bestimmung der Fließlängen wird das Postprocessing-Tool **FlowViz** verwendet. Dieses Werkzeug ist eine Entwicklung der NMF GmbH, das für die Bewertung strömungsmechanischer Berechnungen die Bestimmung von Stromlinien und Bahnlinien und deren Auswertung durchführt. Eine Bahnlinie gibt den tatsächlichen Transportweg der Schmelze an. Strömungsberechnungen, die auf dem Euler'schen Ansatz basieren liefern hingegen nur stationäre Vektorfelder.

In Hinblick auf die Gießsimulation kann mit Bahnlinien das Füllmuster des Bauteiles bestimmt werden. Für jeden Materialbereich des Gussteiles lässt sich der Fließweg vom Anguss bis zur aktuellen Position und auch das Alter der Schmelze bestimmen. Die Bahnlinien können in Analogie zu den experimentellen Beobachtungen hinsichtlich ihrer Länge, d.h. der Fließlänge, ausgewertet werden. Diese bilden die Grundlage für eine statistische Auswertung, die am Beispiel der Stufenplatte dargestellt wird.

Von experimenteller Seite werden für beide Geometrien Teilfüllungen zur Absicherung der numerisch gewonnenen Erkenntnisse herangezogen. Aus der Stufenplatte werden Zugproben entnommen, deren Porosität und Bruchdehnung ermittelt wird. Die Geometrie der Zugproben variiert dabei entsprechend der Dicke der Stufe um die Gusshaut nicht abzutragen und entspricht damit nicht der Norm. Zum Nachweis gießbedingter Fehler wird das Ölpumpengehäuse mittels Röntgendurchstrahlprüfung untersucht.

Herstellung einer Stufenplatte

Für die Stufenplatte ergibt sich die in Abb. 2 dargestellte Füllsequenz. Das Material strömt durch den Fächeranschnitt auf der flachen Seite der Kavität in die Form. Der Gießstrahl wird dabei aufgeweitet. Durch die Begrenzung der Kavität wird das Auseinanderstreben der Schmelze begrenzt und das Material an den Seitenwänden nach oben und zur Mitte hin geleitet (siehe Füllgrade 43.1, 59.7 und 67.0%). Zur Herleitung des Strömungsbildes kann man sich an dieser Stelle einen Fächer vorstellen, dessen Seitenbereiche „eingeklappt“ werden. Durch diese Schmelzeführung entsteht bei hohen Füllgraden (78.8, 88.2%) eine Sekundärströmung in der Bauteilmitte. Die Strömung erfolgt dabei von oben nach unten, entgegen dem füllenden Gießstrahl. Der Ort der letzten Füllung liegt in der untersten Stufe des Bauteiles.

Abb. 3 gibt den Vergleich der numerischen Ergebnisse mit einer Teilfüllung der Kavität wieder, der eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse dokumentiert. Deutlich ist auch an der Teilfüllung die Ausbildung der Sekundärströmung in der Bauteilmitte zu erkennen. In der Simulation, wie auch im Experiment, strömt die Schmelze entlang der Außenkontur der Kavität, die sich besonders in der Schnittdarstellung zeigt.

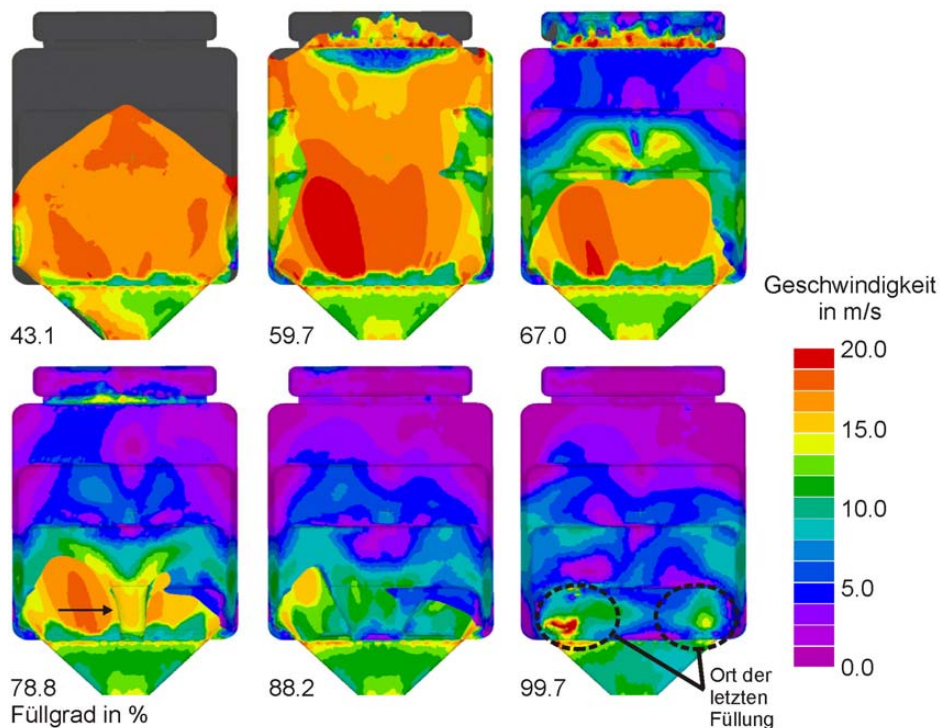


Abb.2: Füllstadien der Stufenplatte zu verschiedene Füllgraden. In der Mitte des Bauteils bildet sich eine Sekundärströmung in Gegenrichtung aus

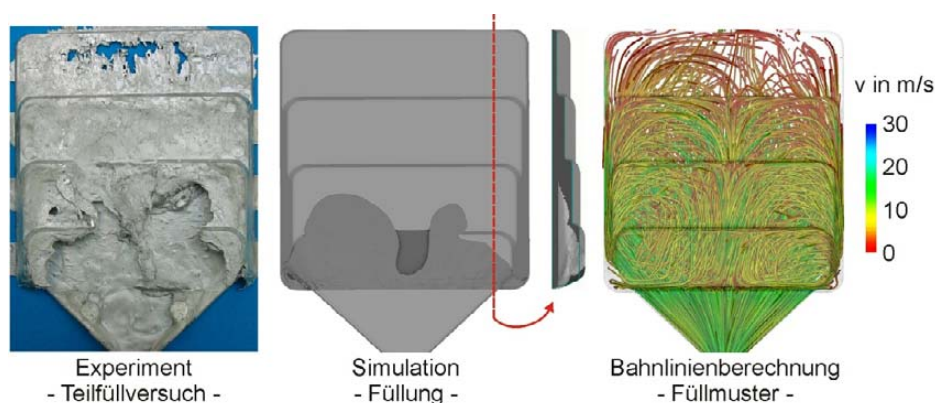


Abb.3: Vergleich der Ergebnisse von Teilfüllversuchen mit den numerischen Ergebnissen und Darstellung des Füllmusters. Deutlich ist die Ausbildung der Sekundärströmung in der Bauteilmitte zu erkennen.

Abweichungen zwischen Berechnung und Experiment sind im Bereich der 2.0 mm-Stufe zu erkennen. Die unvollständige Formfüllung dort ist in der Simulation nicht zu erkennen. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass es sich um eine reine Berechnung der Füllung handelt und in dünnwandigen Bereichen die thermischen Vorgänge nicht vernachlässigt werden können.

Neben den Füllstadien ist in Abb. 3 das Ergebnis einer Bahnlinienberechnung dargestellt. Die Bahnlinien entsprechen den Transportwegen der Schmelze und geben das Füllmuster der Geometrie wieder. Die Farbe der Linien indiziert die Geschwindigkeit der Schmelze. Es zeigt sich, dass die Füllung der Stufen im unteren Bauteilbereich unter dem Einfluss der Sekundärströme von oben und von den Seiten stattfindet. Dabei treten Verwirbelungen auf, die Gussfehler zur Folge haben können.

Die Verteilung der mit Hilfe des Postprocessing-Tools **FlowViz** ermittelten Fließlängen ist in Abb. 4 wiedergegeben. Die Anzahl der ermittelten Werte liegt bei dieser Geometrie bei ca. 25.000. Am Anschnitt liegen erwartungsgemäß die geringsten Fließlängen vor, das Material legt hier nur den direkten Weg von der Düse zurück. Im Bauteil sind die Fließlängen größer und es zeichnet sich das Strömungsbild der Füllung ab. Dabei treten Werte bis zu 450 mm auf. Die zuvor beobachtete Sekundärströmung erzeugt diese hohen Fließlängen (dunkelblaue Bereiche) vor allem im unteren Bauteilbereich, im Bereich der „letzten Füllung“.

Die Auswertung der berechneten Fließlängen in den einzelnen Stufen zeigt Abb. 5. Dabei werden für die Bereiche der Messlängen der Zugproben die Werte aus der in Abb. 4 dargestellten Verteilung extrahiert. In dieser Auswertung sind für eine Stufendicke von 14.0 mm ca. 900 für eine Dicke von 2.0 mm ca. 400 Werte berücksichtigt.

Für die einzelnen Proben (siehe Abb. 6) zeigen sich für die unterschiedlichen Stufendicken abweichende Streuungen der Fließlängen bei gleichbleibender mittlerer Fließlänge im betrachteten Volumen. Mit zunehmender Dicke der Stufe nimmt die Streubreite der Werte zu. Eine hohe Streubreite kann mit einer starken Verwirbelung und Durchmischung des Materiales gleichgesetzt werden.

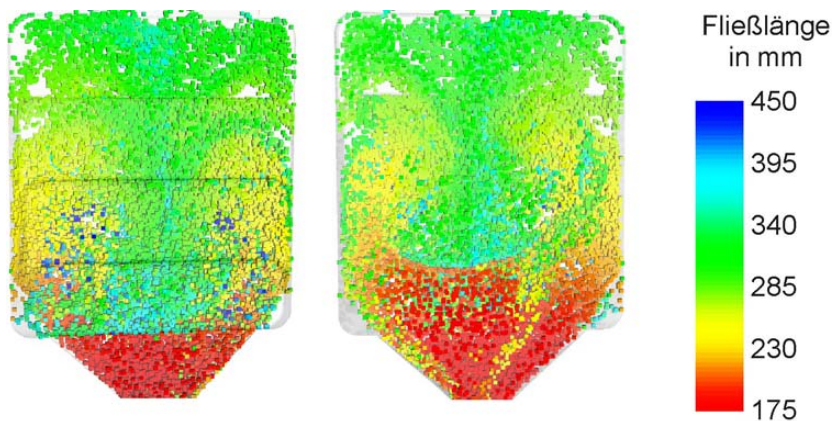


Abb. 4: Fließlängenverteilung des Materials in der Stufenplatte. Die zuvor beobachtete Sekundärströmung erzeugt hohe Fließlängen (dunkelblaue Bereiche) vor allem im unteren Bauteilbereich.

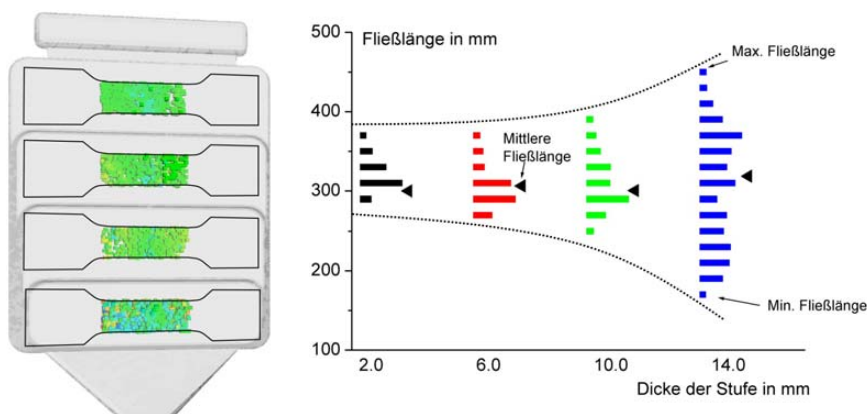


Abb. 5: Auswertung der Fließlängenverteilung in den Messbereichen. Links: Berücksichtigte Werte in den Messlängen; rechts: Fließlängenverteilung in den Messbereichen in Abhängigkeit von der Dicke der Stufe. Die Streubreite nimmt mit der Dicke der Stufe zu.

Im Vergleich hierzu liefert die experimentelle Untersuchung der Proben die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse. Das Porenvolumen nimmt für den behandelten Parametersatz mit zunehmender Dicke der Stufe zu. Hierfür ist neben der Lunkerung ein deutlich zunehmender Anteil an eingespülten Gasen verantwortlich. Die beobachteten Bruchdehnungen entsprechen den für im Druckguss von AZ91 üblichen Werten [16].

Man kann für Proben 6.0, 10.0 und 14.0 mm mit zunehmender Wandstärke eine Abnahme der Bruchdehnung beobachten, die mit der zunehmenden Porosität korreliert werden kann. Die Bruchdehnung der 2.0 mm Stufe liegt unerwartet niedrig, die möglicherweise auf die Bildung von Kaltfließstellen zurückzuführen ist.

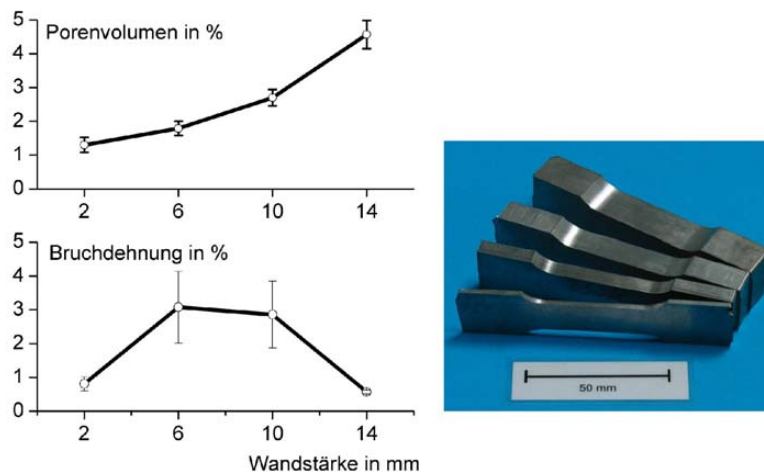


Abb. 6: Links: Abhängigkeit des Porenvolumens und der Bruchdehnung von der Wandstärke der Zugproben der Stufenplatte. Rechts: Verwendete Zugprobengeometrie

Herstellung eines Ölpumpengehäuses

Die Füllung des Ölpumpengehäuses ist auf Grund seiner Geometrie wesentlich komplexer. In Abb. 7 ist eine Füllsequenz dargestellt. Die Füllung verläuft an den Seiten nach oben, von dort zur Mitte und im Anschluss daran in Gegenrichtung nach unten. Der Ort der letzten Füllung liegt unten in der Mitte. Die bei der Füllung der Bauteilmitte auftretenden Geschwindigkeiten sind gering. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieser Bauteilbereich nicht direkt angeschnitten ist und die Füllung indirekt über die Außenwandung erfolgt. Hohe Geschwindigkeiten können im Anguss und entlang den Seiten beobachtet werden.

Deutlich ist in Abb. 8 die Abkühlung der Schmelze mit zunehmendem Füllgrad zu erkennen. Je länger die Füllung dauert, desto mehr Wärme kann in die Form abgeführt werden. Dies zeigt sich z.B. deutlich an den Kanten des Gehäuses.

Bei genauerer Betrachtung lässt sich feststellen, dass im Bereich der Bauteilmitte, unten bereits in einem frühen Stadium Material hineinspritzt (Füllgrad 55.0 %, siehe Pfeile). Die eigentliche Füllung erfolgt an dieser Stelle jedoch sehr spät, so dass das isolierte Material zunächst abkühlt. In diesen Bauteilbereichen entstehen mit hoher Wahrscheinlichkeit Kaltfließstellen, da das Material durch die fortgeschrittene Abkühlung keine vollständig stoffschlüssige Verbindung ausbilden kann.

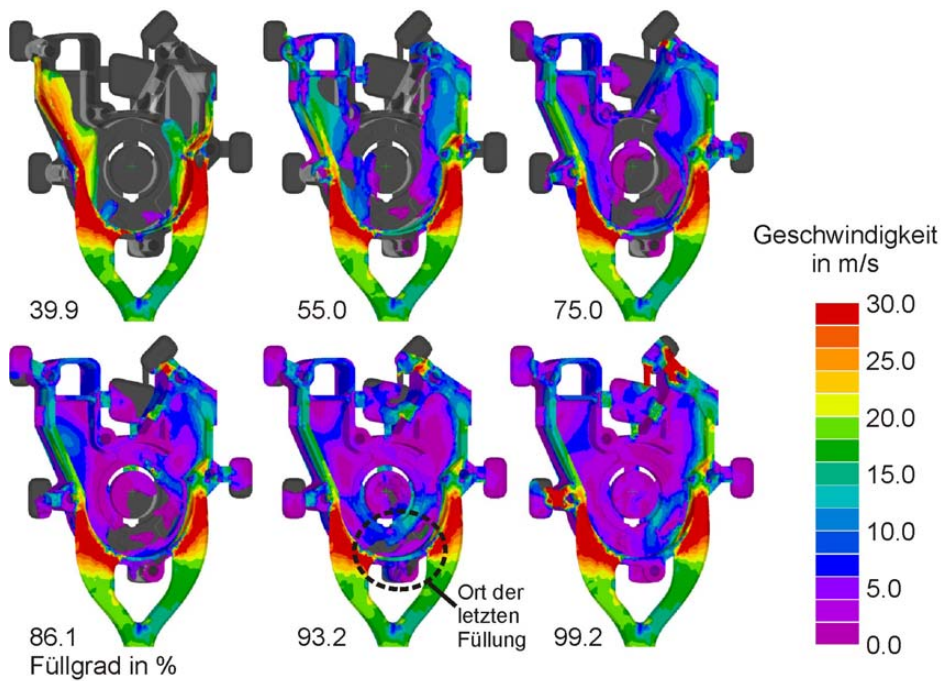


Abb. 7: Formfüllung des Ölpumpengehäuses. Darstellung der Füllsequenz und der Geschwindigkeitsverteilung. Im zentralen Bereich liegen geringe Geschwindigkeiten vor.

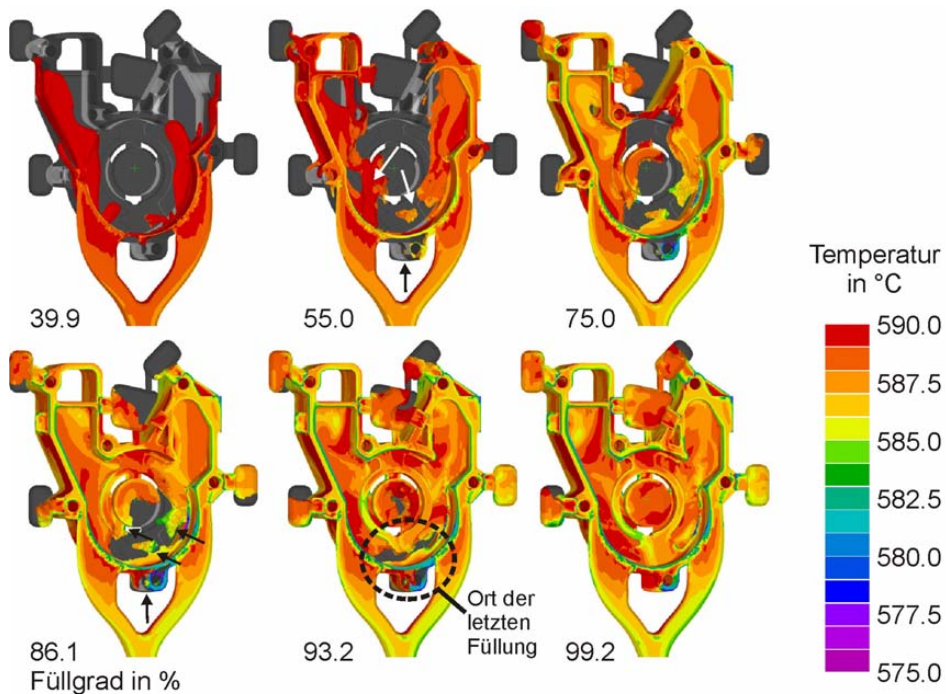


Abb. 8: Formfüllung des Ölpumpengehäuses. Darstellung der Füllsequenz und der Temperaturverteilung. Im Bereich der „letzten Füllung“ (gestrichelter Kreis) ist die Bildung von Kaltfließstellen sehr wahrscheinlich.

Der Vergleich der Teilfüllungen mit den Berechnungsergebnis in Abb. 9 dokumentiert die gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem tatsächlichen Füllverlauf. Für den Vergleich wird in der Simulation ein höherer Füllgrad verwendet, da sich im Experiment die Schmelze auf Grund der Trägheit weiterbewegt, obwohl der Kolben bereits gestoppt ist. Im Experiment, wie auch in der Berechnung kann das gleiche Füllmuster beobachtet werden. Die Schmelze strömt vornehmlich entlang der Seiten in die Kavität. Die Schmelze spritzt dabei in die Bauteilmitte, die aber zunächst ungefüllt bleibt.

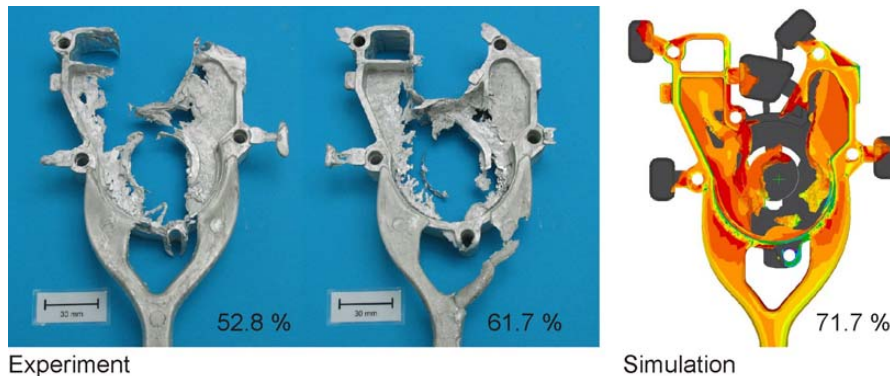


Abb. 9: Vergleich von Teilfüllungen mit den Berechnungsergebnis. Die Schmelze strömt vornehmlich entlang der Seiten in die Kavität.

Die Bahnlinienberechnung liefert das Füllmuster für die Geometrie des Ölumpengehäuses und ist in Abb. 10 dargestellt. Sehr gut ist das „Durchschießen“ der Schmelze an den Anschnitten mit hoher Geschwindigkeit (blaue Bereiche) in die Außenkontur des Bauteiles zu erkennen. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass die Füllung vornehmlich über die angeschnittene Seite des Bauteiles erfolgt.

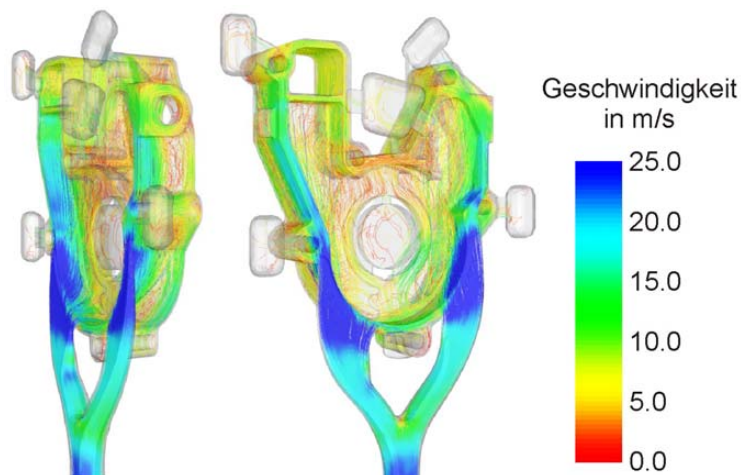


Abb.10: Füllmuster des Ölumpengehäuses. Das Material schießt an den Seiten mit hoher Geschwindigkeit (Blaue Bereiche) in die Kavität.

Die Auswertung der Bahnlinien liefert das in Abb. 11 dargestellte Ergebnis. Neben der Verteilung der Fließlänge ist in dieser Untersuchung auch die Eintrittszeit in die Kavität dargestellt. Je früher die Eintrittszeit, desto „älter“ ist das Material.

Die längsten Fließwege treten im Bereich der Bauteilmitte, oben auf. Dort ist auch das „älteste“ Material zu beobachten. Führt man dieses Ergebnis mit den Beobachtungen der Literatur zusammen, so kann man davon ausgehen, dass hier schlechtere mechanische Eigenschaften vorliegen. Auch im Bereich unter der zentralen Bohne ist stellenweise das Alter der Schmelze sehr hoch. Dies ist auf die bereits in der Füllsequenz beobachteten Spritzer zurückzuführen.

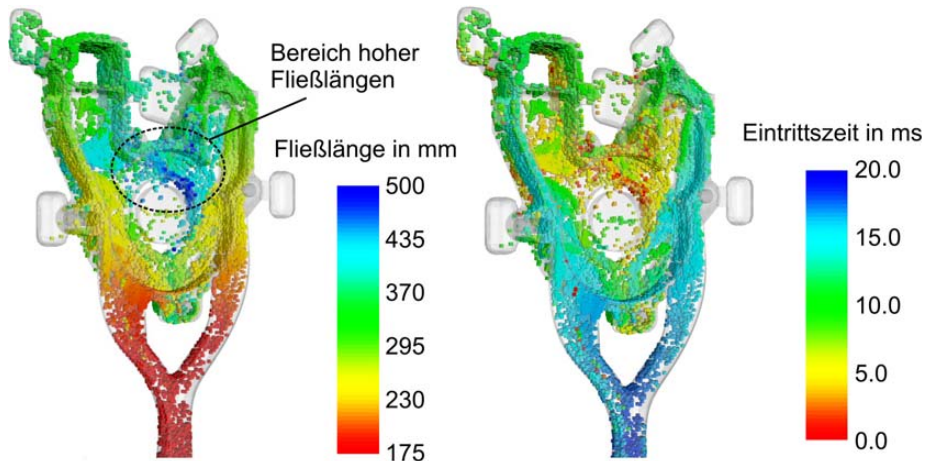


Abb.11: Fließlängenverteilung des Ölpumpengehäuses. Die längste Fließwege liegen in der Mitte oben vor.

Die experimentelle Untersuchung des Ölpumpengehäuses mittels Röntgenstrahlung zeigt die in Abb. 12 wiedergegebene Fehlerstellen. Vornehmlich der zentrale Bereich des Gehäuses stand dabei im Mittelpunkt der Untersuchung, da hier die Bildung erstarrungsbedingter Gussfehler wie z.B. Lunker auf Grund der relativ geringen Wandstärken nahezu vollständig ausgeschlossen werden kann. Die Gießfehler liegen in Form von Gasporosität und Kaltfließstellen vor. Vor allem im unteren Bereich des Bauteiles ist dies der Fall. Deutlich sind Kaltfließstellen an ihrer langgestreckten Form zu erkennen. Aber auch oberhalb der zentralen Bohne kann Porosität, wenn auch in geringerem Umfang, beobachtet werden.

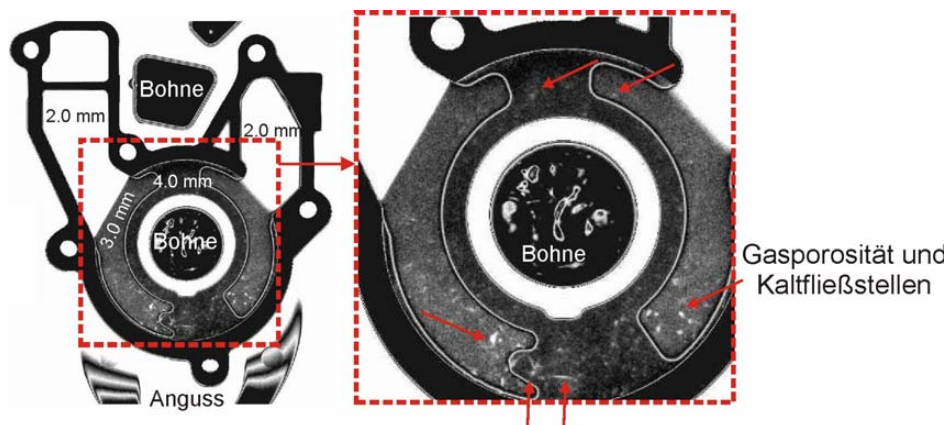


Abb. 12: Röntgenaufnahme des Ölpumpengehäuses mit Vergrößerung des zentralen Bereiches. Deutlich sind füllbedingte Fehler am Ort der letzten Füllung zu erkennen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung zeigt am Beispiel von zwei Geometrien erfolgreich den Einsatz der Prozesssimulation für die Herstellung von gegossenen Komponenten. Für die Geometrie der Stufenplatte und für den Prototypen Ölpumpengehäuse liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnissen und experimentellen Beobachtungen vor. Die Entstehung von Gussfehlern, wie z.B. von Kaltfließstellen, die bereits in der Füllphase gebildet werden, können in der Berechnung nachgewiesen werden. Die Modellierung kann damit einen sinnvollen Beitrag für die Auslegung von Bauteilen, Werkzeugen und Formen liefern.

Bezugnehmend auf die mechanischen Eigenschaften von Gussteilen wird die Auswertung zusätzlicher Größen, wie z.B. der Fließlänge und der Eintrittszeit vorgeschlagen, die bisher in Standardprogrammen der Gießsimulation nicht zur Verfügung stehen. Mit Hilfe des Auswerteprogrammes **FlowViz** kann die Fließlänge und die Eintrittszeit des Materiales ermittelt und hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ausgewertet werden.

Am Beispiel der Stufenplatte ist eine Zusammenführung experimenteller und numerischer Ergebnisse gelungen. Für dieses relativ dickwandige Bauteil korreliert die Streubreite der Fließlängen, die als Maß für die auftretenden Verwirbelungen interpretiert wird, mit der auftretenden Gasporosität.

Am Beispiel des Ölpumpengehäuses, das dünnwandiger ist zeigen sich Bereiche mit lokal sehr unterschiedlichen Fließlängen, die qualitativ auf eine Verteilung der mechanischen Eigenschaften schließen lassen. Für eine eindeutige Korrelation sind an dieser Stelle jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig.

Literatur

[1] Todte, M., Stroppe, H. und Ch. Honsel, „Prognose der mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gussteilen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses“, Giesserei-Praxis, 6/2003, Seite 263-269

[2] Lohmüller, A., Scharrer, M., Jennings, R., Hilbinger, M., Hartmann, M., Singer, R.F.; In: Kainer, K. U. (Hrsg.): 6th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg, 18.-20. November 2003, Wiley-VCH (2003), S. 738 – 743

[3] Brunnhuber, E. „Praxis der Druckgussfertigung“, Schiele & Schöne, Berlin, 1991

[4] Hasse, S., „Guß- und Gefügefehler: Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guß- und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten“, Schiele & Schön, Berlin, 1999

[5] Campbell, J., „Castings“, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991

[6] Mouquet, O. „Einfluß von Gußfehlern auf die Dauerfestigkeit“, Giesserei-Praxis, 8/2004, Seite 293- 300

- [7] Mayer, H. et al., „Influence of porosity on the fatigue limit of die casting magnesium and aluminium alloys“, International Journal of Fatigue, 25, 2003, Seite 245 - 256
- [8] Kammer, C., „Magnesium Taschenbuch“, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [9] Schindelbacher, G. und R.Rösch, „Mechanical properties of Magnesium die casting alloys at elevated temperatures and microstructure in dependence of wall thickness“, in: Mordike, B.L. und K.U. Kainer (eds.), „Magnesium Alloys and their Applications“, Papers presented at the Conference, April 28-30, 1998, Wolfburg, Germany
- [10] Siedersleben, M., „Vakuum-Druckguß von Magnesiumlegierungen für hochbelastete Bauteile“, in: Kainer, K.U. (Hrsg.), „Magnesium – Eigenschaften, Anwendungen, Potenziale“, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, Seite 48 - 58
- [11] Klein, F., „Fließigenschaften der Magnesiumdruckgusslegierungen AZ91 HP, AM20 und AM50“, Aalener Gießereisymposium 15, Aalen, 1994, Seite 1 - 19
- [12] Dette, M. und A. Keßler, „Mechanische Eigenschaften und Fließvermögen von Magnesiumgusslegierungen hinsichtlich Ihrer Wanddickenabhängigkeit im Sand- und Druckgießverfahren“, Gießerei-Praxis, Nr. 13/14, 1997, Seite 288 - 296
- [13] Ho, K. und R. Pehlke, „Metal-Mold Interfacial Heat Transfer“, Metallurgical Transactions B, Vol. 16B, Sept. 1985, Seite 585-594
- [14] Hasse, S., „Taschenbuch der Gießerei-Praxis“, Schiele & Schön, Berlin, 2001, Seite 75
- [15] Ferziger, J.H. und M. Peric, „Computational Methods for Fluid Dynamics“, Springer, Berlin, 2002
- [16] Andreas Stihl AG & Co KG.; „Kompetenz in Magnesium Druckguss“, Firmenbroschüre, 2002