

# Entwicklungen für das Magnesiumspritzgießen

Die Neue Materialien Fürth GmbH (NMF) ist ein Forschungs- und Entwicklungsdienstleister mit langjähriger Erfahrung im Magnesiumspritzgießen und arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung des Verfahrens. Der vorliegende Beitrag stellt den aktuellen Stand der Technik vor und demonstriert die Vorteile des Magnesiumspritzgießens im Hinblick auf Bauteilqualität und Wirtschaftlichkeit. An Hand von Demonstratorbauteilen und Prototypen werden Entwicklungen der NMF zur Formauslegung, Heißkanaltechnik und Partikelverstärkung vorgestellt.

## Developments for Magnesium Injection Molding (Thixomolding®)

The Neue Materialien Fürth GmbH (NMF) focuses on the development of innovative process technologies with long-standing experience in Magnesium Injection Molding (Thixomolding®) and advancement of the technology. The present contribution introduces the present state of the technology and demonstrates advantages of Magnesium Injection Molding with regard to component quality and economic efficiency. Developments of the NMF concerning mold layout, hotrunner technology and particle reinforcement are presented.

### Magnesiumspritzgießen: Stand der Technik

Im Vergleich zum klassischen Druckguss ist das Magnesiumspritzgießen (Thixomolding®) noch eine vergleichsweise neue Technik. Die Maschinen sind in ihrem Aufbau dabei sehr ähnlich einer Kunststoffspritzgießmaschine (siehe Bild 1). Als Vormaterial wird Magnesiumgranulat verwendet, das während des Transports im Zylinder in den teilflüssigen oder vollflüssigen Bereich aufgeheizt wird. Durch eine horizontale Bewegung der Schnecke wird die Schmelze in das Werkzeug eingespritzt. Die Kolbengeschwindigkeiten liegen mit bis zu 6 m/s in einem ähnlichen Bereich wie beim Druckguss [1].

Gegenüber dem Druckguss hat Magnesiumspritzgießen eine Reihe von Vorteilen. So liegt die Verarbeitungstemperatur um bis zu 100 °C niedriger. Dies schlägt sich u. a. in sehr guten Bauteiltoleranzen, aber auch in deutlich höheren Werkzeugstandzeiten nieder. Insbesondere bei Verarbeitung im teilflüssigen Zustand kann die Porosität von

dickwandigen Gussteilen verringert und ihre mechanischen Eigenschaften, wie Duktilität, Zugfestigkeit und Wechselfestigkeit deutlich verbessert werden. Da sich die Temperatur der Schmelze sehr genau einstellen lässt, können auch besonders dünnwandige Bauteile hergestellt werden. Während im Druckguss bei größeren Bauteilen die minimalen Wandstärken bei 1,5 bis 2,0 mm liegen, können im Spritzguss weniger als 1 mm realisiert werden [2].

Außerdem ist das Spritzgießen deutlich umweltfreundlicher als der Druckguss. Durch die niedrigeren Verarbeitungstemperaturen reduziert sich der Energieverbrauch um

bis zu 25 %. Zusätzlich entfallen die teuren und klimaschädlichen oder toxischen Schutzgase, mit denen im Druckguss die Magnesiumschmelze beaufschlagt werden muss [1].

Weltweit wurden bisher etwa 500 Maschinen verkauft. Davon wurden seit 1993 insgesamt 470 Maschinen (Schließkraftbereich von 75 t bis 850 t) von der Firma Japan Steel Works hergestellt [3], der Großteil (443 Maschinen) in Asien sowie einige (21 Maschinen) in Nordamerika. Inzwischen wurde mit der Serie MGIIe die dritte Maschinengeneration entwickelt. Die Firma Husky verkaufte 28 Maschinen, beendete aber im Rahmen der Krise 2009 ihre Aktivitäten, um sich auf das Kerngeschäft zu konzentrieren [4]. Erst seit Kurzem bietet die Firma Yizumi ebenfalls Magnesiumspritzgießmaschinen an. Einen Überblick über die derzeit verfügbaren Maschinen zeigt Tabelle 1.

In Europa (siehe Tabelle 2) hat Neue Materialien Fürth GmbH (NMF) die längste Erfahrung mit dem Magnesiumspritzgießen. 2002 wurde eine erste Maschine von Japan Steel Works mit 220 t Schließkraft in Betrieb genommen, die seitdem für Forschung und Entwicklung genutzt wird. Zwischen 2005 und 2008 wurden dann in schneller Folge mehrere Maschinen der Firma Husky bei den Verarbeitern FCMP und LTC sowie bei NMF und im Technikum bei Volkswagen installiert [4].

Anfang des Jahres 2014 wurde bei FCMP eine 280t-Maschine der neuesten Generation von Japan Steel Works aufgebaut [7]. Ebenfalls in diesem Jahr wurden von LTC und MTC insgesamt fünf Husky-Maschinen übernommen und installiert [8, 9]. Inzwischen wurde außerdem eine weitere neue JSW-Maschine mit 650 t Schließkraft an die Firma ALW INDUSTRY verkauft, die Mitte 2016 installiert und in Betrieb genommen werden soll [3].

Autoren:

Dr.-Ing. **Andreas Lohmüller** (Neue Materialien Fürth GmbH, Technischer Leiter Metall)  
Dr.-Ing. **Michael Hilbinger** (Neue Materialien Fürth GmbH, Projektleiter)  
Dr.-Ing. **Martin Franke** (Neue Materialien Fürth GmbH, Projektleiter)

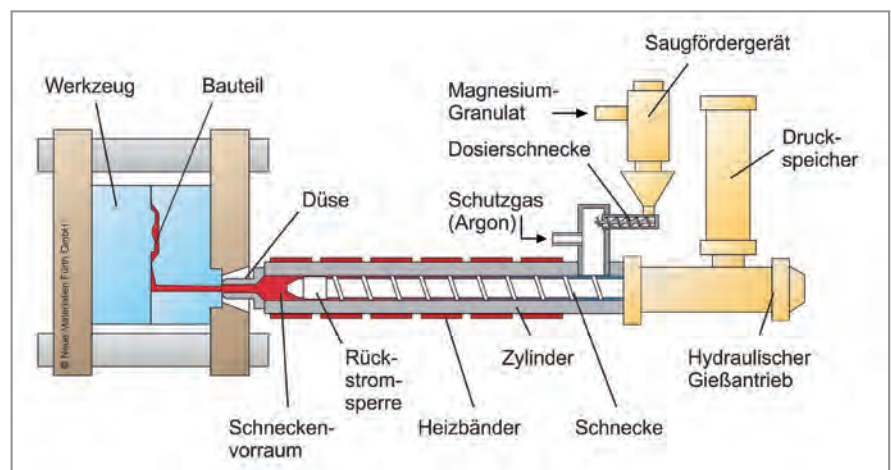


Bild 1: Schematische Darstellung einer Magnesiumspritzgießanlage [1].

## Formauslegung und Prozesssimulation

Die Anwendung von Simulationsverfahren in der Gussteilauslegung ist inzwischen ein integraler Bestandteil in der Gießereitechnik

– so auch für das Magnesiumspritzgießen. Für neu zu entwickelnde Gussteile lässt sich der Herstellungsprozess zuverlässig abbilden und die zu erwartende Gussqualität prognostizieren.

Die Simulation des Gießvorganges beruht auf der Berechnung der physikalischen Vorgänge, die bei der NMF GmbH mit mehreren Simulationsplattformen durchgeführt und durch Eigenentwicklungen ergänzt wird. Grundlage für eine erfolgreiche Anwendung ist eine möglichst genaue Beschreibung der Vorgänge, die beim Gießen stattfinden und die Betrachtung unterschiedlicher auf die Zielgröße ausgerichteter Varianten. Bei der Angussauslegung lassen sich z. B. aus dem Vergleich verschiedener Positionierungen oder geometrischer Ausführungen zielführende Konstruktionen identifizieren und eine vergleichende Bewertung vornehmen [10]. Dabei wird unter Anwendung zielgerichteter Kriterien eine geeignete Interpretation der Ergebnisse vorgenommen. Für eine Beurteilung der Formfüllung von Magnesiumspritzgussbauteilen hat sich die Betrachtung der Füllmuster und der Fließlängenverteilung bewährt [11]. Das Füllmuster beschreibt die Fließwege der Schmelze in der Gusskavität, die Fließlängen stellen den dabei zurückgelegten Weg dar.

Grundlage der Berechnungen bilden Prozessdaten und Randbedingungen als auch die Eigenschaften der verarbeiteten Werkstoffe. Verfahrenstypische Eigenheiten des Magnesiumspritzgießens werden ebenso individuell in der Formauslegung berücksichtigt. Dies ist zum einen die Viskosität, die sich in Folge von Feststoffanteil und Scherung verändert [12], als auch der Pfropfenfänger und die Düse des Einspritzaggregates. Für die im Magnesiumspritzguss verarbeiteten Legierungen kommen experimentell abgesicherte Datensätze zu Anwendung.

Was in der Formauslegung im Vordergrund steht, hängt oftmals vom zu realisierenden Bauteil ab, wie z. B. die resultierende Form-

Tabelle 1: Überblick über das derzeitige Portfolio an Magnesiumspritzgießmaschinen der Firmen Japan Steel Works [1, 5] und Yizumi [6].

Hersteller	Typ	Schließkraft	Schneckendurchmesser [mm]	Theor. Schussvolumen [cm <sup>3</sup> ]	Druck [MPa]
Japan Steel Works	JLM100MGII	100 t	32 40	51 97	102 98
	JLM280MGIIe	280 t	51	306	97
	JLM450MGIIe	450 t	66	513	82
	JLM650MGIIe	650 t	84	1385	95
	JLM850MGIIe	850 t	In Kürze erhältlich		
Yizumi	UN250MG	250 t	51	306	102
	UN650MG	650 t	84	1385	95

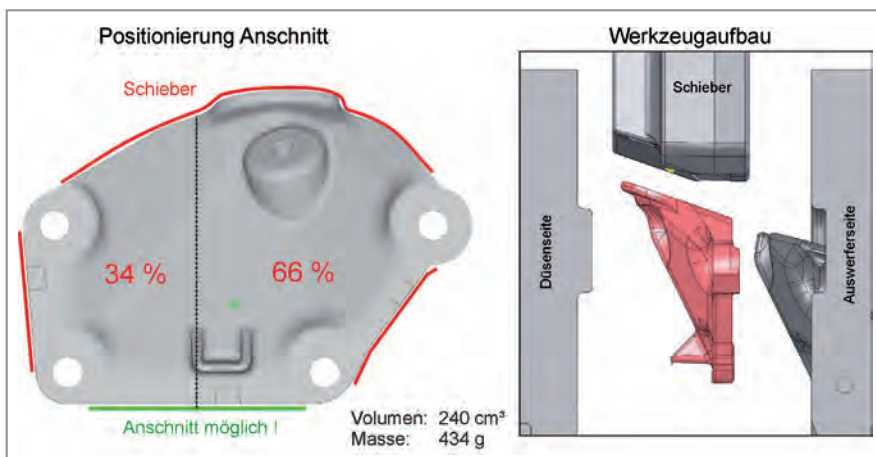


Bild 2: Geometrie des Gussteils und Positionierung des Anschnitts (links). Rechts ist der prinzipielle Werkzeugaufbau dargestellt.

Tabelle 2: Überblick über Magnesiumspritzgießmaschinen bei Verarbeitern und Forschungseinrichtungen in Europa.

Firma	Ort	Hersteller	Anzahl	Schließkraft	Maschinentyp	Installation	Quelle
Neue Materialien Fürth GmbH	Fürth, D	JSW	1	220 t	JLM220MG	2002	
		Husky	1	650 t	HyMet650	2008	
SIRRIS	Liège/Seraing, B	Husky	1	650 t	HyMet650	2005	[4]
FCMP Développement	Marignier, F	Husky	1	280 t	JLM280-MGIIe	2014	[4, 7]
		JSW	1	650 t	HyMet650	2005	
LTC GmbH	Lebring, AT	Husky	2	500 t	HyMet500	2014	[8]
			2	650 t	HyMet650	2006	
			1	1000 t	HyMet1000	2014	
Volkswagen	Kassel, D	Husky	1	1000 t	HyMet1000	2008	[4]
Mold-Thix-Consulting Bueltermann GmbH	Graz/Mureck, AT	Husky	1	500 t	HyMet500	2014	[9]
			1	650 t	HyMet650	2014	
ALW INDUSTRY s.r.o	Olomouc, CZ	JSW	1	650 t	JLM650-MGIIe	2016	[1]

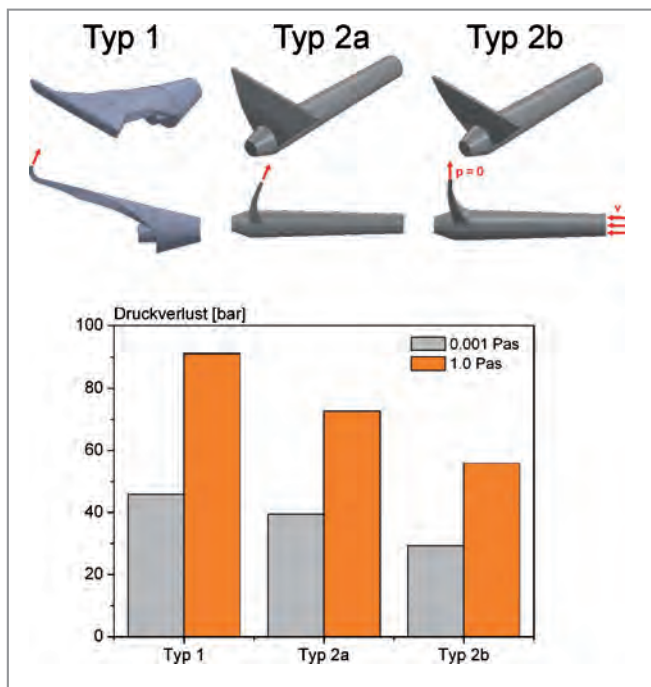


Bild 3: Angussvarianten (oben) und resultierender Druckverlust im Angussystem (unten). Der Druckverlust wird mittels hochaufgelöster Berechnung der stationären Durchströmung des Angusses bestimmt.

resultierenden kompakten Ausführung als auch durch die abgestimmten Strömungsquerschnitte im Anschnitt und die reduzierte Umlenkung im Vergleich die geringsten Druckverluste auf. Die Werte liegen dabei rund 40 % niedriger als bei Variante „Typ1“, die flächiger aufgebaut ist.

Die Formfüllungen sind mittels Fließlängenverteilungen und Füllmuster in Bild 4 beschrieben. Die bereits betrachteten Varianten werden durch eine weitere Variante für die 650t-Maschine (Husky) ergänzt. Die Verteilungen sind im Vergleich sehr ähnlich, was auf die Bauteilgeometrie zurückzuführen ist. Das Volumen ist in Bezug auf die Positionierung des Anschnitts asymmetrisch angeordnet und es kommt makroskopisch betrachtet zu einer Füllabfolge im Uhrzeigersinn, die für alle Varianten erhalten bleibt. Im Detail ergeben sich jedoch durch den veränderten Einstrahlwinkel und die unterschiedliche Aufweitung des Primärstrahlstrahls kürzere Fließlängen für die Varianten „Typ 2b“

füllung im Falle unterschiedlicher Anschnittpositionierungen. Beim vorliegenden Motortragbock ist die Lage des Anschnitts weitestgehend bereits durch Bauteilpositionierung in der Form, Geometrie und Ausformung definiert (siehe Bild 2). Die Aufgabe besteht in der Gestaltung des Gießlaufes und des Pfropfenfängers für die zur Verfügung stehenden Maschinen. Eine wesentliche Randbedingung ist die maximal zulässige Sprengfläche im Falle der 220t-Maschine (JSW), die eine möglichst kompakte Ausführung erfordert. Das Bauteilgewicht und die relativ hohen Wandstärken bedingen einen hohen Nachdruck im Anschluss an die Füllung der Kavität, um die Erstarrungsschrumpfung so weit als möglich kompensieren zu können.

In der durchgeführten Auslegung werden eine Reihe von Varianten untersucht, die sich in der geometrischen Ausführung und in der Orientierung des Primärstrahles in der Kavität unterscheiden. Eine Auswahl ist in Bild 3 (oben) dargestellt. Neben der Berechnung der Formfüllung wird dabei eine Druckanalyse des Anschnittsystems durchgeführt. Diese Analyse ist nur auf den Anguss ausgerichtet und besteht aus der vergleichenden Bestimmung des Druckverlustes bei stationärer Durchströmung des Angusses. Die geometrische Auflösung in der Berechnung ist dabei höher als bei der herkömmlichen Formfüllung. Bild 3 (unten) zeigt die Ergebnisse für die drei dargestellten Varianten. Die Berechnungen wurden für zwei Viskositätswerte durchgeführt. Variante „Typ 2b“ weist auf Grund der langen Ausstoßweite des Pfropfens und der daraus

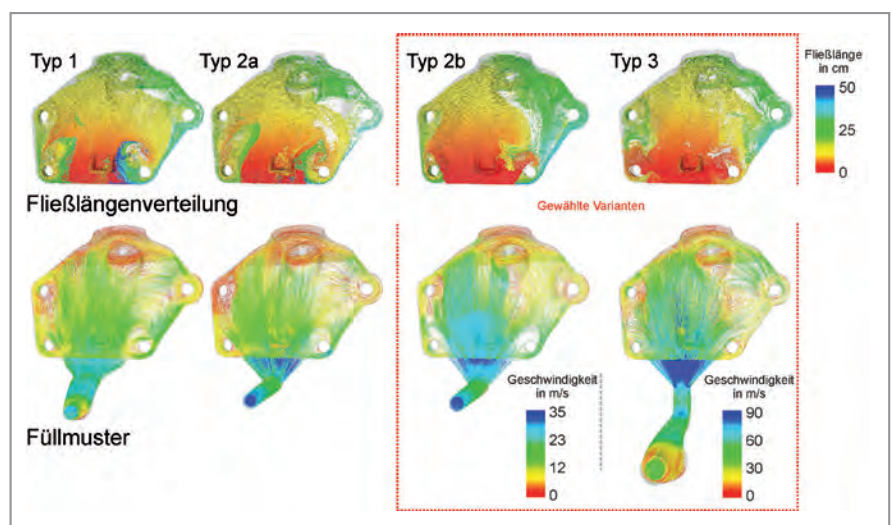


Bild 4: Fließlängenverteilung und Füllmuster der Angussvarianten. Die gewählten Varianten erlauben eine geeignete Positionierung von Überlaufbohlen und Entlüftung bei relativ niedrigen Fließlängen und passablem Füllmuster.

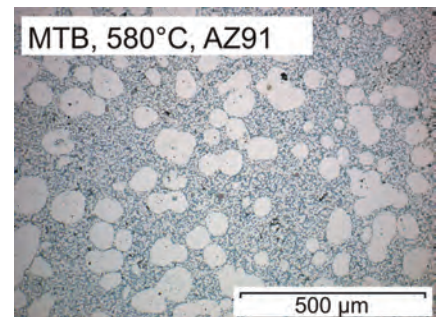
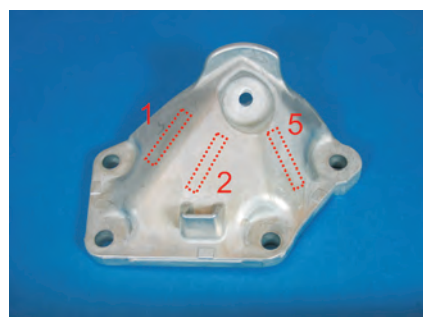


Bild 5: Entnahmepositionen der Zugproben aus dem Motortragbock (links) und Mikrogefüge der Legierung AZ91 aus der Gießcharge mit 580°C Verarbeitungstemperatur auf der Husky-Maschine (rechts).

und „Typ 3“. Verwirbelungen in geringerem Umfang und die Möglichkeit geeignete Entlüftungen und Überlaufbohren positionieren zu können haben zur Auswahl dieser beiden Varianten in der technischen Realisierung geführt.

### Motortragbock als Beispiel für ein dickwandiges Bauteil

Ausgehend von den Erkenntnissen aus der Formfüllsimulation wurde ein Werkzeug konzipiert, das sowohl auf der 220 t-JSW-Maschine (Anguss „Typ 2b“) wie auch auf der 650 t-Husky-Maschine (Anguss „Typ 3“) bei NMF eingesetzt werden konnte. Es wurden mehrere Gießchargen aus der Legierung AZ91D hergestellt. Auf der 220 t-JSW-Maschine wurde mit einer Gießtemperatur von 590 °C gearbeitet. Auf der 650 t-Husky-Maschine wurden vier Gießchargen bei Gießtemperaturen von 580 °C, 590 °C, 595 °C und 605 °C bei ansonsten konstanten Gießparametern gegossen [13]. Anschließend wurde mittels Auftriebswägung die Porosität der Gussteile ermittelt, metallografisch der mittlere Festphasenanteil bestimmt und an drei Positionen Flachzugproben in Anlehnung an die Luftfahrtnorm LN29512 mit 2 mm Dicke entnommen. Bild 5 zeigt die Entnahmepositionen der Zugproben (links). Exemplarisch ist das Gussgefüge bei einer Gießtemperatur von 580 °C dargestellt (rechts) [13]. Es zeigt sich hier das typische globulitische Gefüge, der Festphasenanteil liegt bei etwa 23 %.

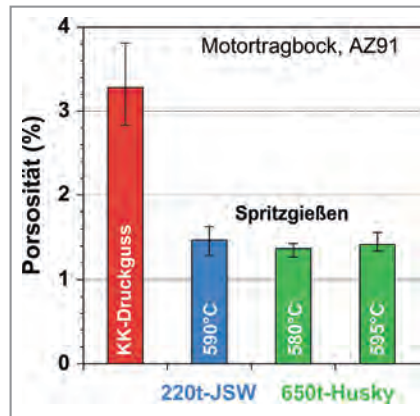


Bild 6: Mittlere Porosität des Motortragbocks aus Auftriebswägung für unterschiedliche Verarbeitungstemperaturen auf der JSW- bzw. Husky-Maschine im Vergleich zu Werten aus dem Druckguss [1].

In Bild 6 ist beispielhaft die Porosität der Gießcharge mit einer Gießtemperatur von 590 °C für die JSW-Maschine und zweier Gießchargen (580 °C bzw. 595 °C) für die Husky-Maschine dargestellt. Die Porosität der einzelnen Versuche unterscheidet sich nur wenig und liegt etwa im Bereich von 1,5 Prozent. Zum Vergleich sind Werte für das gleiche Bauteil für Versuche im Kaltammerdruckguss (2-fach-Kavität) dargestellt. Hier liegt die Porosität etwa doppelt so hoch.

In Bild 7 (links) sind die mittleren mechanischen Eigenschaften der auf der Husky-Maschine hergestellten Gussteile über die

Gießtemperatur aufgetragen [13]. Der zugehörige Festphasenanteil ist oben im Diagramm vermerkt. Es zeigt sich, dass für alle Gießtemperaturen eine Streckgrenze von etwa 150 MPa erreicht wird. Die Zugfestigkeiten liegen etwa im Bereich von 220–240 MPa und die Bruchdehnung etwa zwischen 3 % und 4 %. Dabei ist ein leichter Anstieg für Zugfestigkeit und Bruchdehnung mit der Gießtemperatur zu erkennen, was auf zwei Effekten basiert, die man im Bild 7 (rechts) gut nachvollziehen kann. Hier sind exemplarisch die mittleren Werte für Zugfestigkeit und Bruchdehnung an den Positionen (2) und (5) dargestellt. Er ist eine Abhängigkeit von der Entnahmeposition erkennbar. An Position (5) werden aufgrund der Bedingungen bei der Formfüllung durchgehend etwas schlechtere Werte beobachtet. Dies korreliert sehr gut mit den etwas längeren Fließwegen und der etwas stärkeren Verwirbelung in diesem Bereich. Als zweiter Effekt ist der geringere Wärmehalt der Schmelze bei niedrigerer Gießtemperatur zu nennen. Insbesondere bei 590 °C wird der Einfluss der beiden Effekte deutlich. Hier ist der größte Unterschied zwischen den beiden Entnahmestellen erkennbar. Prinzipiell kann man Verbesserungen zunächst durch eine Anpassung der Gießparameter (z. B. Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit) bewirken. Dies wurde an anderer Stelle bereits genauer diskutiert [14]. Eine andere Möglichkeit wäre der Einsatz eines Heißkanalsystems, was gleichzeitig noch weitere Vorteile bringt.

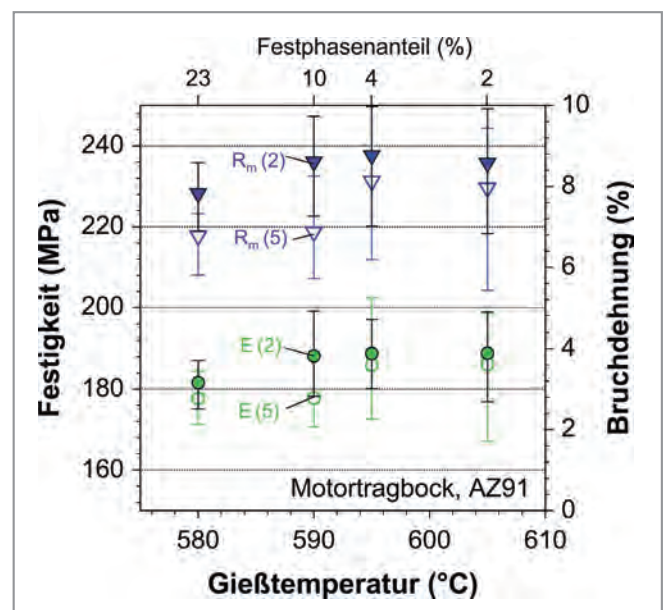
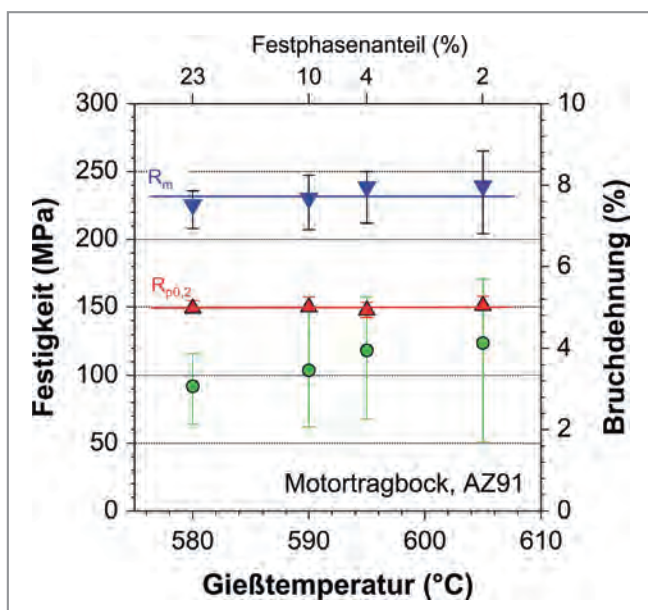


Bild 7: Gemittelte mechanische Eigenschaften des Motortragbocks hergestellt auf der Husky-Maschine. Die Streckgrenze ist unabhängig von der Gießtemperatur. Für Zugfestigkeit und Bruchdehnung ist ein geringfügiger Anstieg mit Erhöhung der Gießtemperatur zu erkennen (links). Entsprechend der berechneten Fließwege und Füllmuster zeigen Proben an der Position (5) etwas schlechtere Werte als an Position (2).

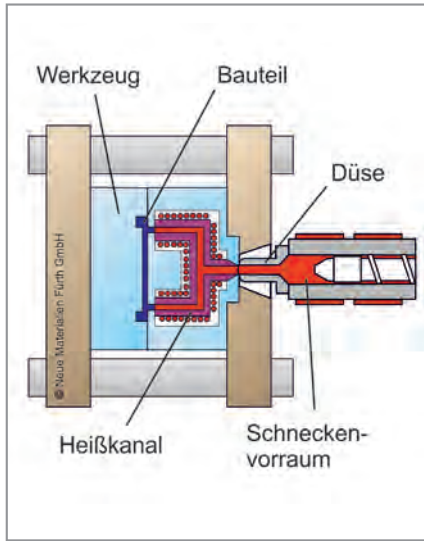
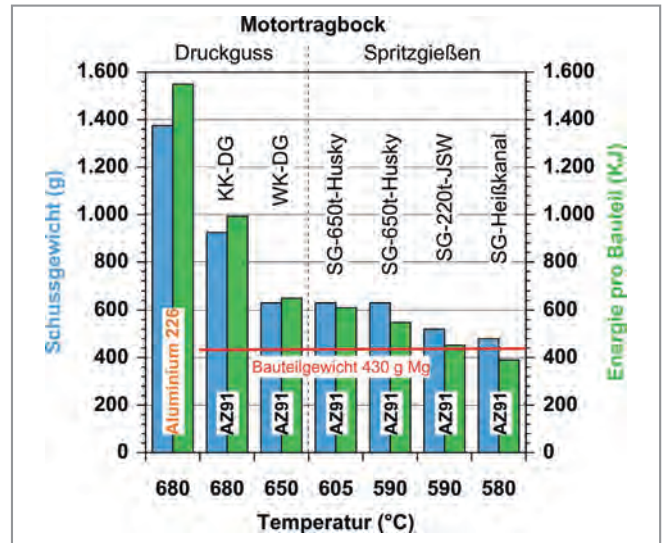


Bild 8: Schematische Darstellung eines Heißkanalsystems (links). Eine Studie für den Motortragbock zeigt hohes Potenzial zur Reduzierung des Schussgewichts und des Energieeinsatzes zum Schmelzen [15].



### Auswirkung eines Heißkanals

Heißkanalsysteme sind in der Kunststofftechnik bereits seit Jahren Stand der Technik. Dabei wird die Schmelze im Werkzeug auf der Gießtemperatur gehalten und möglichst nahe an das Bauteil gebracht [15] (siehe Schema Bild 8, links). Bei Einsatz eines Heißkanalsystems kann das Angussystem drastisch verkleinert werden. Vor allem bei großflächigen Bauteilen lassen sich dadurch die Fließwege deutlich reduzieren, was sich sehr positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt [1]. Gleichzeitig können Material- und Energieeinsatz stark reduziert werden.

Für das Bauteil Motortragbock wird dies in Bild 8 (rechts) genauer gezeigt. Die Betrachtung basiert auf der Umsetzung des Motortragbocks im Kaltammerdruckguss (Magnesium und Aluminium) und den beiden Angussvarianten im Magnesiumspritzgießen für die Husky- bzw. JSW-Maschine. Als einfachste Variante für einen Heißkanal wurde hier eine Verkürzung des Angusskanals der JSW-Maschine um ca. 100 mm angenommen. Für den Warmkammerdruckguss wurde davon ausgegangen, dass das Angussystem ähnliches Gewicht hat, wie beim Anguss der Husky-Maschine.

Bei ähnlicher Bauteil- und Angussgeometrie lässt sich zunächst schon ein deutlicher Gewichts- und Energieunterschied zwischen Magnesium und Aluminium im Kaltammerdruckguss erkennen. Bei Einsatz des Warmkammerverfahrens lässt sich durch den filigraneren Anguss und die niedrigere Gießtemperatur sowohl Material, wie auch Energie einsparen. Durch Erniedrigung der Gießtemperatur und gleichzeitige Verkleinerung des Angusses beim Spritzgießen bis hin zur Verwendung eines Heißkanals lässt sich im

Vergleich zum Kaltammerdruckguss der Energieeinsatz um etwa 60 % und der Materialeinsatz um etwa 50 % reduzieren [15], was sich positiv auf die Fertigungskosten auswirkt.

Neben diesen beiden offensichtlichen Vorteilen lassen sich noch weitere Effekte ableiten, die ebenfalls die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Für andere Bauteile konnte bereits gezeigt werden, dass sich die Zykluszeit deut-

lich reduzieren lässt. Einerseits lassen sich die Kühlzeiten reduzieren, andererseits können teilweise auch die Zeiten für Sprühen und Blasen verkürzt werden. Daraus resultiert wiederum geringerer Verbrauch an Wasser und Druckluft. Durch die Verkleinerung des Angussystems und die damit verbundene Reduzierung von Schussgewicht und Sprengfläche können außerdem kleinere Maschinen eingesetzt werden, was wiederum geringere

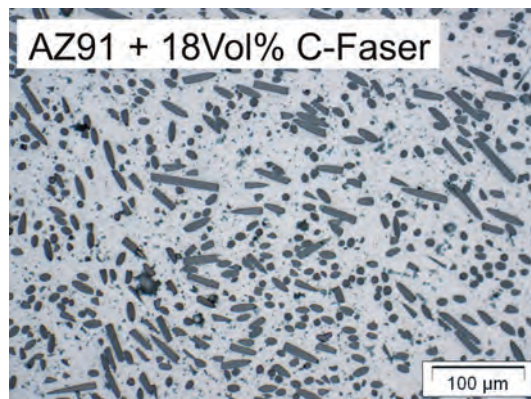
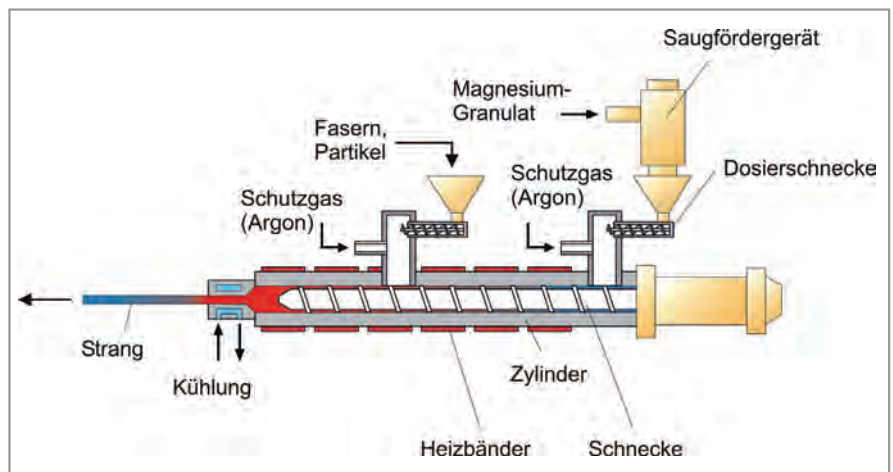


Bild 9: Schematische Darstellung des Compoundierprozesses [10] (oben). Ein Beispiel für die Verteilung von Kohlenstoffkurzfasern (18 Vol.%) in einer AZ91-Matrix ist links dargestellt.

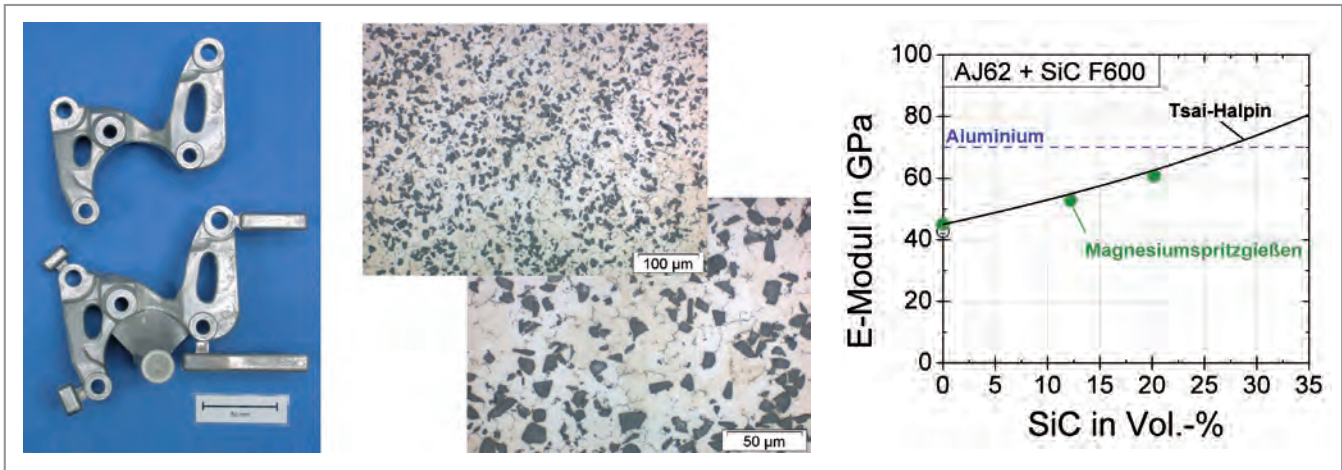


Bild 10: Verteilung von SiC-Partikeln (Größe F600) im Bauteil Lenkhilfepumpenhalter (oben). Im Magnesiumspritzgießen wurden Zugproben mit unterschiedlichen SiC-Gehalten hergestellt. Daraus wurden Rundproben gefertigt an denen mittels Resonanzfrequenzanalyse der Elastizitätsmodul bestimmt wurde. Durch Zugabe von etwa 25 Vol% kann das Niveau von Aluminium erreicht werden [17].

Investitionen und Maschinenstundensätze zur Folge hat.

## Kurzfaser- und Partikelverstärkung

Neben der Entwicklung von neuen Legierungen für das Magnesiumspritzgießen wurde bei NMF auch an Kurzfaser- und Partikelverstärkten Werkstoffen (Metal-Matrix Composites, MMC) und einer dafür geeigneten Prozesskette gearbeitet [10]. Im Druckguss wurden von verschiedenen Gruppen große Anstrengungen unternommen, die auf dem Einrühren von Partikeln in die Schmelze basierten. Es zeigte sich aber eine Reihe von Problemen, wie z. B. die Bildung von Agglomeraten und das Absinken der Verstärkungsphasen, die Ausbildung von Gasporosität sowie starke Reaktionen zwischen Schmelze und Verstärkungsphasen [16]. Das Magnesiumspritzgießen ist aufgrund seiner geringen Prozesstemperaturen, der kurzen Verweilzeiten und der intensiven Vermischung in der Schmelze sehr gut für die Herstellung von MMCs geeignet [1].

Zum Einarbeiten der Verstärkungsphase wurde bei NMF der Prototyp eines Compounders aufgebaut, der die Herstellung eines verstärkten Strangs ermöglicht [16]. In Bild 10 ist das Compoundieraggregat schematisch dargestellt (links). Beispielhaft ist aus einem damit hergestellten Strang ein Querschliff dargestellt, der die Verteilung von Kohlenstoffkurzfasern (ca. 18 Vol.%) in einer AZ91-Matrix zeigt. Die Fasern zeigen eine regellose Verteilung, es wurden keine Agglomerate oder Reaktionen festgestellt. In einem nachfolgenden Schritt kann aus dem erzeugten Strang Granulat hergestellt

werden, das für das Magnesiumspritzgießen geeignet ist.

Es konnte bereits an mehreren Gussteilen (Zugproben, Lenkhilfepumpenhalter, Motortragbock) gezeigt werden, dass im Spritzgießen Bauteile mit einer sehr guten Verteilung der Partikel hergestellt werden können (siehe Bild 11). Gussproben aus dem Magnesiumspritzgießen zeigen, dass durch die Zugabe der Partikel die Steifigkeit signifikant gesteigert werden kann (Bild 11 rechts), wie anhand von [16, 17].

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts THIXOM soll die Maschinenteknik weiterentwickelt werden. Neben NMF sind an dem Projekt derzeit als Industriepartner Volkswagen AG, Reiloy Metall GmbH, GK Concept GmbH, Druckguss Service Deutschland GmbH sowie das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK, TU Dresden) und das Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH beteiligt [18]. ◀

## Literatur

- [1] Lohmüller, A.; Scharrer, M.; Jenning, R.; Rauber, C.; Loos, M.; Kömpel, N.; Hilbinger, M.; Hartmann, M.; Singer, R.F.: Advances in Magnesium, Neue Entwicklungen beim Thixospritzgießen von Magnesium, 15th Magnesium Automotive and User Seminar, 2007
- [2] Lohmüller, A.: Magnesiumspritzgießen (Thixomolding®), VDI Spezialtag Magnesiumguss im Fahrzeugbau, Magdeburg, 12. Februar 2009
- [3] Jun Ota, Japan Steel Works, Persönliche Mitteilung 09/2015
- [4] B. Wendinger, Status of thixomolding® technology and current industrial applications, IMA European Magnesium, Seminar & Exhibition 2010 Munich
- [5] www.jsw.co.jp/en/products/mg/index.html
- [6] www.yizumi-group.com.hk/magnesium-alloy-injection-molding-machine.html

- [7] Bernd Wendinger, Firmenpräsentation „FCMP Thixomolding®“ 07/2013
- [8] Wolfgang Prein, LTC GmbH, Firmenpräsentation, „Thixomolding“ 08/2014
- [9] Bernd Bültermann, MTC, Persönliche Mitteilung 08/2014
- [10] F. Bechmann, M. Kohnhäuser, C. Saager, H.-R. Kröninger, A. Dörnhöfer, C. Rauber, A. Lohmüller, R. M. Hilbinger, „Partikelverstärkung von Magnesiumgussbauteilen“, ATZ 10/ 2008, 864–871
- [11] R. M. Hilbinger, A. Lohmüller, J. Köpf, M. Scharrer, R. F. Singer, „Predicting defects and materials quality in castings by means of computational determination of flow length values“, International Journal of Cast Metal Research, Vol. 24, Nr. 2, April 2011, 96–101
- [12] M. Kramer, R. Jenning, A. Lohmüller, M. Hilbinger et.al, „Characterization of magnesium alloys for semi solid processing“, In: Kainer, K.U.(Hrsg.): 8th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications, Weimar, 26.–29. October 2009, 376–383
- [13] Markus Riederer, Eigenschaften von Magnesium-Komponenten hergestellt auf Spritzgießmaschinen unterschiedlicher Bauart, Studienarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2008
- [14] Lohmüller, A.; Scharrer, M.; Hilbinger, M.; Jenning, R.; Hartmann, M.; Singer, R.F.: Thixospritzgießen von Magnesiumlegierungen. Gießereiforschung 57 (2005), S. 2–9.
- [15] Lohmüller, A.; Körner, C.; Singer, R.F.; Neue Gießtechnologien: Ressourceneffizient und wirtschaftlich. In: R. Neugebauer (Hrsg.): Ressourceneffiziente Technologien für den Powertrain; International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2012, S. 67–81
- [16] Rauber, C.: Partikelverstärkte Magnesiumlegierungen durch Compoundieren und Spritzgießen – Herstellung, Mikrostruktur, Eigenschaften, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5, Nr. 745, Düsseldorf VDI-Verlag 2011
- [17] Rauber, C.; Lohmüller, A.; Opel, S.; Singer, R.F.; Microstructure and mechanical properties of SiC particle reinforced magnesium composites processed by injection molding; Materials Science and Engineering A 528 (2011) 6313–6323
- [18] <http://plattform-forel.de/thixom/>