

Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten



VDI-Berichte 2274

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten

Kassel, 17. und 18. Februar 2016



VDI-Berichte 2274

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

(German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092274-4

Inhalt

		Seite
	Vorwort	1

Fahrzeuggleichtbau-Konzepte

S. W. Zangerle	Karosserie Strukturgussbauteile im globalen Automotive-Markt	3
A. Hennings	Chancen und Herausforderungen bei der Fertigung von Strukturguss-Komponenten in globalisierten Märkten	19
M. Pfitzer	Einsatz von Aluminium-Strukturgussteilen in weltweiten Fahrzeugprojekten bei Mercedes-Benz	31
A. Gebauer-Teichmann, J. Röse, O. Warnke	Herausforderung automobile Großserie von Guss-strukturbauenteilen	35

Werkstoffe und Verfahren im Wettbewerb

A. Maroto	Sand casting of security components: EPGS process	39
H. Fuchs, A. Egner-Walter	Giessverfahren für Fahrwerks- und Chassisbauteile Produkt - und Prozessoptionen und -potenziale	55
S. Hess, S. Philipp	Entwicklung von bionisch gestalteten Gussteilen für Fahrwerk und Karosserie	69
C. Appelt, S. Voss	Einfluss der Temperaturleitfähigkeit organisch- und anorganisch-gebundener Formkerne auf die Gefüge-eigenschaften von Aluminiumlegierungen	89

Prüftechnik

<i>C. Böhnlein, I. Seitz, T. Traxler</i>	Prüfmethode zur Ermittlung des Umformvermögens von Aluminium-Gusswerkstoffen (Duktilitätstest)	103
--	--	-----

<i>S. Roeren, M. Wagensonner</i>	Prozessstabilisierung durch automatisierte Erkennung von Oberflächenfehlern in der Gesamtprozesskette AI-Druckgussbearbeitung	109
--------------------------------------	--	-----

Produktionsprozesse und Simulation

<i>J. Müller, K. Sauber, M. Fehlbier</i>	Simulationsgestützte Auslegung des Sprühprozesses im Leichtmetall-Druckguss	117
--	---	-----

<i>S. Jansen</i>	Simulationsgestützte Auslegung von Druckgießwerkzeugen mit konturnahen Temperiersystemen	133
------------------	--	-----

<i>W. Fragner, P. Pucher, M. Hummel</i>	AI-Gusslegierungen für Bauteile in Struktur und Fahrwerk mit großem Anteil an Schrotten als Inputmaterial – Anforderungen und Möglichkeiten von Recyclinglegierungen im Automobil	143
---	---	-----

Produktionsprozesse

<i>T. Beganovic, S. Gierth</i>	Innovation im Leichtmetallguss – Wandstärkenreduzierung durch Oberflächenstrukturierung	153
------------------------------------	---	-----

Impulsvortrag

<i>J.-M. Ségaud</i>	Welche Komplexität treibt Gießer und Entwickler um? Was sind die Haupttreiber?	181
---------------------	--	-----

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

der Trend bei OEMs zu Material- und Komponentensubstitutionen durch anspruchsvolle Gussanwendungen in den Bereichen Fahrwerk und Karosserie erfordert tiefgreifende Veränderungen in den etablierten Entwicklungs- und Fertigungsprozessen.

Neue Fahrzeugkonzepte und ehrgeizige Leichtbaustrategien stehen i.d.R. einem erhöhten Anforderungsprofil sowie Kostendruck gegenüber.

Nach der erfolgreichen 1. VDI-Fachtagung „Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten 2014“ möchten wir in dieser Tagung zu dem Thema „Strukturelle Anwendungen von Gusskomponenten“ die Aspekte Konzept, Auslegung, Herstellprozesse weiter vertiefen und über Auswahlkriterien, Kosten, Logistik und Sourcing-Strategie ganzheitlich diskutieren.

Wir freuen uns auf den Austausch mit Ihnen!

Im Namen des Programmausschusses

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier und Dipl.-Ing. Jean-Marc Ségaud

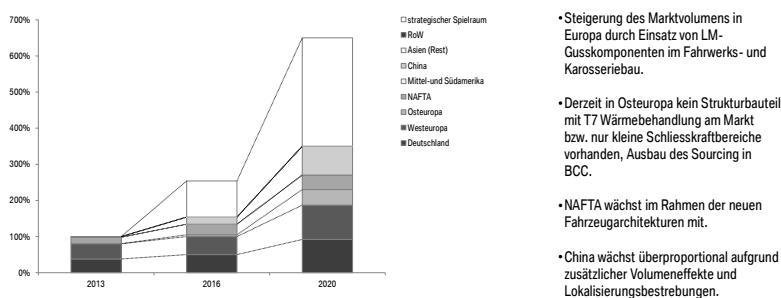
Karosserie Strukturgussbauteile im globalen Automotive-Markt

Dipl.-Ing. **Stefan W. Zangerle**, BMW AG, München

INHALT.

- REVIEW DER LETZTEN JAHRE
- KAROSSEIERIEMISCHBAU DER NÄCHSTEN GENERATION
- LESSONS LEARNED AM BEISPIEL DES ALUMINIUM LÄNGSTRÄGER HINTEN NEW BMW 7 SERIES
- MARKTABSCHÄTZUNG UND MARKTENTWICKLUNG
- BENCHMARKANALYSE WERKZEUGBAU (ENTGRAT- UND DRUCKGUSSFORMEN)

MARKTENTWICKLUNG VON LEICHTMETALL-STRUKTURBAUTEILEN REVIEW AUS PROGNOSE 2013.



INHALT.

- **REVIEW DER LETZTEN JAHRE**
- **KAROSSERIEMISCHBAU DER NÄCHSTEN GENERATION**
- **LESSONS LEARNED AM BEISPIEL DES ALUMINIUM LÄNGSTRÄGER HINTEN NEW BMW 7 SERIES**
- **MARKTABSCHÄTZUNG UND MARKTENTWICKLUNG**
- **BENCHMARKANALYSE WERKZEUGBAU (ENTGRAT- UND DRUCKGUSSFORMEN)**

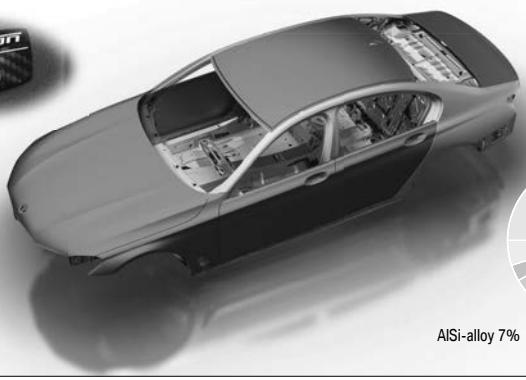
**NEW BMW 7 SERIES – DRIVING LUXURY.
GEWINNER DER EUROCARBODY IN BAD NAUHEIM, OKT. 2015.**



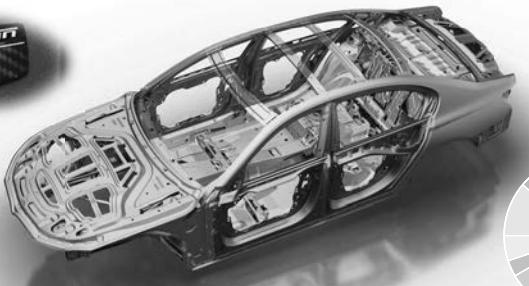
**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**

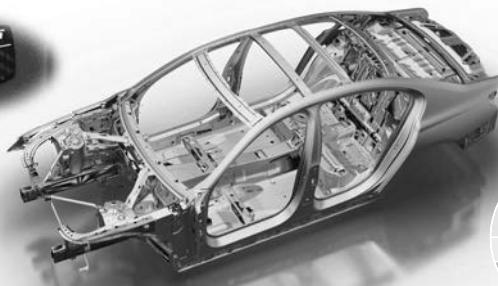


**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



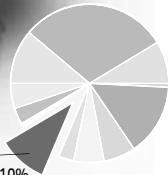
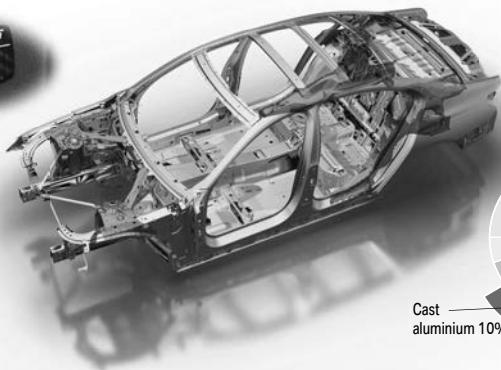
AlMg-alloy 6%

**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



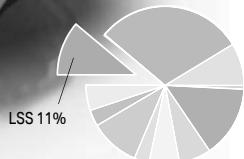
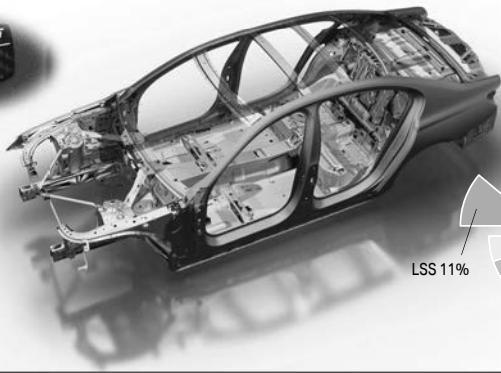
Aluminium extrusion profiles 3%

**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



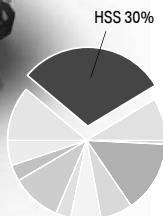
Cast
aluminium 10%

**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**

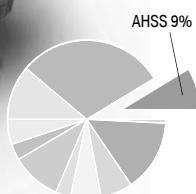
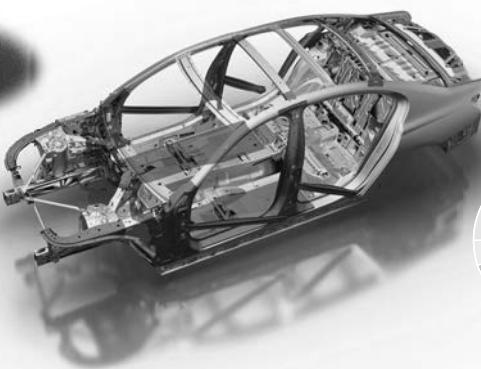


LSS 11%

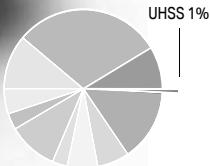
**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



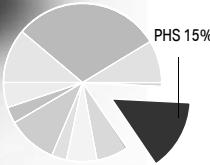
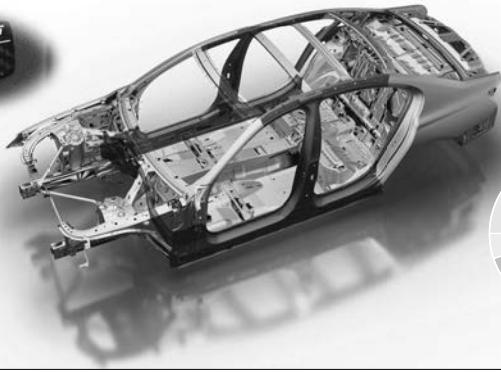
**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



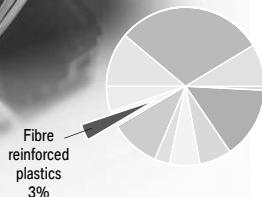
**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



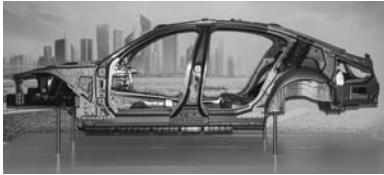
**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**



**NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE.
INTELLIGENTES ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN CFK, ALUMINIUM UND
STAHL.**

Highlights

- Erstmals drei unterschiedliche Materialien
- 4 verschiedene CFK Technologien
- Kohlefaser mit 100% erneuerbarer Energie hergestellt
- 3 verschiedene Aluminiumtechnologien
- Alu mit 50% Sekundäranteil
- Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle



Daten

Gewicht Rohkarosserie:	323 kg (331 kg Langversion)
Gewichtsreduzierung:	40 kg
Anzahl CFK Teile:	16
Anzahl Gussbauteile:	11

INHALT.

- REVIEW DER LETZTEN JAHRE
- KAROSSERIEMISCHBAU DER NÄCHSTEN GENERATION
- LESSONS LEARNED AM BEISPIEL DES ALUMINIUM LÄNGSTRÄGER HINTEN NEW BMW 7 SERIES
- MARKTABSCHÄTZUNG UND MARKTENTWICKLUNG
- BENCHMARKANALYSE WERKZEUGBAU (ENTGRAT- UND DRUCKGUSSFORMEN)

DIE DIMENSIONALE STABILITÄT DES ALUMINIUMDRUCKGUSS LÄNGSTRÄGERS HINTEN IST DURCH EINEN VOLLAUTOM. RICHTPROZESS GARANTIERT.**Längsträger hinten****Einbausituation**

- Reduzierung von 18 Einzelbauteilen zu 1 Gussbauteil
- Vollautomatischer Richtprozess garantiert geometrische Toleranzanforderungen



DIE DIMENSIONALE STABILITÄT DES ALUMINIUMDRUCKGÜSS LÄNGSTRÄGERS HINTEN IST DURCH EINEN VOLLAUTOM. RICHTPROZESS GARANTIERT.

Längsträger hinten

- Reduzierung von 18 Einzelbauteilen zu 1 Gussbauteil
- Vollautomatischer Richtprozess garantiert geometrische Toleranzanforderungen



Einbausituation



TECHNOLOGIE KAROSSERIEBAU. HERAUSFORDERUNG MATERIALMIX AM BEISPIEL HINTERBAU.



Längsträger hinten

- ✓ Reduzierung der Teileanzahl (Leichtbau und Präzision)
- ✓ Weitere Intensivierung Absicherung neue Fügetechniken bereits im FIZ
- ✓ Vollautomatisierter Richtprozess mit hoher geometrischer Abgabefähigkeit
- ✗ Zusätzliche Fügetechniken verteilen sich über die gesamte Produktionsfläche
→ Flächen- und Investintensiv



Layout



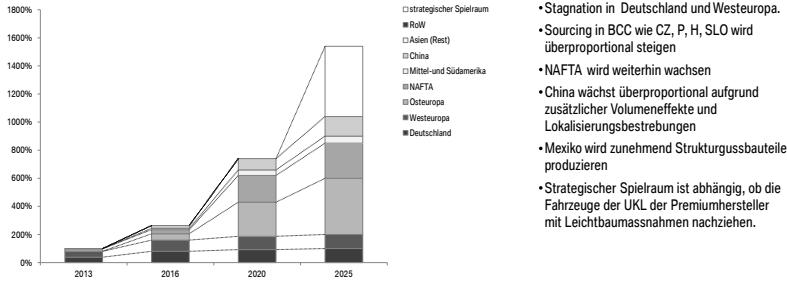
Lessons Learned

- Weiterentwicklung Standards (Wechseln Fügeequipments)
- Wiederverwendung der bestehenden Struktur für weitere Modelle der grossen Baureihe.
- Übertrag der Erfahrung in Folgeprojekte zur Optimierung der Fügereihenfolge

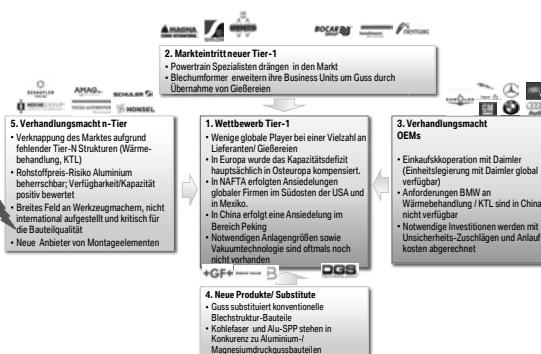
INHALT.

- REVIEW DER LETZTEN JAHRE
- KAROSSERIEMISCHBAU DER NÄCHSTEN GENERATION
- LESSONS LEARNED AM BEISPIEL DES ALUMINIUM LÄNGSTRÄGER HINTEN NEW BMW 7 SERIES
- MARKTABSCHÄTZUNG UND MARKTENTWICKLUNG
- BENCHMARKANALYSE WERKZEUGBAU (ENTGRAT- UND DRUCKGUSSFORMEN)

MARKTENTWICKLUNG VON LEICHTMETALL-STRUKTURBAUTEILEN MARKTABSCHÄTZUNG BIS 2025.



PORTER'S 5 FORCES MARKTENTWICKLUNG.



SUPPLY CHAIN STRUKTURGUSS (BMW-DAIMLER EINKAUFSKOOPERATION) RAUM NAFTA.



- Kooperation mit Daimler:
 - gleiche Legierungsspezifikation
 - Aufteilung der Lieferantenentwicklung und damit verbundenen Lieferantenfreigaben
 - gemeinsame Vergabe in USA
- Ansiedlung von zwei etablierten Strukturteilegiessern im Südosten der USA.
- Weitere Giesser (Powertrain) sind bereits lokalisiert.
- Aufbau eines zweiten Magnesium-Druckgusslieferanten in Montagewerksnähe

SUPPLY CHAIN STRUKTURGUSS (BMW-DAIMLER EINKAUFSKOOPERATION) RAUM CHINA.



- Sehr gut entwickelte Lieferantenstruktur im Raum Shanghai.
- Lokalisierung von Giessern im Bereich Peking und Tianjin hat begonnen.
- Nördlich von Peking ist derzeit kein Strukturgusshersteller vorhanden.
- KTL-Beschichter/ Passivierer mit automotiv-Erfahrung sind nur im Raum Shanghai.

INHALT.

- REVIEW DER LETZTEN JAHRE
- KAROSSERIEMISCHBAU DER NÄCHSTEN GENERATION
- LESSONS LEARNED AM BEISPIEL DES ALUMINIUM LÄNGSTRÄGER HINTEN NEW BMW 7 SERIES
- MARKTABSCHÄTZUNG UND MARKTENTWICKLUNG
- BENCHMARKANALYSE WERKZEUGBAU (ENTGRAT- UND DRUCKGUSSFORMEN)

WBA STUDIE WORLD OF TOOLING 2015.



Die Studie zeigt die Relevanz der zwanzig bedeutendsten Werkzeugbaumärkte heute sowie in Zukunft. Die Relevanz wird gemessen anhand der Marktgröße sowie der vorhandenen Werkzeugbaukompetenz. Zusätzlich wird das Entwicklungspotenzial aller Märkte bewertet. Die Berechnungen der Marktgröße, Werkzeugbaukompetenz sowie des Entwicklungspotenzials beruhen auf Kennzahlen aus den vergangenen fünf Jahren.

Quelle: WBA Aachen, World of Tooling 2015

BENCHMARKANALYSE BMW KOSTENANALYSE.

Auftrag

Analysen

Strategie

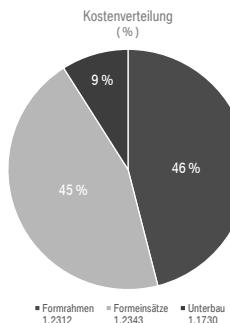
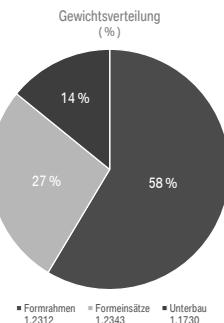
- Analyse von Werkzeuglieferanten
- Fokus: Großwerkzeuge für Druckguss Maschinen Schleifkraft > 1.600 to.
- Werkzeuge für Karosserie Strukturtile in Al und Mg Druckguss.
- Großwerkzeuge für den Antriebs- und Fahrwerksbereich in Druckguss.
- Einschätzung der Werkzeugmacher
- Schärfung Kalkulationsprämissen
 - Profile
 - Stundensätze
 - Materialien
 - Produktivität
- Aktualisierung der WZ-Macher Landkarte

- Wahl der Lieferanten aus:
- Datenbank
 - Empfehlung Facheinkauf
 - Internet-Recherche
 - Stand Q3/2015
- Analyse von 16 Werkzeugbaufirmen für Großwerkzeuge aus dem Bereich Druckguss und Stanzentgraten

- Einheitliches gezieltes Vorgehen anhand Checkliste mit 18 Bewertungskriterien (Planung, Design, Equipment, Manpower)
- Bauteilklassifizierung
- Bewertung anhand 4M's (Mensch, Maschine, Mhwert, Methode)
- Standortanalyse
 - Analyse vorhandener Werkzeuge
 - Konstruktive Lösungsansätze
 - Referenzteile, Maschinenpark,
 - Produktivitätsrechner, Lohnabfrage

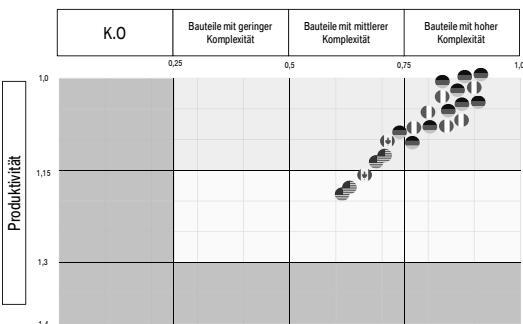
ZIEL: Gemeinsame Einstufung von bestehenden und potenziellen Werkzeug Lieferanten durch die teilnehmenden Fachbereiche. Tiefergründende Analyse Beschaffungsmarkt Europa.

BENCHMARKANALYSE EUROPA (DE) GEWICHTS- UND KOSTENVERTEILUNG – ROHMATERIAL.



Analyse von Druckgussformen mit Formgewichten von 22 bis 45 Tonnen

BENCHMARKANALYSE WERKZEUGMACHER LANDKARTE, PRODUKTIVITÄTSINDEX.



- Deutsche und italienische Druckguss- und Stanzwerkzeugmacher sind bzgl. Produktivität und Beherrschung der Bauteilkomplexität führend.
- Nordamerikanische Werkzeugmacher sind für Bauteile mittlerer Komplexität (z.B.: Federbeinstützen vorne) technisch und wirtschaftlich konkurrenzfähig.
- In China ist der Formenmarkt zu entwickeln.



Stefan W. Zangerle,
Commodityleitung Leichtmetallguss Strukturauteile

KAROSSERIE STRUKTURGUSSBAUTEILE IM GLOBALEN AUTOMOTIVE - MARKT

VDI TAGUNG GIessen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten

BMW
GROUP



Chancen und Herausforderungen bei der Fertigung von Strukturguss-Komponenten in globalisierten Märkten

Opportunities and Challenges in the Manufacturing of Structural Cast Aluminium Components in Globalised Markets

Dr.-Ing. Andreas Hennings, Nemak Europe GmbH, Frankfurt

Abstract

Aluminium cast components experience a powerful growth driven by emissions legislation and related objectives to optimize the car weight. After powertrain components this growth and substitution has now also reached the area of structural components. With growing demands on component properties and part complexity cast components offer strong advantages by possible functional integration compared to classic solutions of steel and aluminium sheets or profiles. Here casted structural components find their logic for application based on technical advantages and added value by ensuring a competitive cost base versus sheet metal solutions. Already for some component families like shock towers cast components already offer a direct cost advantage over welded sheet metal solutions.

Challenges arise from high investments in new manufacturing sites, high quality requirements for structural components by a zero-failure strategy in the assembly plants, tight tolerance specifications, high target mechanical properties, need for retraceability of manufacturing parameters as well as application of different joining methods and logistic supply chains.

As a result a high level of process consistency and controlled process management in the foundry as well as along the production chain of the following secondary processes is mandatory. Due to their bulky size structural components should be manufactured close to the assembly plant thus requiring a global manufacturing strategy with several manufacturing locations per continent. All of these sites need to comply with globally uniform quality. Different labor cost structures and model volumes require different levels of automation and comprehensive process and logistics concepts to assure a fail-safe supply of these components into OEM's vehicle assembly plants.

This paper shows how Nemak as a globally positioned company addresses above challenges and opportunities. Topics discussed in the lecture are:

- Reasons for Growth of Al casted structural components and general requirements
- Steps from market entry to become a global partner
- Protection of global development programs and quality control
- Customized process chains to meet uniform quality objectives in different markets
- Innovation to meet increasing complexity and component requirements whilst reduction of manufacturing cost

1. Schritte vom Markteintritt zum globalen Partner für Strukturguss

Nemak als Lieferant für Leichtbau in Aluminium

Vor allem als Tier 1 Lieferant von innovativen Al-Leichtbaulösungen im Bereich Powertrain, speziell für Zylinderköpfe, Motorblöcke und Getriebegehäuse ist Nemak weltweit ein wichtiger Zulieferer. Ein wichtiger Wachstumsbereich für Nemak ist der Aluminium Strukturguss (**Bild 1**). Nemak entwickelt und fertigt komplexe Aluminium Bauteile in allen gängigen Gussverfahren wie Druckguss, Kokillenguss, Kernpaketverfahren und Sandguss und zeichnet sich durch ein hohes Maß an Legierungs- und Wärmebehandlungskompetenz aus. Innerhalb von 25 Jahren wuchs das mexikanische Unternehmen kontinuierlich zum weltweit größten Lieferanten für Aluminiumguss mit heute mehr als 20.000 Mitarbeitern. Nemak ist in 15 Ländern mit 36 Fertigungswerken präsent (**Bild 2**). Um von kurzen Logistik- und Qualitätsketten zu profitieren investiert das Unternehmen dabei strategisch in den Ländern, in welchen die OEM-Kunden Fahrzeuge bauen.

Markt für Strukturguss und Anforderungen an die Bauteile

Aluminium Strukturgussbauteile erfahren durch die Emissionsgesetzgebung und damit verbundenen Zielen zur Gewichtsoptimierung derzeit ein starkes Wachstum. Bei stetig wachsenden Anforderungen an Bauteileigenschaften und Komplexität bieten sie gegenüber klassischen Lösungen in Blech- oder Profilanwendungen aus Stahl oder Aluminium Vorteile durch mögliche Funktionsintegration. Bei einigen Bauteilen wie Federbeinaufnahmen bieten sich teilweise auch direkte Kostenvorteile gegenüber geschweißten Blechlösungen. Dennoch stehen Al-Gussbauteile vor allem bei Baureihen mit höheren Stückzahlen für Mittelklasse-Fahrzeuge in globalisierten Märkten im direkten Kostenwettbewerb.

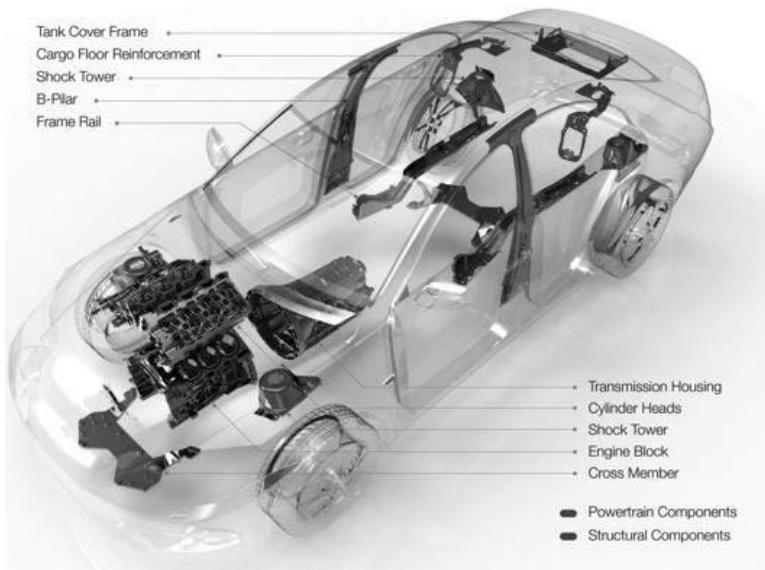


Bild 1: Nemak entwickelt innovative Leichtbaulösungen für Powertrain und Karosserie.

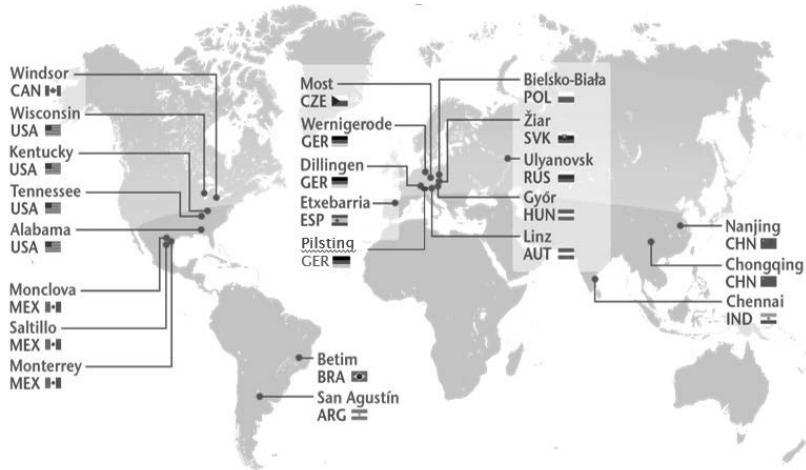


Bild 2: Nemak produziert global in 15 Ländern an 36 Fertigungsstandorten.

Die Erfüllung einer Nullfehlerstrategie der Fahrzeug-Montagewerke stellt eine konstant hohe Herausforderung dar. Qualitätsanforderungen an die Bauteile wie enge Toleranzvorgaben, hohe mechanische Zielkennwerte, Rückverfolgbarkeit von Herstellungsparametern, Bauteileignung für unterschiedliche Fügeverfahren und optimierte Logistikwege sind weitere kundenspezifische Anforderungen.

Diese Anforderungen bedingen ein hohes Maß an Prozesskonstanz und kontrollierte Prozessführung in der Gießerei wie auch entlang der Fertigungskette der folgenden Sekundärprozesse. Unterschiedliche Baureihenvolumen und Lohnkostengefüge entscheiden über den Automatisierungsgrad und entsprechend umfassende Absicherungskonzepte der Bauteilqualität. Automatisierung der wenig wertschöpfenden Sekundärprozesse wie Richten, Schleifen und Kontrollen ist für Strukturguss für höhere Volumeneinheiten bei Mittelklasse-Fahrzeugen eher wirtschaftlich als bei kleineren Stückzahlen im Premium-Segment. Wird in Hochlohnländern produziert, ist Automatisierung gegebenenfalls jedoch schon bei kleineren Stückzahlen sinnvoll. Aus Qualitätssicht trägt die Zwangssteuerung der Automatisierung jedoch dazu bei, ein konstantes Qualitätsniveau und Toleranzen reproduzierbar einzuhalten. Werden Bauteile in unterschiedlichen Märkten mit hohen oder niedrigen Lohnkosten gefertigt, so werden sie doch stets lokal mit demselben Qualitätsanspruch und global tauschbarer Qualität benötigt. Sind mehrere Werkzeuge und Vorrichtungen gleichzeitig im Einsatz oder liefern

mehrere Produzenten ein Bauteil in das gleiche Fahrzeug-Montagewerk so ist eine gute frühzeitige Abstimmung während der Entwicklungsphase insbesondere bzgl. der maßlichen Toleranzen zwischen den unterschiedlichen Bauteilquellen wichtig, da die Fahrzeugmontage nur auf eine gleichbleibende Bauteilgüte kalibriert werden kann.

Ein weitere wichtige Herausforderung liegt in der Lieferkette und Logistikkonzepten. Kleinere Bauteile wie z. B. Federbeinaufnahmen können ggf. über Stapelbarkeit in Standardverpackung auch über große Distanzen gegen Verformung abgesichert transportiert werden und somit in einem Umkreis von über 2000 km wirtschaftlich zum Endkunden produziert werden. Größere oder geometrisch komplexe Bauteile wie Längsträger werden aus Qualitätsgründen jedoch zumeist in Sonderladungsträgern transportiert, was Logistikkosten über größere Distanzen in Relation zum reinen Bauteilpreis negativ beeinflussen kann. Generell ist es aus Kosten- und Qualitätsgründen förderlich, einen möglichst hohen Umfang der Fertigungstiefe von Guss bis Oberflächenvergütung an einem Standort und im nahen Umkreis zum Fahrzeug-Montagewerk durchzuführen.

Markteintritt und Wachstum

Das absehbare Marktwachstum im Strukturgussbereich erfordert erhebliche Investitionen der Zulieferer in neue Fertigungskapazitäten in den unterschiedlichen Märkten Europa, NAFTA und China. Für Automobilhersteller ist daher eine solide finanzielle Basis des Zulieferers und Bereitschaft für zukünftige globale Investitionen ein wichtiges Entscheidungskriterium innerhalb einer verlässlichen Lieferantenstrategie. Nemak hat sich für das globale Druckguss-Wachstum in den Jahren nach der Übernahme von Druckgusswerken von Teksid und JL French in den letzten 3 Jahren durch den Bau weiterer neuer „Green Field“ - Werke in Indien, China, Brasilien und Russland positioniert. Zudem wurde in 2015 innerhalb weniger Monate ein Standort für Strukturguss- Sekundärprozesse in Bayern aufgebaut. Weiter wird aktuell für Strukturguss sind bei hoher Wachstumsdynamik in Mexiko und Osteuropa investiert.

Vor einer ersten Kundenbeauftragung für Strukturguss steht in aller Regel eine umfassende Lieferantenqualifizierung des Zuliefererunternehmens und Fertigungsstandortes, um Vertrauen in die technischen Fähigkeiten eines möglichen Lieferanten aufzubauen. Dazu muss das Unternehmen vor einer ersten Beauftragung zeitlich in erhebliche Vorleistungen gehen und in Prozesstechnik und Fachwissen der Mitarbeiter investieren. Zum Markteintritt ist zunächst anhand von Abgüsse eines Kundenwerkzeuges zu beweisen, dass man technisch in der Lage ist, Bauteile mit den kundenspezifisch hohen technischen Anforderungen herzustel-

len. Nach Kundenbeauftragung muss jedes neue Bauteil bei immer kürzer werdenden Entwicklungsphasen schrittweise über Baumusterstufen zur Serienreife mit dem Kunden gemeinsam befähigt werden.

2. Absicherung von globalen Entwicklungsprogrammen und Qualitätslenkung

Serien-Qualität beginnt mit der frühzeitigen Entwicklung von Produkten und Prozessen. Bei Nemak werden Kundenprogramme im Rahmen eines standardisierten Produkt-Entstehungsprozess (NPDS: Nemak Product Development System) im jeweiligen kompetenten Product Development Center (PDC) global entwickelt. Das PDC verantwortet die termin- und qualitätsgerichtete Bauteilentwicklung und Überführung der Bauteile in eine Serienproduktion. Das Produktionswerk verantwortet gleichzeitig die Anlagenplanung im Rahmen der Gruppenstandards und den notwendigen maschinellen und personellen Kapazitätsaufbau. Das PDC zeichnet sich dabei aus durch: fachlich geschulte Spezialisten mit vertieftem Prozesswissen, umfassenden Einsatz von CAD/CAE und Simulationswerkzeugen und serien-

HPDC Product Development Structural Components

Bielsko-Biala, Poland

Frankfurt, Germany

Employees:	45
Casting Simulation	Flow 3D, Magmasoft
CAD programs	CATIA 5, ProE, IDEAS, NX
CAE programs	Abaqus, Nastran, Hyperworks
Tool shop available	Maintenance and Tool Manufacturing



Key Competences

- **Product and Process Development on dedicated, full equipped 4000 t HPDC cell**
- **Technology transfer to other new Nemak Structural Components plants**

Product Development

Process Development

Program Management

Research & Development

Bild 3: Kernmerkmale des Product Development Centers (PDC) für Strukturguss

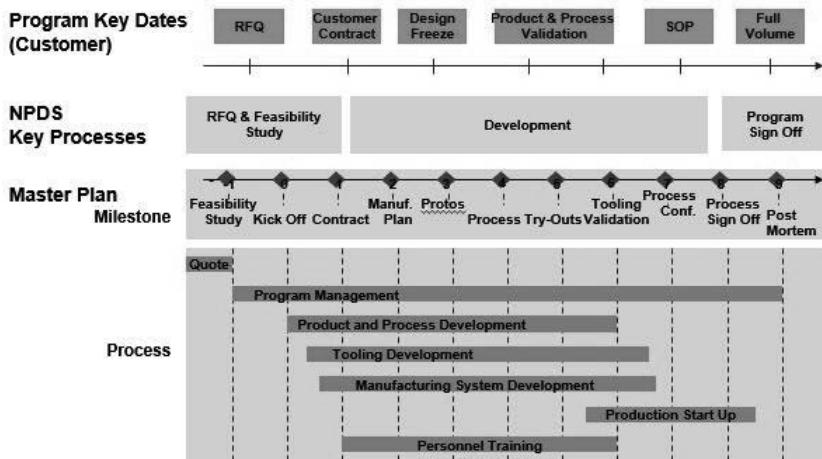


Bild 4: Das Nemak Product Development System NPDS garantiert strukturiertes Erarbeiten von zeitlichen und qualitativen Entwicklungszielen.

identischen, zur Bauteilentwicklung reservierten Fertigungseinrichtungen. Das Nemak PDC für Druckguss von Strukturbauten befindet sich am Produktionsstandort Bielsko-Biala, Polen mit einer Engineering Erweiterung in Frankfurt, Deutschland (Bild 3).

Das Nemak Product Development System (NPDS) garantiert ein frühzeitiges Erkennen und Lösen von Entwicklungshürden (Front Loading), sichert ein synchrones strukturiertes Erarbeiten von zeitlichen und qualitativen Entwicklungszielen und fördert die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Fachbereiche (Bild 4).

Durch das aktuell starke Marktwachstum erfordern neue Kundenprogramme zumeist auch den frühzeitigen Wissensaufbau und Einarbeitung neuer Mitarbeiter in den anspruchsvollen Herstellungsprozess für Strukturguss sowie individuelle Produkt- und Kundenstandards. Um einen erfolgreichen Produktanlauf global abzusichern, ist es bei Nemak etablierte Praxis Mitarbeiter des zukünftigen Fertigungsstandorts vom Beginn eines Entwicklungsprogramms an über längere Zeiträume in das PDC zu integrieren. Program-Manager und technisches Führungspersonal des designierten Fertigungsstandorts nehmen schon mehr als ein Jahr vor SOP aktiv unterstützend an der Bauteilentwicklung und Befähigung teil; später werden dann auch Mitarbeiter in den erfahrenen Standorten über mehrere Monate operativ geschult. Währ-

rend der Prozess- und Produktverlagerung vom PDC ins Werk begleiten Experten des PDC global vor Ort die Neuanläufe.

3. Angepasste Prozessketten für gleiche Qualitätsziele in unterschiedlichen Märkten

Die Fertigungskette von Strukturguss ist komplex und Bauteileigenschaften wie mechanische Kennwerte und Maßhaltigkeit werden durch mehrere Prozessfaktoren wie Legierung, Gussprozess und ggf. Wärmebehandlung gemeinsam beeinflusst. Die Ausprägung von Gussdefekten ist oftmals erst im Guss nachgelagerten Folgeprozess sichtbar. Aus Nemak-Sicht ist daher eine Durchführung von Guss und Sekundärprozessen, insbesondere Wärmebehandlung und Richten, am Gussstandort ein klares Ziel. Entlang der Prozesskette (Bild 5) sind neben Fehlervermeidungsprinzipien (Poka Yoke) unterschiedliche Kontrollen verankert, um zeitnah zur Fertigung die Qualität zu prüfen und Prüfergebnisse in geschlossener Informationskette kontinuierlich in die Fertigung zurück zu spiegeln. Die zu dokumentierenden Prüfungen des Kontrollplans sind zum einen durch die Lastenhefte der Kunden vorgegeben, werden aber basierend auf der Prozess-FMEA und Aufarbeitung von „Lessons Learnt“ durch interne Prüfungen ergänzt. Prüffrequenzen werden gemäß Kundenforderung und lokaler

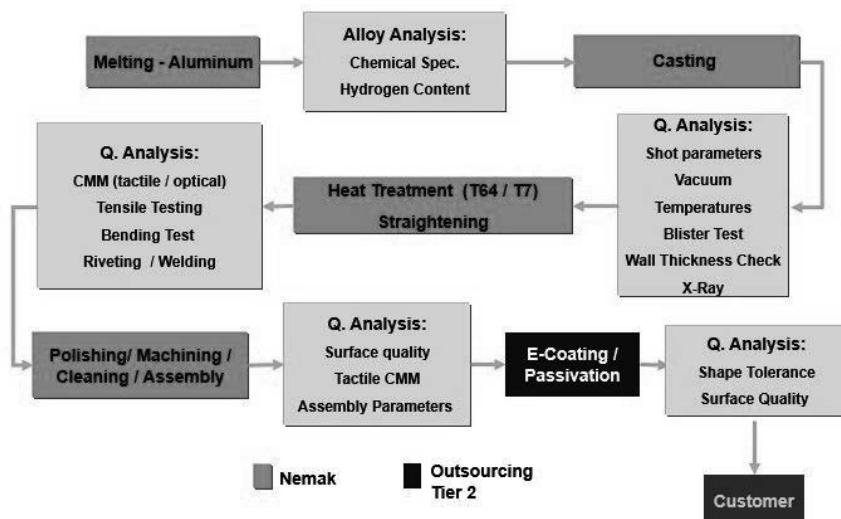


Bild 5: Standard Prozess und Qualitätsprüfungen für Strukturguss Bauteile aus AlSi9MgMn.

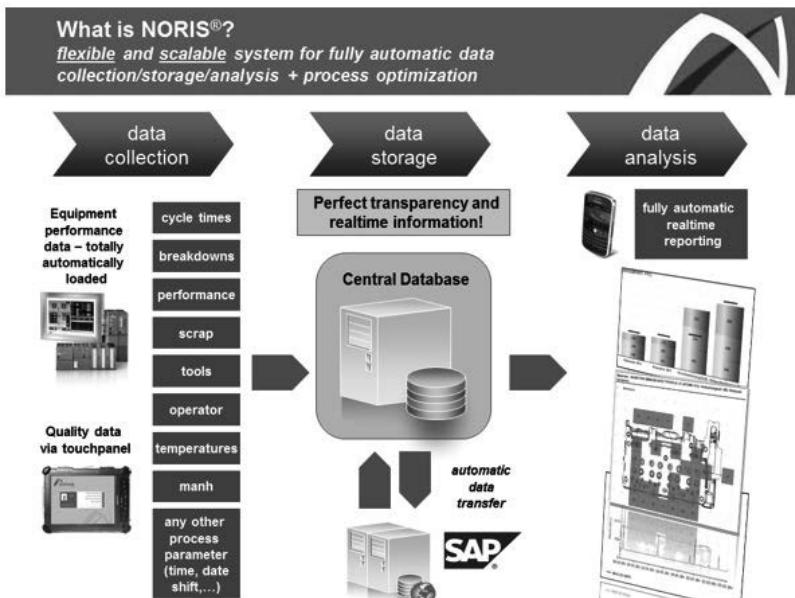


Bild 6: Über NORIS werden Prozessdaten gesammelt, gespeichert und analysiert.

Fertigungsanforderung festgelegt. Der wirtschaftliche Aufwand zur prozessbegleitenden qualitativen Absicherung von Strukturguss ist nicht unerheblich, vor allem wenn Prüfungen auch als Stichprobe bauteilzerstörend sind. Ob 100%-Prüfungen automatisiert oder manuell erfolgen, leitet sich wiederum aus Festlegung der Prüfmerkmale, Stückzahl und Lohnkostengefüge ab. Allgemeine Prozess- und Fertigungsstandards werden bei Nemak regelmäßig durch Aufarbeiten von Fehleranalysen und „Lessons Learnt“ weiterentwickelt. Einheitliche Gruppen-Standards werden in globalen Workshops der Bereiche für Produktion, Prozessplanung, PDC, F&E, Qualität und Einkauf gemeinsam erarbeitet und weitergetrieben.

Nemak gewährleistet eine Erfassung, Auswertung und langfristige Dokumentation der erheblichen anfallenden Mengen an Produktionsdaten über das betriebsinterne Datenerfassungssystem NORIS (Bild 6). Hierzu werden in jedem Produktionsschritt die Bauteile über einen Datamatrix Code erfasst und relevante Produktions- und Qualitätsdaten jedem Bauteil zu 100% rückverfolgbar zugeordnet. Ein Bauteil kann nur in einen Folgeprozess einfließen, wenn der vorherige Schritt mit entsprechenden Prozessvorgaben durchlaufen und positiv bestätigt wurde. Zu jedem Zeitpunkt ist in Echtzeit eine komplette Visualisierung des Warenbe-

standes in der Fertigungskette bezüglich Qualitätskenngrößen, Ausbringung und Produktivität möglich. Weiterhin kann mit NORIS intensiv „Data Mining“ betrieben werden und individuelle Analysen zur Prozessoptimierung angestellt werden. Auch können Daten von Dienstleistern wie z.B. bei externer Oberflächenbehandlung in NORIS integriert werden. Über eine SAP Anbindung findet ein Datenaustausch mit der internen Logistik und ggf. Kunden B2B-System statt.

4. Innovationen bei steigender Komplexität und Bauteilanforderung gegenüber zu erzielenden Einsparpotenzialen in der Fertigung

Um im Wettbewerb der Werkstoffe und Verfahren auch zukünftig zu bestehen ist eine kontinuierliche Steigerung der Bauteileigenschaften bei gleichzeitiger Realisierung wirtschaftlicher Einsparungspotenziale notwendig. Entlang der Prozesskette sind diverse Stellschrauben für Innovationen und Einsparpotenziale erkennbar. Forschung und Entwicklung (R&D) wird im Unternehmen global über den Nemak Innovation System (NIS) gesteuert. Im Rahmen vom NIS werden Technologie-Roadmaps für Produktgruppen Innovationsthemen identifiziert, Forschungsbedarfe priorisiert, Entwicklungsprojekte geplant, bewilligt, umgesetzt und Erfolge über Kennzahlen gemessen. Für R&D von Strukturguss arbeiten die in den PDC arbeitenden Mitarbeiter in Deutschland, Polen, Spanien, Canada, USA, Mexiko in einem engen Verbund und regelmäßigem Austausch.

Von Werkstoffseite werden Neuentwicklungen für höherfeste Legierungen erwartet, wobei in etablierten Legierungssystemen der E-Modul von Al-Legierungen eine physikalische Grenze darstellt. Alternative Al-Basislegierungen benötigen lange Entwicklungszeiten und Validierungen vor einem industriellen Einsatz. Dennoch sollte sich ein Konstrukteur in der Werkstoffwahl nicht allein von Festigkeit, Dehnung und E-Modul leiten lassen um Rückschlüsse auf eine Bauteilesteifigkeit abzuleiten, da diese auch im hohen Maße von der individuellen Bauteilgeometrie und Lastverlauf abhängt. Im Lastfall ist in bestimmten Fahrzeugbereichen gerade die homogenen reproduzierbaren Verformbarkeit des Bauteils gezielt ein Faktor der für Al-Guss spricht. Einsparpotenziale könnten durch eine zukünftige Marktverfügbarkeit oxidärmer Sekundärlegierungen realisiert werden, was gegenüber dem Einsatz von Primärlegierung auch erheblich der CO₂-Gesamtenergiebilanz zum Fahrzeug-Produktlebenszyklus zuträglich wäre.

Auf Kundenseite kann festgestellt werden, das die individuellen Produkt-Anforderungen und Standards der OEM in dem noch jungen wachsenden Markt teilweise noch recht unter-

schiedlich sind. Vorgaben der Bauteilentwickler variieren teilweise von Produkt zu Produkt und zwischen OEM. Dies gilt zum einen für Bauteileigenschaften und deren Prüfung sowie zum anderen auch für fertigungsgerechte Toleranzanforderungen und bearbeitungsgerechte Auslegung von Montage- zu Bearbeitungsbezugssystemen. Auch die Definition von Gussfehlern wie z.B. Blistern und Einschätzung ihres Einflusses ist nicht durchgehend konsistent von OEM zu OEM. Dies kompliziert die Produktbefähigung, erhöht Investitionen in Prozesse und Qualitätssicherung bei den Lieferanten und kann Mitarbeiter verunsichern wenn ähnliche Merkmale für unterschiedliche Kunden unterschiedlich definiert und zu bewerten sind.

Operativ in der Fertigung liegt viel wirtschaftliches Potenzial in einer frühzeitigen Produktionsplanung vor SOP mit guter Abstimmung vom Materialfluss über Kapazität und Zykluszeiten, geplante Losgrößen, Rüstwechsel, Bestandsführung und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten wie Logistikaufwand. Automatisierungskonzepte stellen eine weitere Stellgröße dar. Ungeplante manuelle und produktspezifische 100%-Qualitätsprüfungen sind ebenfalls mögliche Kostentreiber.

Im Druckgussprozess liegt erhebliches Wertschöpfungspotenzial in einer Sicherstellung konstanter Fertigungsparameter in der Gießzelle (Prozesssteuerung und Kontrolle, Störungsvermeidung, Gesamtanlageneffizienz). Formenpflege, Vorbereitung von Rüstwechseln (SMED) und vorbeugende Instandhaltung sind weitere Stellschrauben. Guss-Ausschussraten für Strukturguss liegen heute noch über denen einfacherer Al-Gussprodukte, was der höheren Empfindlichkeit der Bauteile im Guss gegenüber Prozessschwankungen geschuldet ist. Eine Verlängerung der Formenstandzeit z. B. über Optimierung von Formtemperierung, Gießkurve und Sprühprozess hat zudem direkten Einfluss auf das Ergebnis.

Eine Auslegung eines Wärmebehandlungsprozess welcher den Bauteilverzug minimiert kommt über reduzierten folgenden Richtaufwand direkt der Kostenstruktur zugute. Weiteres Potenzial kann legierungsbedingt durch Entfall oder eine bauteilspezifisch angepasste und energetisch effizientere Wärmebehandlung gehoben werden. Das Richten von Bauteilen gleicht nur Defizite der Wärmebehandlung aus und ist in diesem Sinne nicht direkt wertschöpfend.

Ein Verputzen und Schleifen von Bauteilen an Fügeflächen ist aufgrund des Verschleiß von Gusswerkzeugen unabdingbar, kann aber über vorausschauende Werkzeugkonstruktion und

Werkzeugpflege verringert werden. Eine flexible Prozessauslegung des Schleifens jeweils nach aktuell notwendigem Aufwand trägt ebenfalls positiv bei muss aber prozesssicher umgesetzt werden.

In der Bearbeitung entscheiden neben Grundentscheidungen bzgl. der CNC-Zentren (Einfach- oder Doppelspindler) und Fabriklayout die Wartungs- und Ersatzteilaufwände und vor allem Werkzeugkonzepte und Werkzeugwechselzeiten über Wirtschaftlichkeit.

5. Fazit

Der Markt für Aluminium Strukturguss wird in den kommenden Jahren weiter stark wachsen und globalisieren. Dies erfordert entsprechend dauerhafte Partnerschaften von OEM und Lieferanten um notwendige Investitionen zu tätigen. Liefertreue und Absicherung von konstant gleichbleibend höchster Bauteilqualität ist wichtigste Anforderung der Fahrzeugwerke an ihre Lieferanten. Strukturguss muss sich wirtschaftlich gegenüber Stahl und Aluminium-Bauteilen in Blech und Profil behaupten was Zulieferern kontinuierliche Anstrengungen zu Innovationen und Kosteneinsparungen abbedingt. Nemak stellt sich diesen Aufgaben durch erhebliche Investitionen in Standorte, Mitarbeiter und Innovationen um auch zukünftig ein verlässlicher strategisch wichtiger Partner seiner Kunden für Strukturguss zu sein.

Einsatz von Aluminium-Strukturgussteilen in weltweiten Fahrzeugprojekten bei Mercedes-Benz

Aluminum-Structural-Castings for Body-in-White Application at Mercedes-Benz worldwide

Dr.-Ing. **Marcel Pfitzer**, Daimler AG, Sindelfingen

Abstract

A modern hybrid-aluminum-lightweight body is at the moment the best compromise of functional and safety requirements on the one hand and weight reduction and cost effectiveness on the other hand. Such a lightweight body structure was used first time in high volume production for the C-Class worldwide at 4 plants. The body structure contains 7 aluminum structural die castings with a total weight of 19 kg per body.

To guarantee a smooth launch at all 4 plants worldwide within only 7 months the project was faced with several tasks and challenges. An international production network was set up and standardization of processes, tools, specifications and tests is one of the most important key factors for the project's success.

The GLC overtakes this effective lightweight body structure with some SUV-specific adaptations. Increased requirement concerning comfort and function for the new E-Class demand an advanced body structure. Both car lines are also produced worldwide. Therefore, the successful applied international production network idea and the standardization of the C-Class were transferred with project specific improvement.

1. Die neue C-Klasse im weltweiten Produktionsverbund

Die Rohbauentwicklung bei Mercedes-Benz basiert auf den drei wesentlichen Säulen Leichtbau, Sicherheit und Aerodynamik. Beim Leichtbau in Form von intelligentem Materialmix stellt die Aluminium-Hybrid-Bauweise aktuell den besten Kompromiss aus Funktions- und Sicherheitsanforderungen einerseits und der Gewichtsreduzierung sowie Wirtschaftlichkeit andererseits dar.

Dieses Aluminium-Hybrid-Leichtbaukonzept wurde in der neuen C-Klasse erstmalig in Großserie in einem weltweiten Produktionsverbund an vier Produktionsstandorten weltweit einge-

setzt. Durch den intelligenten und innovativen Leichtbau ist die Aluminium-Hybrid-Karosserie um etwa 70 kg leichter gegenüber einer herkömmlichen Fertigung aus Stahl.

Der Rohbau umfasst sieben Aluminium-Strukturgussteile mit einem Gesamtgewicht von über 19 kg pro Fahrzeug und einem Gewichtspotenzial von ca. 13 kg pro Fahrzeug.

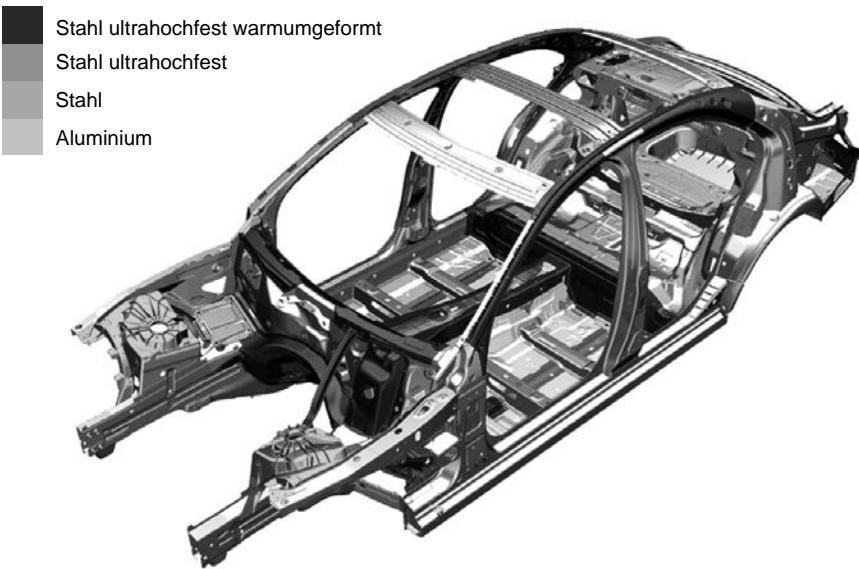


Bild 1: Umsetzung des Aluminium-Hybrid-Leichtbaukonzepts für die neue C-Klasse

2. Aufgaben und Herausforderungen

Um die sieben Aluminium-Strukturgussteile für den weltweiten Anlauf der neuen C-Klasse an allen vier Produktionsstandorten innerhalb von nur sieben Monaten termingerecht zur Verfügung stellen zu können, wurde ein internationaler Produktionsverbund installiert. Möglich wurde dies, indem die sechs Lieferanten auf einen gemeinsamen vereinbarten Standard für Prozesse, Werkzeuge, Vorgaben und Prüfungen zurückgreifen konnten.

Dadurch wurde auch ein Kreuzverbau ermöglicht, mit dem kurzfristige Kapazitätsspitzen abgedeckt werden konnten.

Die Herausforderungen des weltweiten Produktionsverbunds waren dabei vielfältig:

- Weltweite Verfügbarkeit von Strukturguss, d.h. Industrialisierung neuer Technologien und Prozessketten weltweit.

- Wirtschaftliche Umsetzung von Aluminium-Strukturguss in Großserie durch eine fertigungsgerechte Bauteilkonstruktion sowie Anwendung von robusten und effizienten Fertigungsprozessen.
- Qualifikation neuer Lieferanten und neuer Standorte ohne Strukturgusserfahrung in enger Zusammenarbeit von Entwicklung und Qualität sowie der lokalen Entwicklungs- und Qualitätsbereiche.
- Die enge Staffelung von vier SOPs innerhalb von nur sieben Monaten erfordert eine Überwachung des weltweiten Projektstatus und der Terminpläne.
- Drei Lieferanten für jede Sachnummer für vier Produktionswerke erfordern einen hohen Koordinationsaufwand und eine Abstimmung technischer und qualitätsrelevanter Themen in regelmäßigen Workshops mit allen Lieferanten.
- Der vier Produktionswerke hatten bisher keine Strukturgusserfahrung, d.h. Vielfalt und Komplexität in der Fügetechnik wachsen durch den Materialmix (Stanznieten, Flowdrill, Impact, Kleben). Ein Know-how-Aufbau bezüglich neuer Materialien und neuer Prozesse war erforderlich.
- Terminplanung der Freigaben, Werkzeuge, Anlagen, Bauteillieferungen auch unter Berücksichtigung der Transportzeiten für Teile und Werkzeuge.
- Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses von Normen, Vorgaben, Anforderungen mit Überarbeitung der internen Normen.
- Zeitverschiebung, Sprache, kulturelle Unterschiede, lokale Feiertage.

Um diese Aufgaben und Herausforderungen anzunehmen, wurde ein interdisziplinäres und internationales Projektteam aus Entwicklung, Qualität, Werkstofftechnik, Planung, Einkauf sowie der internen und den externen Gießereien drei Jahre vor dem erstem SOP installiert. In der frühen Projektphase lag die Verantwortung bei der Entwicklung, mit Serieneinführung ging die Verantwortung an den Qualitätsbereich über.

Als eine der wichtigsten Erfolgsfaktoren ist die gemeinsame Festlegung der technischen Umsetzung für das jeweilige Bauteil mit dem Lead-Lieferanten und die Umsetzung durch die weiteren Lieferanten sowie die enge vertrauensvolle Zusammenarbeit im übergreifenden Projektteam anzusehen.

3. Aluminium-Strukturgussteile im GLC und der neuen E-Klasse

Bei der Entwicklung der Rohbauten des GLC, als Nachfolger des GLK sowie der neuen E-Klasse galt es, die hohen Einleitungssteifigkeiten im Bereich der Achsanschraubpunkte zur

Aufnahme der dynamischen Fahrwerkskräfte sicherzustellen. Hierfür war die Lösung aus der C-Klasse bereits bekannt und erprobt.

So wurde für den GLC das Bauteilkonzept aus der C-Klasse weitgehend übernommen und für den Einsatz in einem offroad-tauglichen Fahrzeug weiterentwickelt. Die Bauteilgrößen und Bauteilfunktionen wurden im Wesentlichen beibehalten, jedoch an die fahrzeugspezifischen Lasten und Anforderungen angepasst. Das Gesamtgewicht der Aluminium-Strukturgussteile nahm dabei um rund 20 % zu.



Bild 2: Teilefamilie Aluminium-Strukturguss in der neuen C-Klasse und im GLC

Die neue E-Klasse erhielt ein weiterentwickeltes Heckwagenkonzept, das auf die funktionalen Anforderungen einer Oberklasse-Limousine abgestimmt ist. Gesteigerte Komfort- und Funktionsanforderungen ermöglichen eine weitere Funktionsintegration der Aluminium-Strukturgussteile. Dadurch bedingt nahm die Größe einiger Bauteile deutlich zu, das Gesamtgewicht der Aluminium-Strukturgussteile stieg gegenüber der C-Klasse um über 50 % an.

Da sowohl der GLC als auch die neue E-Klasse weltweit gefertigt werden, wurde das erfolgreiche Konzept des internationalen Produktionsverbunds aus der C-Klasse in der Grundstruktur übernommen, jedoch projektspezifisch weiterentwickelt.

Herausforderung automobile Großserie von Gussstrukturbauenteilen

Challenges in automotive high scale production of structural die casting

**Dr.-Ing. Andreas Gebauer-Teichmann, Dr.-Ing. Jens Röse,
Dipl.-Ing. Oliver Warnke, Volkswagen AG, Kassel**

Abstract

The objective of an energy-efficient production with increasing lightweight requirements necessitates a holistic view of product and process. The material- and process-specific design of the structural die castings in the product development process is crucial. Already the first considerations of cast part optimization and the design of the casting system determine success and failure. It is based on the casting process simulation that reveals significant component areas as well as improvement potentials concerning the mold filling. Another characteristic for a successful implementation of the lightweight strategy is a coordinated concept regarding the tool design and process parameters. For this purpose, important influencing parameters of spraying of the mold like external cooling and the separation effect are taken into account to design the internal mold cooling efficiently and reduce demolding forces by the use of customized tool coatings.

Abstract

Die Zielsetzung einer energieeffizienten Fertigung mit zunehmenden Leichtbauanforderungen verlangt eine ganzheitliche Betrachtung von Produkt und Prozess.

Ausschlaggebend ist die werkstoff- und verfahrensspezifische Auslegung der Gussstrukturbauenteile im Produktentstehungsprozess. Bereits die ersten Überlegungen hinsichtlich der gießtechnischen Bauteiloptimierungen sowie die Auslegung des Gießsystems entscheiden über Erfolg und Misserfolg. Grundlage ist die gießtechnische Simulation, die im Vorfeld signifikante Bauteilbereiche sowie Verbesserungspotenziale in der Formfüllung aufdeckt. Ein weiteres Merkmal für eine erfolgreiche Umsetzung der Leichtbaustrategie ist ein aufeinander abgestimmtes Konzept bezüglich der Werkzeugauslegung und Prozessparamet-

ter. Hierbei werden im Vorfeld wichtige Einflussparameter des Formsprühens wie externe Kühlung und Trennwirkung berücksichtigt, um die interne Formkühlung effizient auszulegen und die Entformungskräfte bei der Gussteilentformung durch maßgeschneiderte Werkzeugbeschichtungen zu reduzieren.

1 Prozesskette Entwicklung

Druckgussbauteile aus Aluminium spielen seit Jahren eine zentrale Rolle in der Leichtbaustrategie von Karosseriestrukturen. Ein entscheidender Faktor ist hierbei die Abbildung einer geschlossenen Prozesskette vom ersten Konzept bis zum einbaufertigen Gussteil. Bereits in der Anfangsphase müssen durch die gießtechnische Simulation Verbesserungspotenziale am Bauteil identifiziert werden. Besonders bei dünnwandigen Strukturauteilen ist neben der Lokalisierung von dickwandigen Materialanhäufungen eine ganzheitliche Betrachtung des Wärmehaushaltes in der Druckgussform notwendig. Im Fokus steht die Reduzierung von unerwünschten Bauteilverzügen sowie Verbesserungen im Gussgefüge. Hierbei werden erste Anhaltspunkte gewonnen, um die Kühlung innerhalb des Werkzeugs auszulegen und somit eine gleichmäßige Erstarrung und Abkühlung zu gewährleisten. Um spätere Richtvorgänge zu reduzieren, ist eine Simulation vom Gießen bis einschließlich der Wärmebehandlung bereits Stand der Technik. Damit das Bauteil seine gewünschten mechanischen Eigenschaften erhält, sind eine kontinuierliche Materialentwicklung und eine bauteilspezifische Anpassung des Wärmebehandlungsprozesses zur Erlangung der erforderlichen Crash-Eigenschaften notwendig.



Bild 1: Prozesskette Entwicklung

2 Konstruktive Bauteiloptimierung

Während bei dickwandigen Bauteilen wie zum Beispiel Zylinderkurbel- und Getriebegehäusen eher kurze Fließwege der metallischen Schmelze beim Formfüllvorgang vorliegen, muss die Schmelze bei dünnwandigen und großflächigen Strukturauteilen größere Wege zur Formfüllung zurücklegen. Die Folgen sind in der Regel ein hoher Temperaturverlust der metallischen Schmelze während der Formfüllung und die daraus ggf. resultierenden Kaltfließstellen mit einem Verbesserungsfähigen Gefüge sowie Lufteinschlüssen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Fließwege bereits in der Entwicklungsphase anhand der gießtechnischen Simulation konstruktiv zu bewerten. Bereits kleinere Turbulenzen beziehungsweise Wirbelbildungen in dünnwandigen Bereichen können später zu Beeinträchtigungen der Bauteilqualität führen.

3 Prozessoptimierung

Die komplexe Herstellung von Strukturauteilen erfordert neben der Bauteilentwicklung und gießgerechten Gestaltung weiterhin prozesstechnische Maßnahmen, um eine qualitäts- und kostenorientierte Produktion zu gewährleisten. Im Vordergrund stehen hierbei die Werkzeugkosten. Besonders bei den Strukturauteilen mit großen konturgebenden Bereichen innerhalb des Werkzeugs müssen bereits in der Entwicklungsphase kritische Bereiche mit hohen Fließgeschwindigkeiten identifiziert werden, um Maßnahmen zur Erhöhung der Werkzeugstandzeit einzuleiten. Eine entscheidende Maßnahme zur Optimierung der Werkzeugstandzeit ist die Beschichtung der konturgebenden Formoberfläche an stark durch Abrasion und Adhäsion gefährdeten Bereichen. Hierbei kommen sowohl borhaltige als auch kohlenstoffbasierte Hartstoffschichten zum Einsatz. Diese ermöglichen die Steigerung der Werkzeugstandzeit und somit der Bauteilqualität hinsichtlich von metallischen Anhaftungen auf der Formoberfläche. Die Beschichtung erfolgt in der Regel über die physikalische Abscheidung aus der Dampfphase (PVD) beziehungsweise die plasmaaktivierte chemische Abscheidung (PACVD). Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines beschichteten Werkzeugsegments.



Bild 3: Werkzeugbeschichtung, schematisch

Eine weitere Maßnahme, um die Werkzeugstandzeit zu erhöhen und die Bauteilqualität zu verbessern, ist der Einsatz des Mikrosprühens im Druckgussprozess. Im Gegensatz zum konventionellen Formsprühen werden beim Mikrosprühen Trennstoffmengen im Milliliterbereich appliziert. Als Trennstoff kommt ein hochtemperaturbeständiges, wasserbasiertes Trennstoffkonzentrat zum Einsatz, das unverdünnt auf die heiße Formoberfläche aufgebracht wird. Die Vorteile sind diesbezüglich die Einsparung von Wasser bei der Trennstoffapplikation, die Reduzierung des Thermoschocks auf der konturgebenden Formoberfläche und die Erzeugung eines hauchdünnen Trennfilms für eine bessere Bauteilentformung. Abbildung 4 stellt diesbezüglich eine Gegenüberstellung der Applikationstechniken dar. Neben den bereits erwähnten Vorteilen zeigt sich beim Mikrosprühen weiterhin, dass sich die Sprühzeit beim Mikrosprühen um 8 s reduzieren lässt. Die Reduzierung des applizierten Mediums beträgt unter diesen Versuchsbedingungen 97 % beim Mikrosprühen und bietet darüber hinaus auch einen ökologischen Vorteil im Gegensatz zum konventionellen Formsprühen.



Bild 4: Programmablauf der Applikationstechniken; links: konventionelles Formsprühen; rechts: Mikrosprühen

4 Fazit

Anhand der beschriebenen Beispiele konnten neue Wege gezeigt werden, komplexe Strukturauteile wirtschaftlich und ressourcenschonend herzustellen. Entscheidend ist hierbei eine geschlossene Entwicklungskette, um mögliche Verbesserungspotenziale bereits in der Konzeptphase frühzeitig zu erkennen. Die nächste Herausforderung wird für die bereits verfügbaren Simulationstools sein, den Einfluss der Temperatur über die gesamte Prozesskette abzubilden. Nur so können in Zukunft Werkzeuge und Prozesse den komplexen Konturen von Strukturauteilen angepasst werden.

Sand casting of security components: EPGS process

Dr.-Ing. **Antonio Maroto**, Cidaut Foundation, Boecillo-Valladolid, Spain

Abstract

The transport industry is striving to comply with ever more strict environmental regulations. Original equipment manufacturers (OEMs) count with several tools to face this challenge, among them, weight reduction is surely the most cross-sectorial and promising alternative.

In order to find a cost effective solution, Foundation CIDAUT began with the development of EPGS casting process, consisting of dozing molten aluminum in a sand mould produced with an automatic machine, by means of an ELMG pump in a countergravity way that allows flow velocity control, with a minimum variability from mould to mould at production rates.

Foundation CIDAUT focuses the development of new components from the point of view of Material-Process-Product, because any new casting technology has its own characteristics and products must be design taking into account these and the properties of the material obtained and involved in the new casting process.

Foundation CIDAUT has implemented this casting technology and this design methodology for casting security components for automotive market.

Introduction

Cidaut Foundation is a private research and development centre located in Spain. Although this company has its headquarters in Valladolid, it has offices in Barcelona, Ingolstadt and Puebla. Cidaut works for more than 400 industrial clients in six main fields: automotive, aeronautics, energy, environment, infrastructure and railway, being automotive the market of most of its customers.

Cidaut is divided in five main areas Energy, NVH, ITS, Safety and MPP (materials-product-process). The last one is formed by other departments; one of them is Light Alloys, which is focused on the development of new casting technologies, mainly for aluminium and magnesium foundries.

Since 1998, this department has been involved in casting processes: from simulation and micro-structural testing to the development of new technologies (Semisolid Casting, Bottom Pouring of Magnesium Alloys, EPGS, Metal Matrix Composites, etc).

During these 17 years, other two departments have been created from this first group: Electromagnetism and Automation. With these, it is possible to cover the whole industrialization process: from the concept idea to the final factory. This is one of the most important characteristics of this centre: it can cover the whole design cycle, taking into account all the main value chain players, from concept design, materials and prototype testing, product and process simulation, and industrialization set up.

One of the projects developed by this department resulted in the EPGS technology, which stands for Electromagnetic Pump Green Sand.

EPGS

EPGS is based on filling a green sand mould (made in a flaskless vertical automatic moulding machine) in a countergravity way with an electromagnetic pump.



Fig. 1: DISAMATIC

In a flaskless vertical automatic moulding machine, at the same time:

- One mould is being made
- In other mould, core are set
- One mould is being filled
- Hundreds of castings are solidifying
- One casting is being separated from its sand mould

This moulding technology has been used successfully during many years to cast steel and iron components and the main advantages are:

- It is a high productivity machine, the cycle time is given by the slowest step, not by adding the time needed in every step.
- The tooling (pattern) is never in contact with the molten metal, so its durability is very high, typically one million shots.

- The tooling cost is very low in comparison with big refrigerated metallic dies used in other aluminium casting technologies.
- It is very easy to use sand cores to get hollow and complex geometries.
- The pattern can be changed in some minutes, typically 5 minutes are enough to change it manually.

When the study of the aluminium components properties was began at Cidaut, the strong influence of gas and oxides inclusions on the mechanical properties (especially in the elongation) and on the leak tightness was found. Evidently, inclusions come from a turbulent flow, which is given by the Reynolds number. For a given flow, the lower the Re number is, the more laminar the flow will be. So, to avoid inclusions, this number must be as low as possible.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

In this formula, there are two fixed parameters:

- Density is given by the liquid, in this case molten aluminium with a density of 2,4kg/dm³.
- D is a characteristic dimension, in this case it is the diameter of the section which is being filled.

Therefore there are only two accessible parameters with which the Re number can be reduced, and consequently obtain a laminar flow. The available options are:

- Increasing the viscosity of the material: this is the principle of semisolid casting, which is one of the current developments at Cidaut
- Reducing the velocity: this is the principle of EPGS, to fill the sand mould very slowly. In security components casting, the EPGS filling velocity is much lower than 0,5m/s.

It is worth mentioning that this was not a new idea, although several companies have failed to implement it successfully. What has made Cidaut's development unique is that the whole casting process was designed starting from scratch and going all the way to study the processes and variables from the aluminium ingot to the final component solidification, without

limitations; the only requirement was that an automatic moulding machine (AMM) should be used.

The AMM main characteristic is its velocity to make moulds, as it produces one mould every 8 seconds. Another important factor is that nothing is known about the component until it cools down and it can be demoulded at the end of the moulding line.

Consequently the most important requirement was that every aspect and variable should always be the same, mould per mould, kilogram per kilogram. In other words, the design of every machine should assure repeatability and continue operation, never in batch.

If repeatability can be ensured, and the properties of the sand, the molten aluminium and the filling process can be periodically measured, it is possible to have a continuous assessment of the quality of the casting process.

The first task for design the new technology was the furnaces design. A melting and holding furnace was design together with one of the biggest European furnaces builders. The flow of the molten aluminium inside the furnaces was simulated, calculating the resting time, impurities floating time, etc. At the end of this research, a layout with a melting tower was defined along with a holding furnace and a dosing system between them able to avoid turbulent flow. It is important to highlight that thanks to this furnace design we are sure that every molten aluminium kilogram has had the same metallurgical treatment: the same resting time, degassing time, addition of strontium and titanium, etc. As a conclusion, measuring the chemical composition, the hydrogen level and the modification and refinement levels a constant quality can be assured, and corrections can be applied if necessary.

The second main task was to choose the filling technology able to fill the sand moulds at very slow velocities. Molten aluminium has such a low viscosity that it is impossible to achieve a laminar flow with gravity filling, so the only way to get such slow velocities is to fill the mould in a countergravity way, from the bottom to the upper part of the mould.

Electromagnetic pumps, mainly the magnetohydrodynamic pumps, present a lot of advantages to move molten aluminium because:

- There is no moving component in contact with molten aluminium

- Electromagnetic fields have no inertia, the pressure on the molten aluminium can be change instantaneously, adapting the pressure (and consequently velocity) to the section which is being filled in every instant.
- They are made of ceramic materials, so there is no contamination either with Iron, or with copper or with any other element of the molten aluminium.

Nevertheless, electromagnetic pumps presented a very big disadvantage: the lack of knowledge about these systems. This is one of the reason why an in depth study of the electromagnetic pump was carried out, as there was an important need to know exactly how the current and the magnetic field are achieved. This allowed to do a design of experiments (DOE) analyzing the effect of different elements and dimensions on the performance of the pump.

The pump is a channel formed by a sandwich of 4 different ceramic materials. This channel is filled with aluminium when the pump is immersed in molten aluminium.

This aluminium channel forms a wire, which is the secondary of a transformer. The primary is formed by a 1.000 wires coil, so the induced current in molten aluminium is one thousand times higher than the current in the primary.

Around the channel, there is a magnet producing a magnetic field perpendicular to the induced current. According to Lorentz law, a force, perpendicular to both the current (I) and the magnetic field (B), is induced in the molten aluminium. The force divided by the cross surface is the pressure induced in the liquid metal. This instant pressure is what must be converted in velocity in the aluminium.

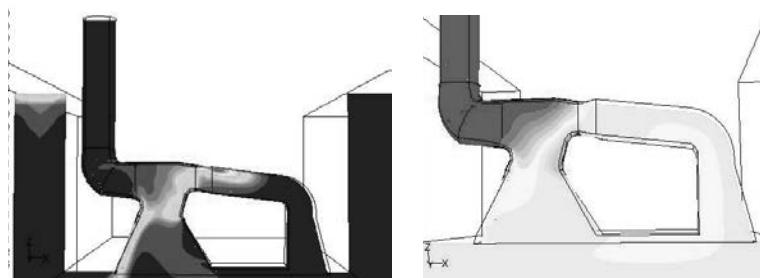


Fig. 2: ELMG PUMP Simulation: a) Velocity b) Pressure on the molten aluminium

Thanks to the developed knowledge, some improvements were done to current pump designs, such as selecting new materials for both the coils and electromagnetic cores with higher resistance to ageing at high temperatures. But the most important task on the development of the filling system was to design a completely new control of the pump, including temperatures of all the involved components and a strong carriage to be able to change the pump in minutes and the main point: how to calculate the current density needed to achieve the desired velocity. This control system needs to apply a current density into the primary of the transformer, which is, in turn, responsible for achieving the desired filling speed. The conversion of the velocity into pressure, and then into current density was the key for the success of the whole process.

The model used to calculate the pressure needed to fill every specific section of the casting takes into account the static height, the frictional and local losses of previously filled sections, the kinetic energy to get the desired velocity, the acceleration of the mass of molten aluminium in the mould and pressure to overcome the surface tension. The model is represented by next equation.

$$H_p = \text{Static} + \text{Friction Losses} + \text{Local Losses} + \text{Dynamic} + \text{Acceleration} + \text{Surface Tension}$$

$$H_p = Z_i + \frac{G^2}{\rho^2 \cdot g} \cdot \left(\sum_{j=1}^i \frac{\lambda_j \cdot l_j}{8 \cdot r_j \cdot S_j^2} + \sum_{j=1}^i \frac{K_j}{S_j^2} \right) + \frac{G^2}{2 \cdot g \cdot S_i^2 \cdot \rho^2} + \frac{dG_i}{dt} \cdot \frac{1}{\rho^2 \cdot g} \cdot \sum_{j=1}^i \frac{M_j}{S_j^2} + \frac{\sigma}{R_i \cdot g \cdot \rho}$$

Where:

H_p : total pressure or height (mmAl).

Z_i : height from the section "i" to the free surface of molten aluminium in the furnace

G : flow rate

ρ : density

g : gravity

λ_j : friction coefficient of filled sections

l_j : length of filled surfaces

K_j : local losses coefficient of filled sections

S_j : cross area of filled sections

S_i : cross area of being filled section

M_j : weight of filled sections

σ : surface tension

R_i : hydraulic radius

t_{SL} : time to pass

With this formula, the pressure (height) needed to achieve the desired flow rate in a section that is at a height (Z) can be calculated. It is possible to know the pressure needed (H) to obtain the desired flow rate (G) in every section. Thus the Filling Profile can be determined.

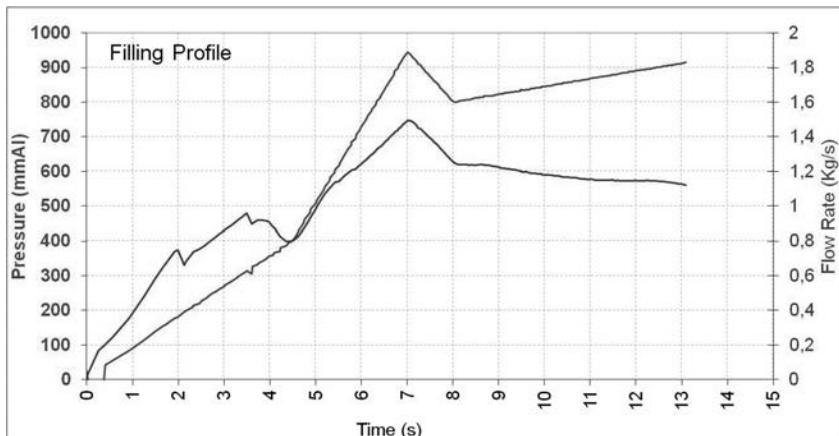


Fig. 3: Pressure and Flow Rate Filling Profiles

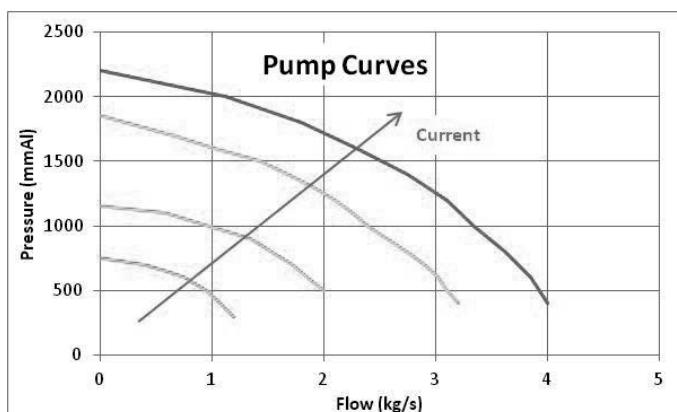


Fig. 4: Pump Curves: Pressure vs Flow

Thanks to having previously obtained the pump curves, the current needed in the pump can be calculated through the desired pressure and flow rate.

Finally, thanks to this knowledge of the pump performance, a Calibration Procedure was set up in order to be able to know quickly the performance of the pump and correct it if necessary. By way of this methodology, the variability of the filling time was reduced dramatically, in fact, currently, the Filling Time for a security component is $12,1\pm0,35$ s in the 92,99% of the moulds filled during every shift.

The three main systems: furnaces, pump and moulding machine must work together. This system integration was achieved thanks to different machine vision systems:

- One system is used to obtain a perfect alignment between the pump and the mould.
- Another system is used to measure the filling time in every mould. This value defines the performance of the pump and indicates if it is necessary to calibrate the pump.

It must be taken into account that every component has its own parameters, not only the filling profile, also the content of strontium and titanium, refinement and modifications levels and filling temperature, in order to achieve continuously the same casting quality, because the liquid aluminium properties have as much influence on the component quality, as the filling process.

To sum up, this is how a new robust and successful casting process was developed. This was the first step to cast security components with a high productivity process. The second step was to design them from the point of view of Materials-Product-Process.

Design Methodology

The OEMs, or their designers, do not want a specific geometry or a specific material properties, the root necessity they have is a product able to satisfy all the requirements in terms of recyclability, packaging, mechanical, NVH, etc performances with minimum weight and cost. That is the key of their necessities.

Any casting technology has its own characteristics, regarding maximum and minimum thicknesses, dimensional tolerances, draft angles, possibility to make hollow geometries or not, but also microstructure and mechanical properties.

Every component design is done taking into account the characteristics of commercial processes, so if a company introduces a new technology on the market, one of the most im-

portant tasks to be done is to show the market (in other words to designers) what is its new proposal for any component. This can only be done by experts who know the characteristics of the new technology: the developers of the new process.

This is the challenge that Cidaut began as soon as a deep knowledge of the characteristics of EPGS was acquired. It involved redesigning and manufacturing some prototypes showing the market how the components they needed could be made with this technology.

In order to reduce the development cost, which is the vision of this centre in any project, Cidaut has its own methodology characterized by:

- It covers the whole design cycle.
- It takes into account the design from the point of view of Material-Product-Process

The first step of this methodology is the analysis of requirements of the component (the product). Here, the most critical load case of the component is analyzed. This will occupy 80% of the simulation time and this will be the load case used to validate the performance of the whole product.

At the same time, it is necessary the measurement of the real properties of the material obtained in a given process. A full range of material properties is characterized, once per technology. In this step, the mechanical properties (static, dynamic and fatigue) of the material for different SDAS are measured. Besides, the rest of the materials involved in the process must be included in the analysis, testing other material parameters such as Heat Transfer Coefficient between the aluminium alloy and the sand mould, the Aluminium Fluidity and Sand Permeability.

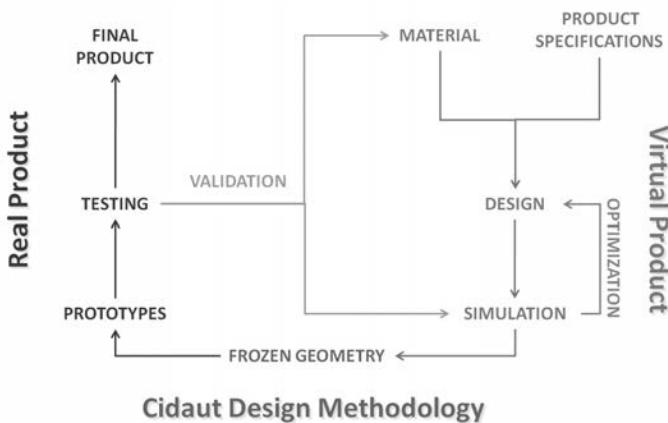


Fig. 5: CIDAUT's Design Methodology

Once the exact properties and requirements are known, the **design process** begins. In other words, some geometry concepts are done taking into account the limitations and mainly the possibilities of the technology (process).

The fourth and probably, the most important step, is the **simulation** of the component performance. Several design – simulation loops are done until the design fulfills the requirements. The exceptional feature of Cidaut's methodology is that any proposal is simulated both from the point of view of Process and Product.

In order to reduce the time –and consequently cost– of the simulation process and to analyze as many proposals as possible, this step is divided in two stages according to the next diagram.

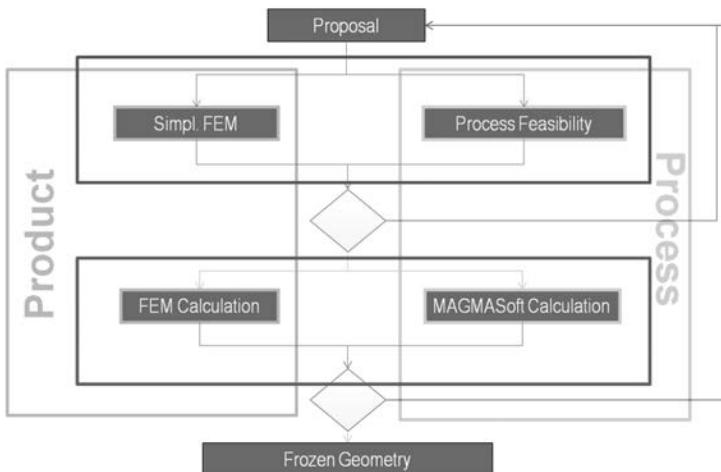


Fig. 6: Two Steps Simulation Methodology

As mentioned, any CAD version is simulated from product and from the process point of view.

From the product point of view, the most critical load case is simulated. This is called Simplified Simulation (Box "Simpl FEM"). Under Cidaut's capabilities stands the option of designing a customized test that submits the component to the defined critical load case, allowing the study of the component properties and its material behaviour up to its limits.

For example, in the case of suspension arms, a stretching test is used. The component will only pass the test if its elongation reaches its maximum value before breakage takes place.

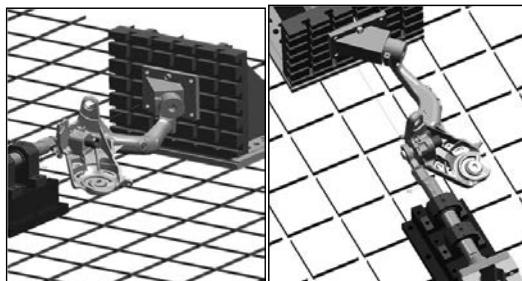


Fig. 7: Suspension Arm Testing Bench

At the same time, the feasibility of the CAD proposal from the point of view of the process is examined, analyzing thicknesses and draft angles (for casting and cores), predicting SDAS (which is the best indicator of the mechanical properties to be achieved) and hot spots (feasibility to feed shrinkage).



Fig. 8: Process Feasibility

When a CAD proposal is feasible from the product and process points of view, a longer simulation process begins, and again it is made from the point of view of both, product (FEM calculation) and process (Magmasoft Calculation). In this second simulation stage, every load case is simulated and gating and feeding system are optimized.

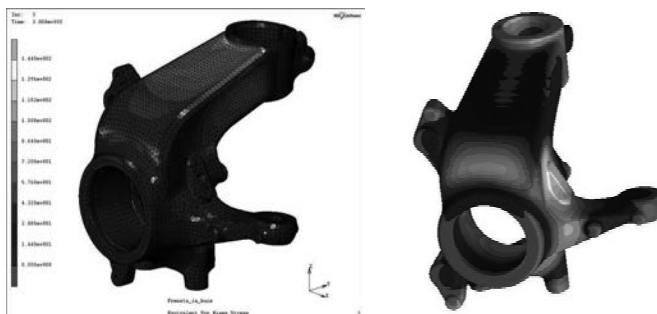


Fig. 9: Product-Process simulation

In every simulation loop, the maximum strength or elongation required is compared to the mechanical properties predicted with Magmasoft. Cidaut has its own in-house developed mathematical models for obtaining directly the Microporosity, the SDAS (what is one of the most important parameters in sand casting) and Mechanical Properties expected. These models we use are:

$$\text{Microporosity}(\%) = H \cdot G^{C_1} \cdot V_S^{C_2} \cdot t_{SL}^{C_3}$$

$$\text{Secondary Dendrite Arm Spacing} = C_4 \cdot t_{SL}^{C_5}$$

$$\text{Yield Strength} = C_6 \cdot G^{C_7} \cdot V_S^{C_8} \cdot t_{SL}^{C_9}$$

$$\text{Ultimate Tensile Strength} = C_9 \cdot H^{C_{10}} \cdot G^{C_{11}} \cdot V_S^{C_{12}} \cdot t_{SL}^{C_{13}}$$

$$\text{Elongation} = C_{14} \cdot H^{C_{15}} \cdot G^{C_{16}} \cdot V_S^{C_{17}} \cdot t_{SL}^{C_{18}}$$

Where:

- H : parameter depending on the hydrogen content.
- C_1 to C_{18} are empirical constants for a specific foundry (alloy, metallurgical treatments, material mould, heat treatment, etc). Due to confidentiality, we cannot show the data for EPGS technology.
- G : temperature gradient
- V_S : solidification rate
- t_{SL} : time to pass from liquidus to solidus temperature

The main objective of these simulation loops is to obtain a geometry able to satisfy all specifications but with minimum weight. The following table shows the 14 weight optimizations made on a suspension arm, obtaining a total reduction of 0,73kg (11,5%) in a component with an initial weight of 6,3kg.

Table 1: List of weight optimizations

ZONE	WEIGHT REDUCTION(Kg)
1	0,144
2	0,059
3	0,019
4	0,112
5	0,028
6	0,090
7	0,009
8	0,008
9	0,016
10	0,042
11	0,015
12	0,011
13	0,027
14	0,150
TOTAL (Kg)	0,731

In other cases a much higher weight reduction has been achieved, for example, in a differential housing made initially in Iron, the weight evolved from 12,4kg (Iron) to 5,9kg (Aluminium).

Once the design is frozen, prototypes are manufactured in order to:

- verify the design, the material properties and the fulfilment of product requirements
- validate both our **process** and **product** simulation software.

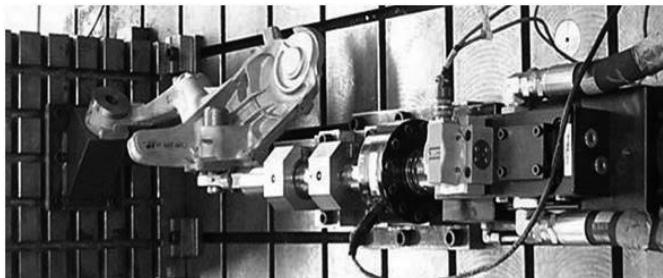


Fig. 50: Suspension Arm real Bench test

Other predictions are also validated, such as porosity (X-Ray inspection), microstructure (SDAS) and mechanical properties, as shown in following table.

Table 2: Properties predicted and obtained in a security component

	Predicted	Obtained
SDAS (μm)	30,02-33,27	31,2
Yield Strength (MPa)	210	222,39
Elongation (%)	5	6,44

The main difference of our design methodology is the confidence on our simulation software, given by the continuous validation. Any simulation software is a big calculator, the main difference in the results is how realistic are the data introduced on them.

Conclusion

EPGS is a new technology that can be applied, among others, to the automotive market. During the last seven years, rear suspension arms have been, among the list of parts, produced without any technical problem. Furthermore, several OEMs have tested these components and have confirmed the results published in this article.

Any casting process has its own characteristics and this means that products must be designed taking into account the technology and the real properties of the materials involved and obtained by the process.

The team responsible of the development of the technology and responsible of the redesign of the components (which include suspension arms, steering knuckles, steering housings, subframes and several differential and transmission housings) had no experience either in foundry or in production for the automotive market. Nevertheless this team has been able to design components and manufacture them continuously without technical or quality problems and showing the market the possibility to predict the properties and performance of the components. This team has been able to do it applying the design methodology of Cidaut based on knowledge and validated simulation.

Bibliography

- [1] DISAMATIC Sand Moulding System. Application Manual, 1996.
- [2] Crespo A. "Mecánica de Fluidos" Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Sección de Publicaciones 1989.
- [3] Campbell J. "Castings" 2^a Edición, Butterworth -Heinemann 2003.
- [7] "ASM Handbook, 15, Casting", ASM Internacional, 1988.
- [6] ASM Speciality Handbook, "Aluminium and Aluminium Alloys" ASM International, 1993.
- [7] Cuesta R., Delgado A., Maroto J.A., Mozo D. "Numerically Modeling Oxide Entrainment in the Filling of Castings: the Effect of the Weber Number" JOM, 2006; 58 (11), pp. 62-65
- [8] Cuesta R., Maroto J.A., Moríñigo D., Castro de I., Mozo D., "Water Analogue Experiments as an Accurate Simulation Method of the Filling of Gravity Castings" Transactions of the American Foundrymen's Society, 2006; 114, pp. 137-150.

Giessverfahren für Fahrwerks- und Chassisbauteile Produkt - und Prozessoptionen und -potenziale

Casting Processes for Suspension and Chassis Parts Product and Process Options and Potential

Dr.-Ing. Heinrich Fuchs, Dr.-Ing. Achim Egner-Walter,
Martinrea-Honsel Germany GmbH, Meschede

CONTENT

Series Production Processes for Suspension and Chassis Parts

Example Parts

Development Process

Process related Properties: Features/Materials Properties

Potential: Material/Processes

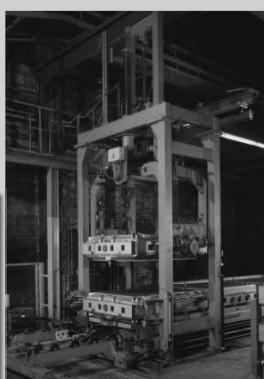
CASTING PROCESSES FOR ALUMINIUM COMPONENTS

	Schematic	Typical Alloys	Complexity/ Wall Thickness
Sand Casting		AlSi7Mg [T6]	All degrees of freedom/ min. 2 mm
Permanent Mould Casting		AlSi7Mg [T6]	All degrees of freedom/ min. 4 mm
Low Pressure Die Casting		AlSi7Mg [T6]	All degrees of freedom/ Target min. 3,5 mm
High Pressure Die Casting		AlSi10MnMg [T6] AlSi10Mn [F]	Only limited inner cavities/ min. 2 mm

GREEN SAND CASTING

Georg Fischer DISA
pressure pulse Compression
up to 40 flasks/h

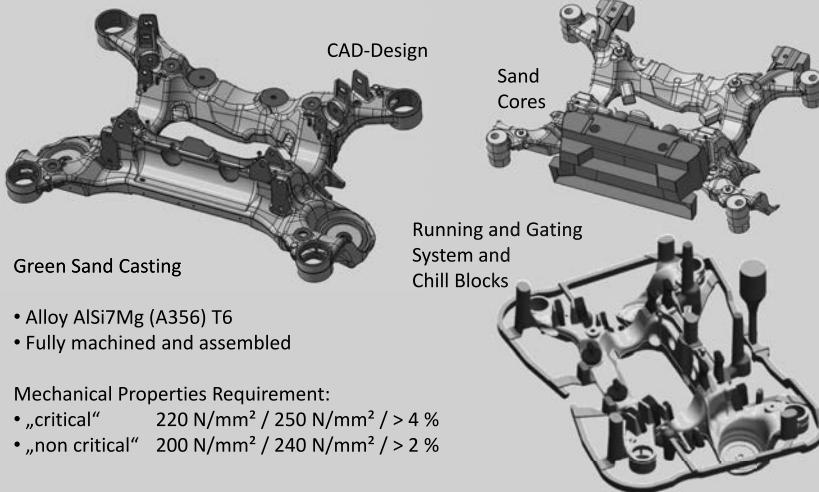
Flask size :
L = 1460 mm
W = 1060 mm
H = 2 x 400 mm



Green Sand Casting

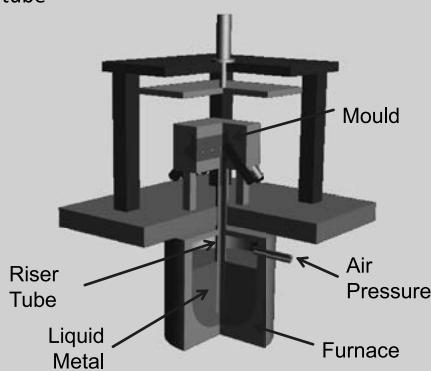
Alloy: EN AC AlSi7Mg T6
Dimensions: 1188 x 805 x 332 mm³
Weight: 28,5 kg
 $R_{p0,2}$: ≥ 220 N/mm²
 R_m : ≥ 250 N/mm²
 A_s : $\geq 2-4$ %

REAR SUBFRAME: CASTING – CORE DESIGN – CASTING SYSTEM



LOW PRESSURE DIE CASTING MACHINE AND PROCESS

- Pressurisation of the melt surface to control the melt flow in the riser tube
- Low turbulence fill via riser tube
- Controlled fill velocity
- Potential for low wall thickness
 - current: 3,5 mm
 - potential: ≥ 2,5 mm
- Controlled solidification
- Full process control
- Optimum conditions for superior mechanical properties
 - high YS and UTS
 - high Elongation and Ductility



LOW PRESSURE DIE CASTING MACHINES



Development Unit

Production Facility
for Knuckles and
lower Control Arms

HOLLOW REAR LOWER CONTROL ARMS AND KNUCKLES



Product:	Rear Lower Control Arm	
Process:	Low Pressure Casting	
Alloy:	EN AC-42100	
Dimension:	540 x 380 x 210 mm	
Weight:	5,18 kg	
Mechanical properties:	Rp0,2	220 MPa
	Rm	250 Mpa
	A5	4 %

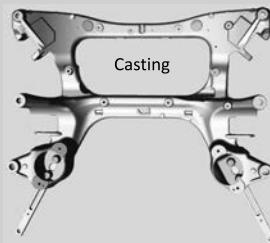


Product:	Knuckle	
Process:	Low Pressure Casting	
Alloy:	EN AC-42100	
Dimension:	355 x 308 x 248mm	
Weight:	4,78 kg	
Mechanical properties:	Rp0,2	220 MPa
	Rm	250 Mpa
	A5	4 %

LPDC FRONT SUBFRAME

Integral Casting – Inorganic Core
 Weight Sand Core: 20,5 kg
 Weight Casting: 17,4 kg
 Dimensions: ca. 930 x 650 mm²
 Wall Thickness: min. 4 mm

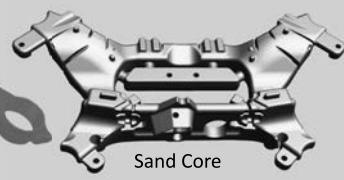
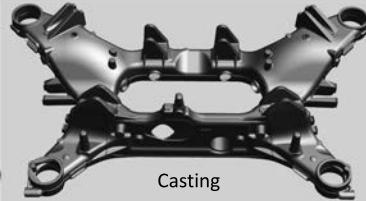
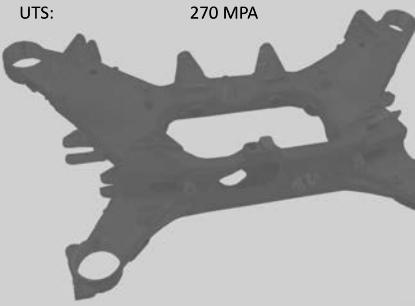
Elongation : 5 %
 YS: 210 MPa
 UTS: 270 MPa

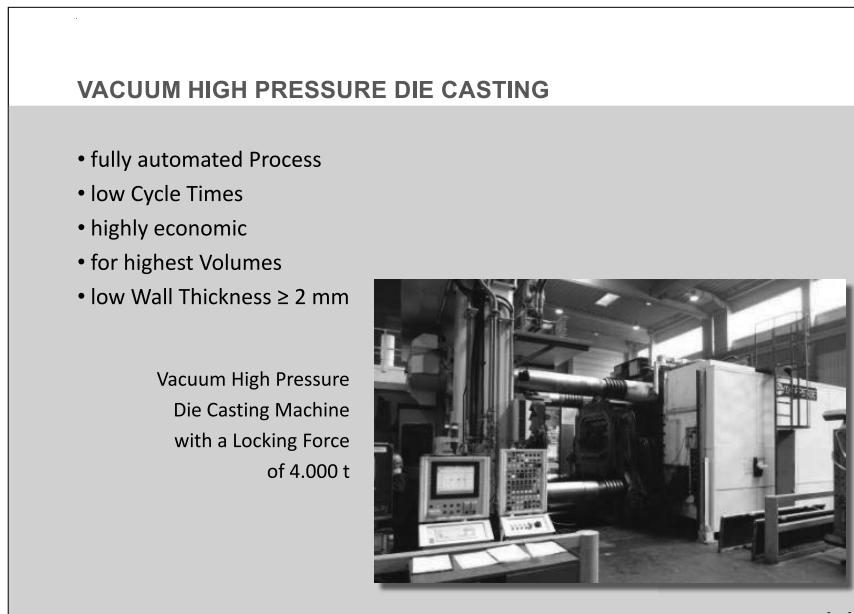
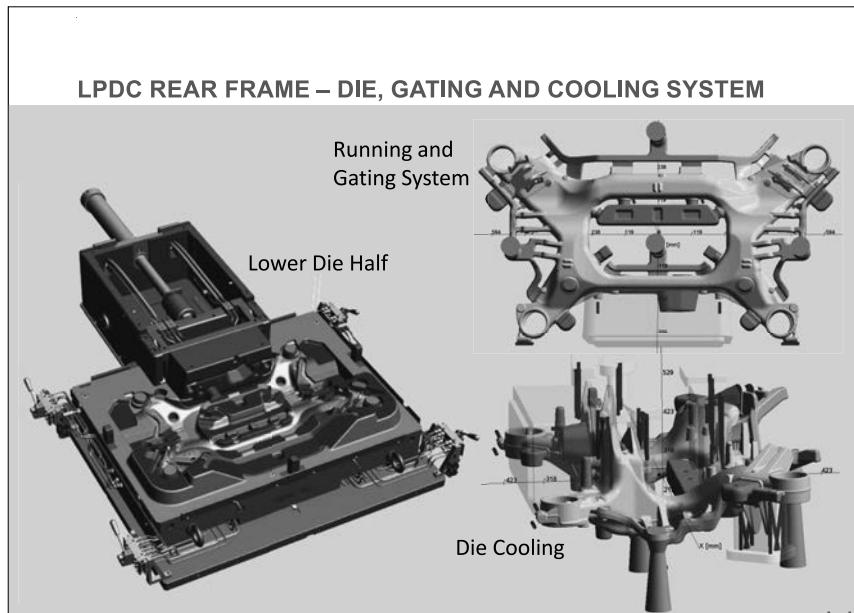


LPDC REAR SUBFRAME

Integral Casting – Inorganic Core
 Weight Sand Core: 43,5 kg
 Weight Casting: 22,3 kg
 Dimensions: ca. 1200 x 630 mm²
 Wall Thickness: min. 4 mm

Elongation : 5 %
 YS: 210 MPa
 UTS: 270 MPa

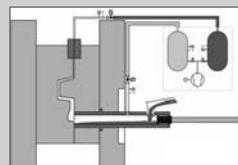




VACUUM HIGH PRESSURE DIE CASTING

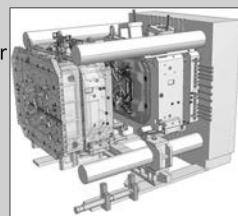
Basic principle of vacuum process

Pfeiffer process adapted to MRH requirements



Die for Vacuum HPDC Subframe

- Vacuum capable die $p_i < 50-100$ mbar
- Sliders possible
- Machine 3000 – 4000 t lockings force



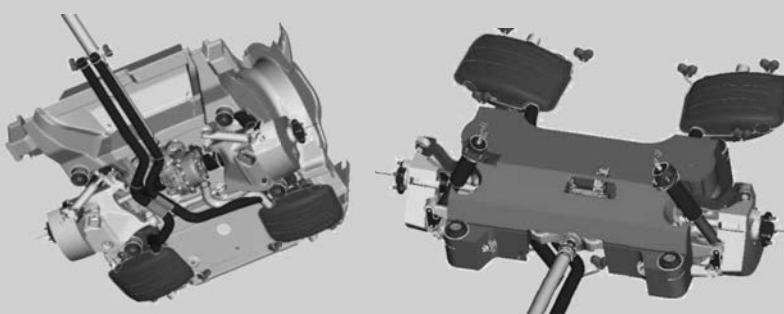
Vacuum HPDC Front Subframe

Alloy:	EN AC-AlSi9MgMn T4
Dimensions:	933 x 560 x 217 mm ³
Weight:	9.5 kg
$R_{p0,2}:$	135 – 145 N/mm ²
$R_{m1}:$	≥ 240 N/mm ²
$A_S:$	≥ 6.5 %

DEVELOPMENT OF COMPONENTS BASED ON PACKAGE, LOAD DATA AND ENGINEERING SPECIFICATIONS

Package

Build Space

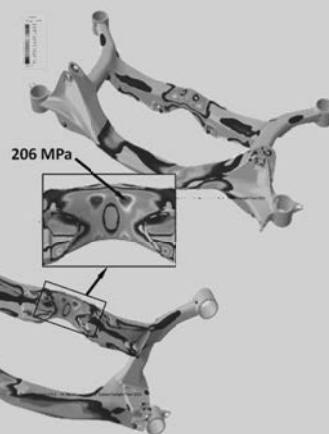


VIRTUAL DEVELOPMENT – ANALYSIS: CAST REAR SUBFRAME

Topology Optimization

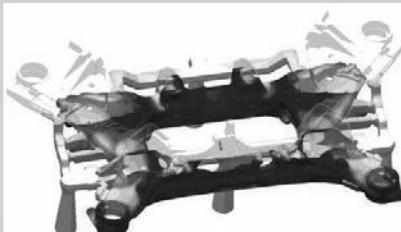


FEA Analysis: Load Case vertical Shock

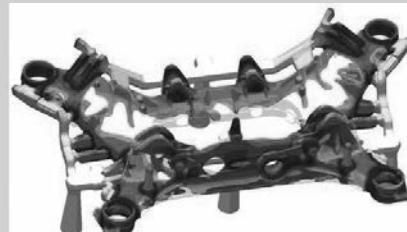


FILL AND SOLIDIFICATION SIMULATION REAR SUBFRAME

Fill Simulation



Solidification Simulation





STEEL VS INTEGRAL ALUMINIUM CASTING

Steel was 14,2 kg

Reduce wall thickness to 4 mm (4,5 mm locally)

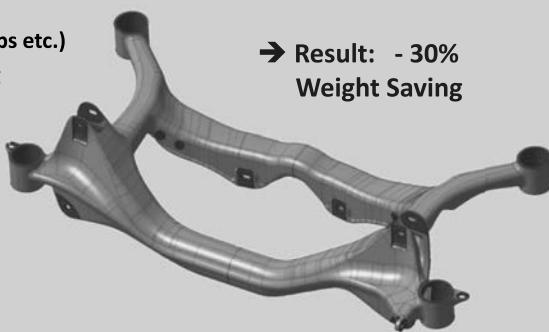
→ 8,0 kg (8,7 kg)

Further Step:

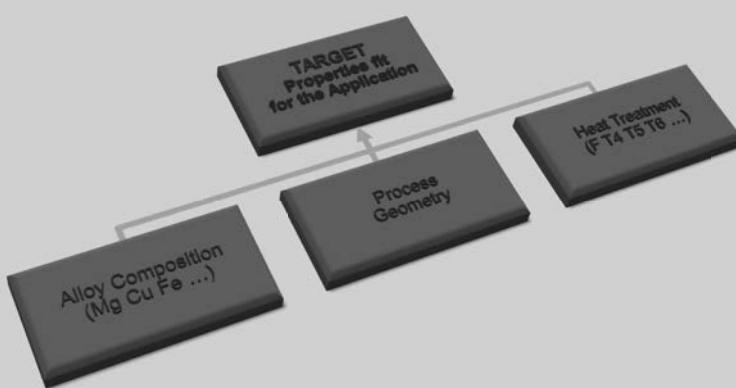
Optimise Stiffness (Ribs etc.)

→ 9,5 - 10 kg

→ Result: - 30%
Weight Saving



MATERIALS DEVELOPMENT OPTIONS



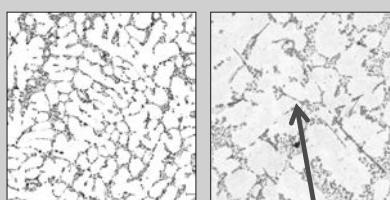
CASTING PROCESSES – TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

	Schematic	Typical Alloys	Typical mechanical Properties
Sand Casting		AlSi7Mg	200/240/4 (T6)
Permanent Mould Casting		AlSi7Mg	220/260/6 (T6)
Low Pressure Die Casting		AlSi7Mg	240/280/7 (T6)
High Pressure Die Casting		AlSi10MnMg	150/200/8 (T6)

INFLUENCE FACTORS ON MECHANICAL PROPERTIES OF CASTINGS

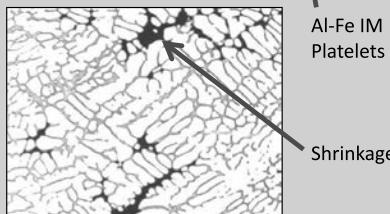
Microstructure

- Grain size
- Phases and Phase Composition



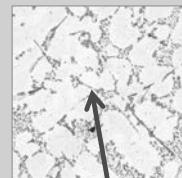
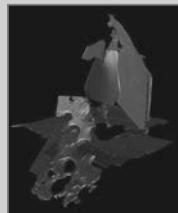
Defects

- Gas porosity
- Shrinkage porosity
- Oxide inclusions
- Impurities
- Cold flows



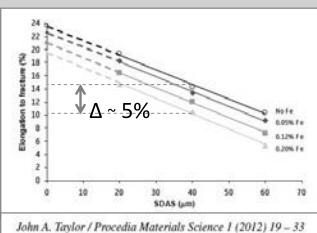
INFLUENCE OF FE CONTENT ON MECHANICAL PROPERTIES

Shape of Aluminium Iron Intermetallics



Al-Fe IM
Platelets

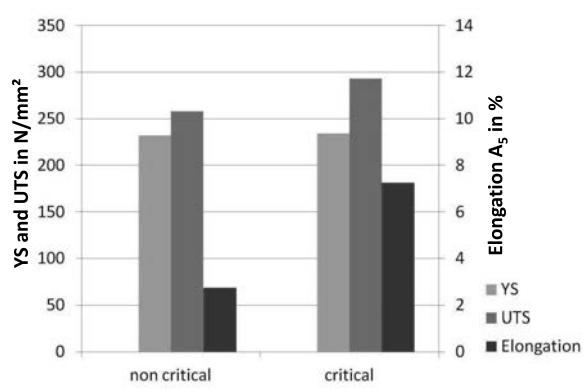
Influence on Elongation



MECHANICAL PROPERTIES GRAVITY SAND CAST

REAR SUBFRAME

Average Values
from critical and
non critical Areas
of the Frame²

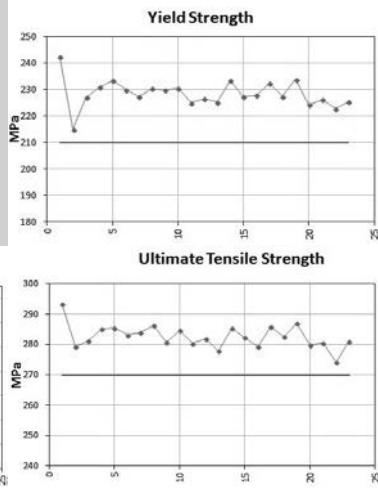


MECHANICAL PROPERTIES LOW PRESSURE DIE CAST REAR SUBFRAME

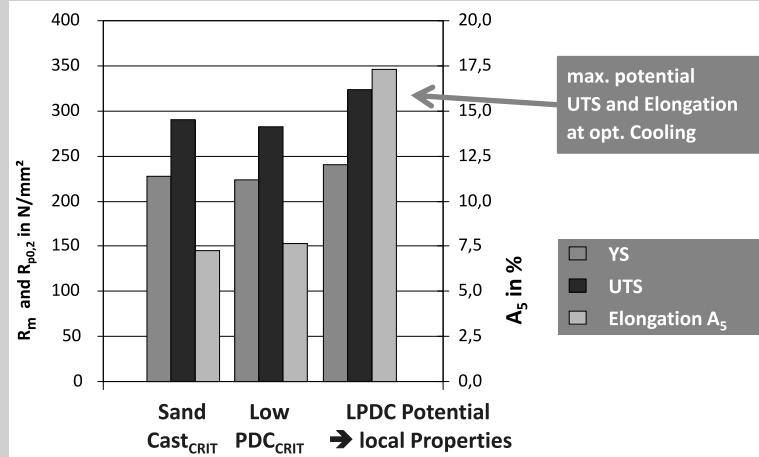
Values from different Sample Locations of Casting

Average Values:

YS: 228 MPa
 UTS: 282 MPa
 Elongation: 7,5%

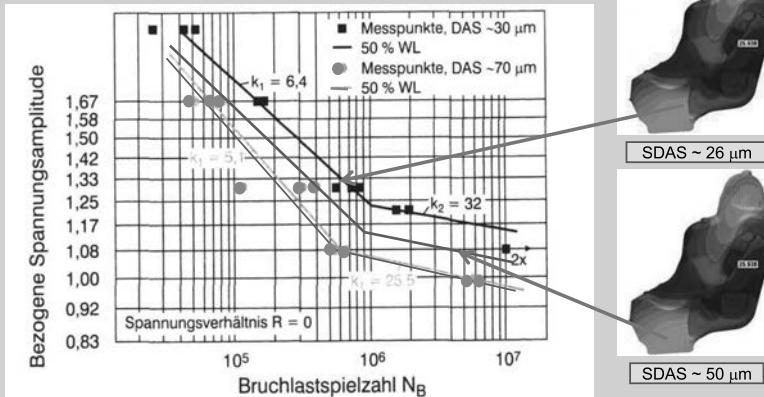


MECHANICAL PROPERTIES ALSi7MG COMPARISON



EFFECT OF LOCAL SOLIDIFICATION TIME ON FATIGUE LIMIT

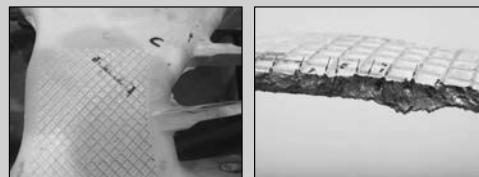
X760 Knuckle



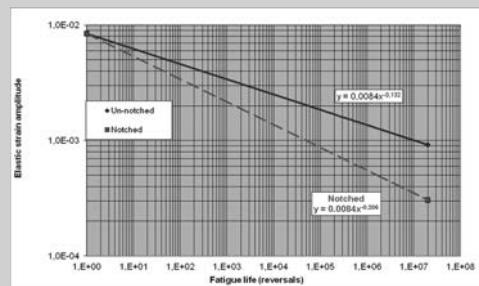
aus: Minichmayr, R.; Eichsleider, W.: Lebensdauerberechnung von Gussbauteilen unter Berücksichtigung des lokalen Dendritenabstands und der Porosität". Gießerei 90 (2003) Nr. 5, S. 70-75

EFFECT OF CROSS HATCHING ON FATIGUE DEFECTS

Crack Initiation in
Cross Hatching of
Subframe



Elastic Strain
over cyclic Reversals
cross hatched vs non
hatched Samples



SEMI QUANTITATIVE COMPARISON OF PROCESSES

	Sand	Low Pressure Permanent Mould	High Pressure
Complexity	+++	++	+
Static Mechanical Properties (overall)	++	+++	+
Fatigue Properties	++	+++	+
Productivity	++	++	+++
Cost	+	++	+++
Process Stability and Control	+++	++	++
Environmental Friendliness	+	++	+++

SUMMARY

- The available Casting Processes for Suspension and Chassis Parts allow a wide Range of Options for the Designer and Customer
- The Choice of Process depends on commercial and Performance Considerations
- The Geometrical Options are connected with the chosen Process
- The Mechanical Properties are also connected with the chosen Process
- There is plenty of Scope for further Performance Optimisation of Suspension and Chassis Parts by:
 - Design and
 - Mechanical Property Improvements

Entwicklung von bionisch gestalteten Gussteilen für Fahrwerk und Karosserie

Dipl.-Ing. (FH) **Stefan Hess**, Dipl.-Ing. **Stephan Philipp**,
Fischer Automotive AG, Schaffhausen, Schweiz

Agenda

- Zahlen und Fakten
- Verfahren / Prozess
- Werkstoff
- Design & Funktion
- HPDC Bauteile



Übersicht Georg Fischer

Georg Fischer AG: drei Geschäftszweige

GF Piping Systems
GF Automotive
GF Machining Solutions

Zahlen und Fakten

Gegründet: 1802
Konzernsitz: Schaffhausen (Schweiz)

124 Werke in 32 Ländern
Gelistet an der Schweizer Börse
Seit über 210 Jahren unabhängig

Mitarbeiter: 14.000
Umsatz 2014: 3.8 Mrd. CHF



GF Automotive

- Produktion von Leichtbau Gusskomponenten und Systemen
- Hergestellt aus:
 - Eisenguss
 - Aluminium-, Magnesium-Druckguss
- Für die globale Automotive Industrie und andere industrielle Anwendungen



1 415

Mio. CHF Umsatz

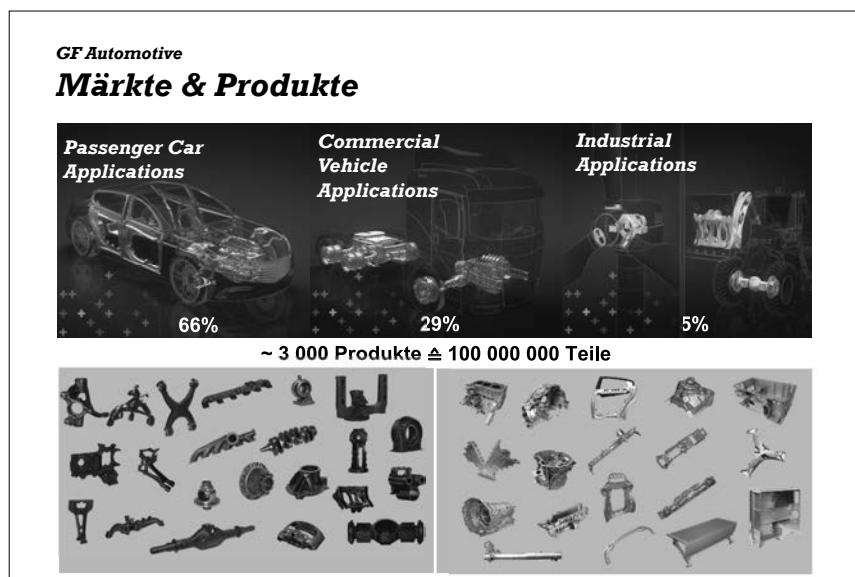
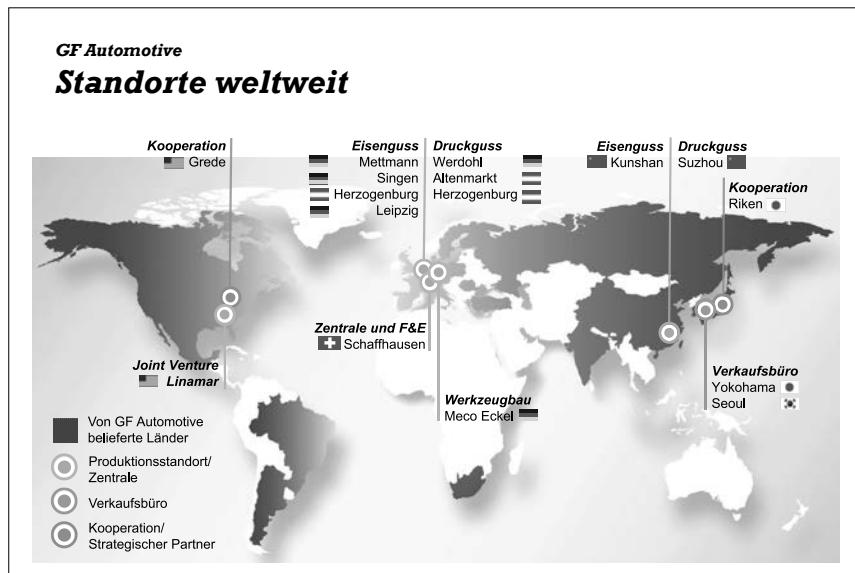
4 898

Mitarbeiter

10

Standorte weltweit

Zahlen für 2014



GF Automotive

Was treibt uns an?

- Wachsende Fahrzeugbestände



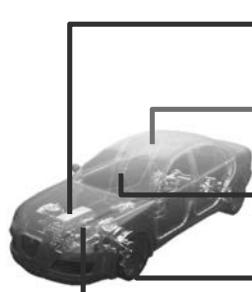
- Problematik CO₂-Emissionen

- CO₂-Strafsteuer

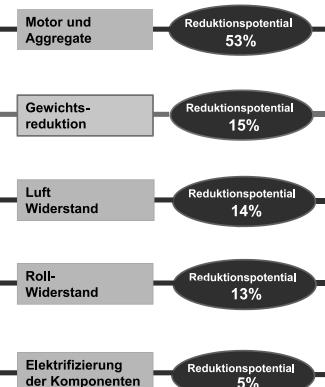
- Endliche Ressourcen

GF Automotive

Haupthebel zur CO₂ Reduktion



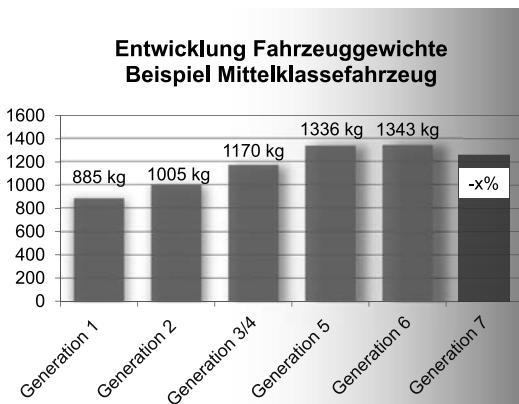
CO₂ Reduktion von 35 g/km von 130 g/km in 2015 nach 95 g/km in 2020



Source: Volkswagen AG, vehicle weight 1'300 kg

GF Automotive

Motivation Leichtbau



GF Automotive

Leichtbau Ansätze

Werkstoff-Leichtbau

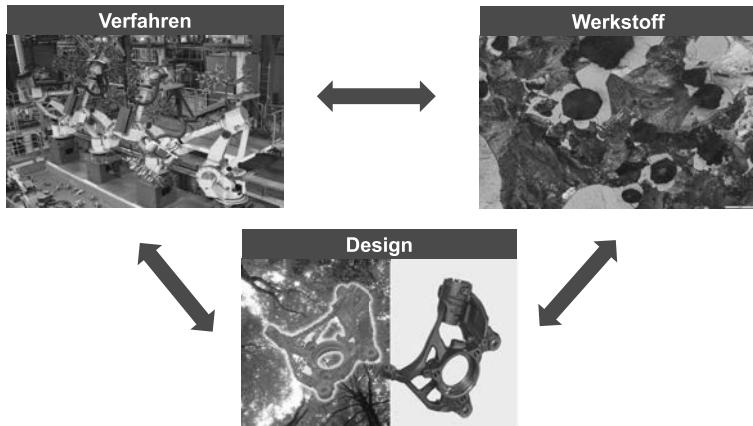
- Gesamtbilanz „Cradle-to-grave“ beachten
- Üblicherweise kostenintensiv
- Nur bedingt für „Low-Budget-Fahrzeuge“ geeignet

Konstruktions-Leichtbau

- Bezahlbarer Leichtbau
- Für hohe Stückzahlen geeignet
- Ressourcen schonend

GF Automotive

Leichtbau bei GF Automotive



Agenda

- **Zahlen und Fakten**
- **Verfahren / Prozess**
- **Werkstoff**
- **Design & Funktion**
- **HPDC Bauteile**



GF Automotive

Verfahrensentwicklung



neues Formverfahren “Aeration” (ACE)

- gleichmässige Verdichtung des Formsandes
- hohe Masshaltigkeit

Kontaktgiessen mit Roboter

- maximale Flexibilität
- hohe Verfügbarkeit

Entfernen des Giesssystems mittels Roboter

- hohe Prozesssicherheit
- Kostenvorteil

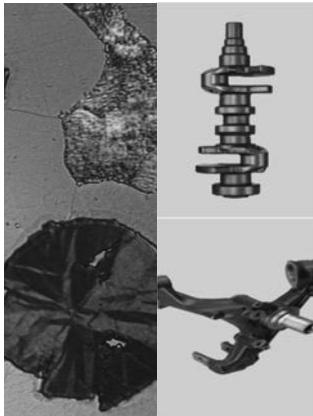
Agenda

- Zahlen und Fakten
- Verfahren / Prozess
- Werkstoff
- Design & Funktion
- HPDC Bauteile



GF Automotive

Werkstoffentwicklung: SiboDur

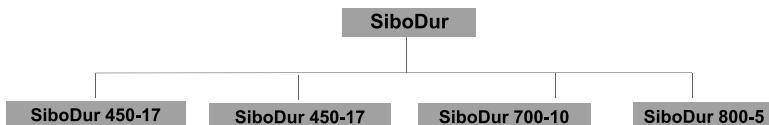


Merkmale und Besonderheiten

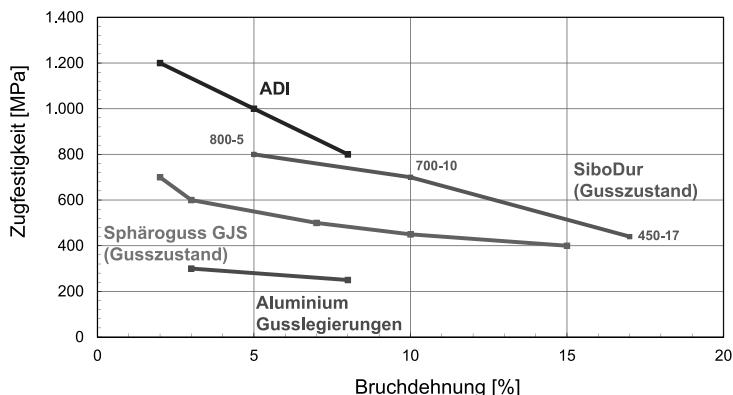
- Hochfester Gusseisenwerkstoff
- Basis: Gusseisen mit Kugelgraphit
- Zugfestigkeit 450 bis 800 MPa
- Dehnung 5 bis 17 %

GF Automotive

SiboDur: Werkstoffsorten



GF Automotive
SiboDur
Hochfester Guss Werkstoff



GF Automotive
Werkstoffeigenschaften



KONVENTIONELL

- bearbeiteter Probekörper
- einachsiger Spannungszustand
- Wöhlerkurven
- Dehnungswöhlerkurven



OPTIMIERT

- bauteilnaher Probekörper
- Gussoberfläche im Prüfbereich
- definierter Formfaktor
- Wöhlerkurven
- Betriebslasten



Agenda

- Zahlen und Fakten
- Verfahren / Prozess
- Werkstoff
- Design & Funktion
- HPDC Bauteile



GF Automotive

Designentwicklung: Bionik

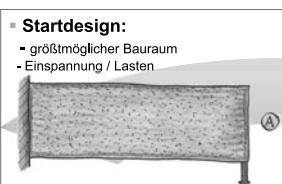


Bionischer Grundsatz:

- Ressourcen sind in der Natur stark limitiert (Licht, Wasser, Nährstoffe etc.)
- Biomasse muss deshalb möglichst effizient eingesetzt werden
- Strukturen zielen deshalb auf extremen Leichtbau und spannungsarme Formen ab

GF Automotive

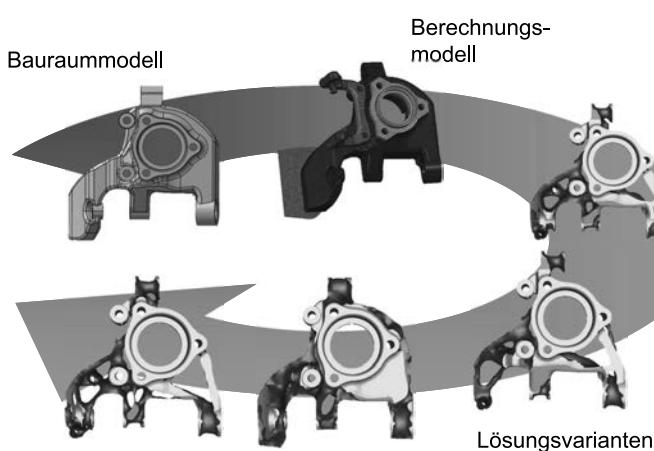
Designentwicklung: Bionik



(Quelle: Prof. Dr. Claus Mattheck)

GF Automotive

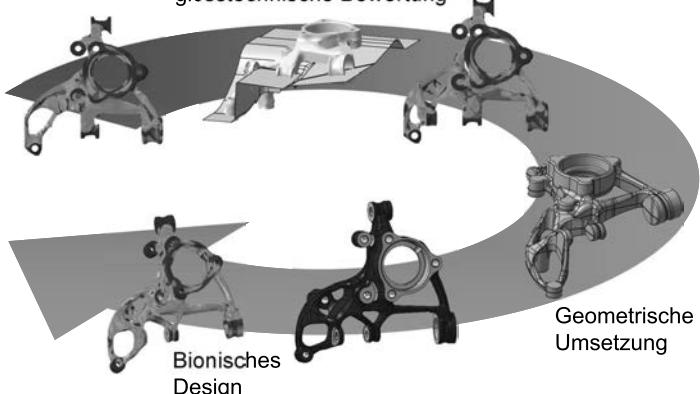
Bionisches Design



GF Automotive

Bionisches Design

Auswahl über Festigkeits- und
giesstechnische Bewertung

**GF Automotive**

Bionisches Design



Umsetzung unter Berücksichtigung
von:

- Prozess
- Werkstoff
- Design
- Funktion

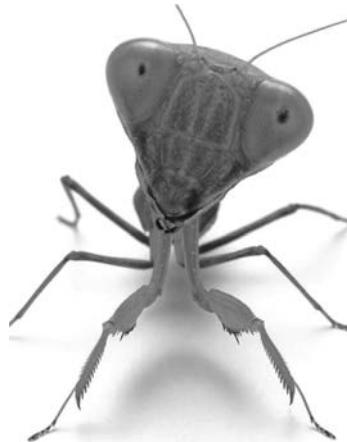


GF Automotive

Bionisches Design

Bionisches Design benötigt:

- Bauraum
- Spezifikationen & Lasten
- Georg Fischer Giesskompetenz



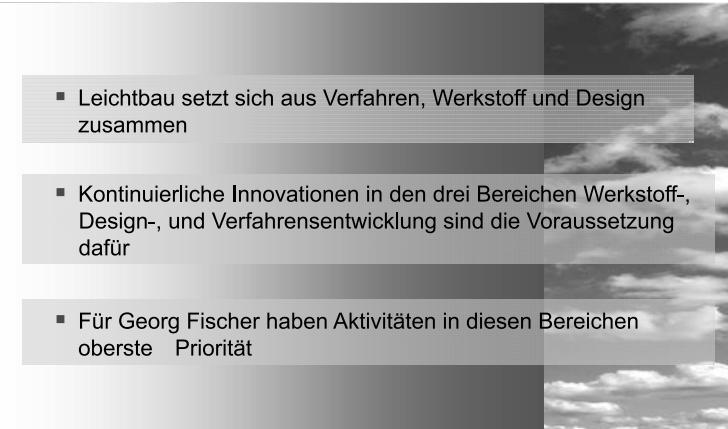
Bionisches Design führt zu:

- innovative Formen
- Gewichtsreduktion

GF Automotive

Leichtbau in Sphäroguss Zusammenfassung

- Leichtbau setzt sich aus Verfahren, Werkstoff und Design zusammen
- Kontinuierliche Innovationen in den drei Bereichen Werkstoff-, Design-, und Verfahrensentwicklung sind die Voraussetzung dafür
- Für Georg Fischer haben Aktivitäten in diesen Bereichen oberste Priorität



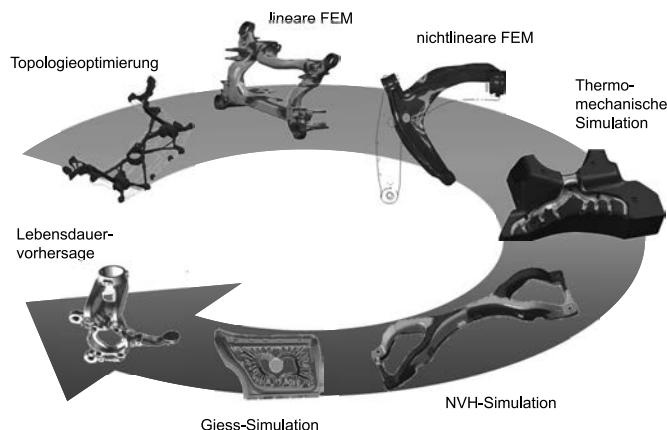
Agenda

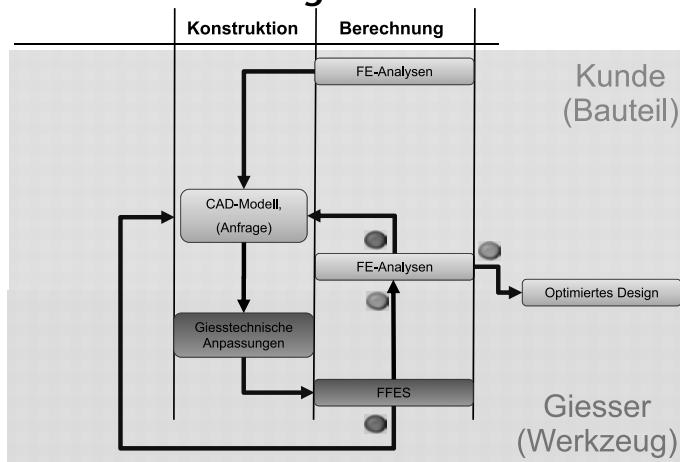
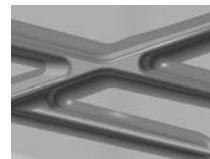
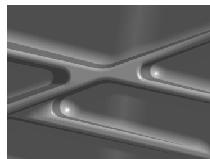
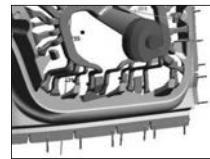
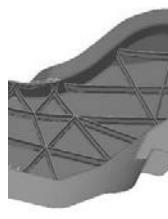
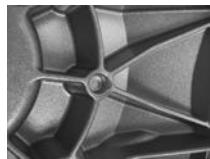
- **Zahlen und Fakten**
- **Verfahren / Prozess**
- **Werkstoff**
- **Design & Funktion**
- **HPDC Bauteile**



Forschung und Entwicklung

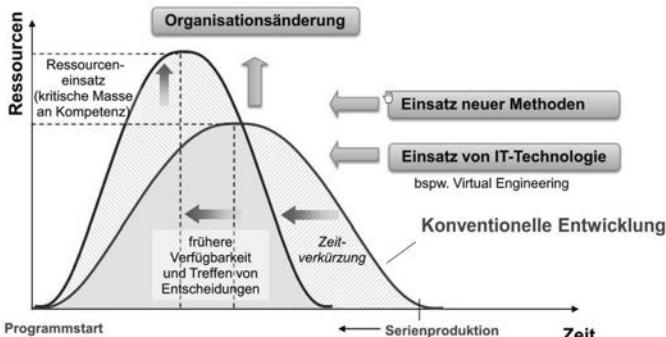
virtueller Entwicklungsprozess



Forschung und Entwicklung**aktueller Entwicklungsablauf****Forschung und Entwicklung****Gießtechnische Anpassung / Beratung**

Forschung und Entwicklung

Frontloading

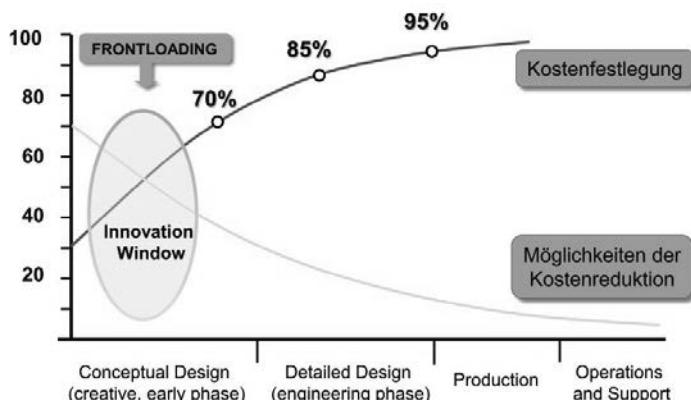


Verlagerung von Ressourcen und Validierungsverfahren in die frühen Phasen der Entwicklung !

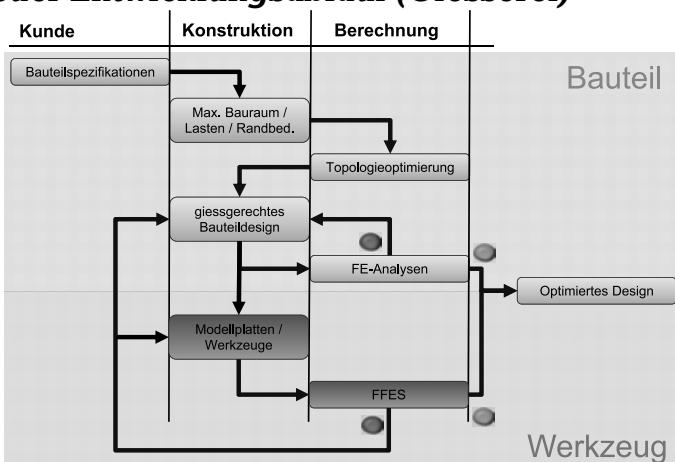
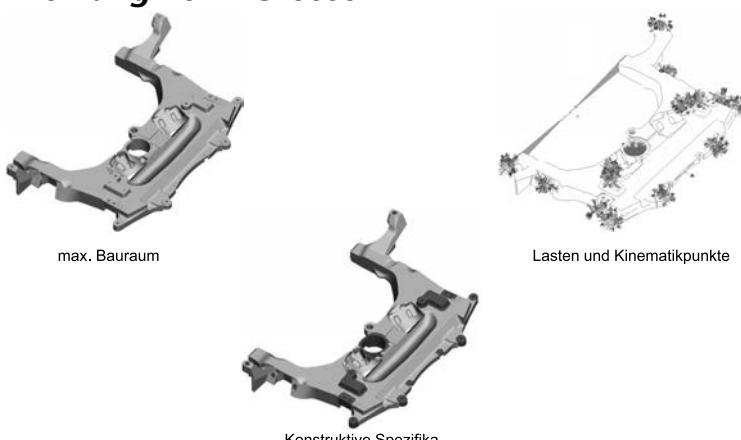
Quelle KIT (Karlsruher Institute for Technology, J. Ovtcharova)

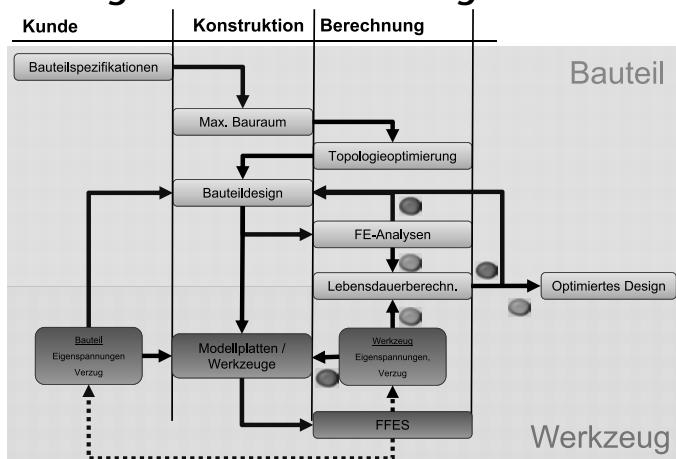
Forschung und Entwicklung

Frontloading



Quelle DARPA Rapid Design Exploration and Optimization Project

Forschung und Entwicklung**neuer Entwicklungsablauf (Giesserei)****Forschung und Entwicklung****Daten für die digitale Produktentwicklung beim Giesser**

Forschung und Entwicklung**Zukünftige Produktentwicklung****Forschung und Entwicklung****vorhandene Software****CAD**

CATIA V5

NX

Pro / ENGINEER

**GIESSSIMULATION**

MAGMA 5.3

**FEM**

ABAQUS

NASTRAN

TOSCA

MSC Fatigue

**PRE- / POSTPROZESSOR**

ANSA / META

ABAQUS CAE



Forschung und Entwicklung**Zusammenfassung****Vorteile**

- Verkürzter Entwicklungsprozess durch parallele Simulation beim Giesser
- Bauteil giessgerecht ausgelegt
- Keine teuren und späten Werkzeugänderungen (höherer Reifegrad des Bauteils)
- detaillierteres Serienangebot
- weitere Prozessoptimierungen durch Integration von Giesssimulationsergebnissen in die Simulationskette möglich

Voraussetzungen

- Bereitschaft des Kunden den Giesser sehr früh in den Entwicklungsprozess einzubinden
- Personal und Software
- Giesser übernimmt Verantwortung für Teilauslegung des Bauteils

Bisherige Umsetzung

- 3 erfolgreiche Projekte mit namhaften OEMs, 2 Weitere in Arbeit

GF Automotive

Einfluss der Temperaturleitfähigkeit organisch- und anorganisch-gebundener Formkerne auf die Gefüge-eigenschaften von Aluminiumlegierungen

Thermal diffusivity of organic- and inorganic-bound cores and its influence on the microstructure of Al-alloys

Dr. C. Appelt, M.Sc. S. Voss, ASK Chemicals GmbH, Hilden

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit umfasst eine vergleichende Übersicht eines Polyurethan Cold-Box Bindemittelsystems (PUCB) mit einem Silikat-basierten Bindemittelsystem (INOTECTM), die zur Herstellung von Formen und Kernen in Gießereibetrieben verwendet werden. Beide Technologien werden in Bezug auf die chemische Zusammensetzung der Bindemittelsysteme, ihre Kernherstellungsverfahren sowie Härtemechanismen verglichen. Weitere ökonomische und ökologische Eigenschaften der Bindemittelsysteme werden diskutiert um den Vorteil anorganischer Bindemittelsysteme zu beschreiben.

Neben diesen Aspekten sind Gefügeeigenschaft und -qualität des Gussteils von zentraler Bedeutung. Werden diese Eigenschaften durch die Wahl eines organischen oder anorganischen Bindemittelsystems positiv oder negativ beeinflusst? Ziel dieses Projekts war es, Unterschiede in der Temperaturleitfähigkeit von organisch- und anorganisch-gebundenen Formen und Kernen zu beobachten, die einen Einfluss auf das Erstarrungsverhalten der Aluminiumschmelze und damit auf die Gefügeeigenschaften des abgebildeten Gussteils nehmen. Im Falle der INOTECTM-gebundenen Form wurde eine höhere Abkühlrate und verkürzte Erstarrungszeit der Aluminiumschmelze beobachtet, die mit kleineren Sekundärdendritenarm-abständen im abgebildeten Aluminiumgussteil korrelieren.

Abstract

The presented work describes a comparative overview of a polyurethane cold-box binder system (PUCB) and a silicate based binder system (INOTECTM) required for the production of casting molds and cores. Both technologies are compared in respect of the chemical composition of the binder systems, their core shooting manufacturing process and chemical hardening mechanism. Further performance properties as well as environmental and economic aspects are discussed to emphasize the benefits of inorganic binder systems.

In addition, the change in chemical nature of the organic and inorganic binder system upon thermal strain during the aluminum sand casting process is described. What is the impact of an organic and inorganic binder system on the solidification behavior of the aluminum melt and the microstructural properties of an Al-alloy? The goal of this research project was to observe differences in thermal diffusivity for organic- and inorganic-bound cores that influence cooling rates and solidification times of the aluminum melt as well as dendritic arm spacing in the obtained Al-alloy castings. Higher cooling rates and shorter solidification times are in accord with shortened dendritic arm spacing in case of inorganic-bound cores.

1. Polyurethan Cold-Box-Verfahren (PUCB-Verfahren)

Die Anforderungen an die Gussteilerzeugung mit Bauteilen hoher Komplexität und geringer Gusswandstärke, vor allem im Leichtmetallguss (z.B. Al-Niederdruckkokillenguss), beeinflussen die Wahl des Bindemittelsystems. Dabei nimmt das Bindemittelsystem einen zentralen Einfluss auf eine Vielzahl technologischer, ökonomischer und ökologischer Faktoren. Das Polyurethan Cold-Box-Verfahren (PUCB-Verfahren) ist derzeit das weithin gebräuchlichste organische Kernherstellungsverfahren. Bei dieser Herstellung von Kern- und Formteilen werden feuerfeste Formgrundstoffe (z.B. Quarzsand) mit Phenol-Formaldehydharzen und Polyisocyanat-Derivaten in Gegenwart von tertiären Aminen als Katalysator unter Ausbildung eines Netzwerks ausgehärtet. Dabei reagieren die endständigen Methylol-Gruppen des *ortho*-Phenol-Resols (1) und die NCO-Gruppen des Polyisocyanats (2) zum Polyurethan (3) in einer Polyadditionsreaktion (Bild 1).

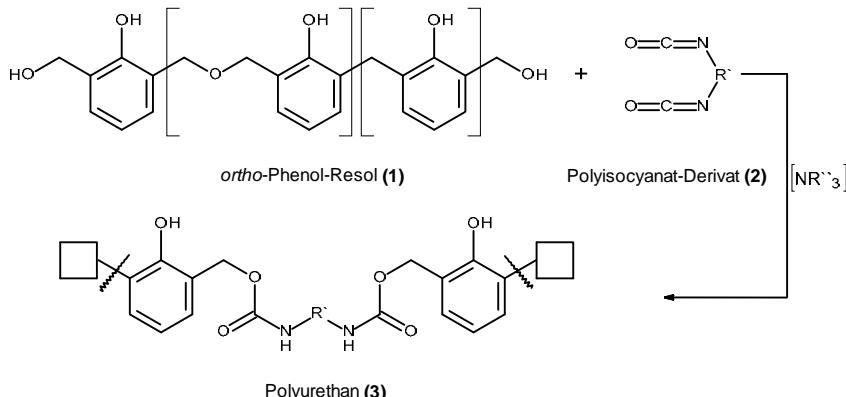


Bild 1: Schematische Reaktion eines Phenol-Formaldehydharzes mit einem Polyisocyanat-Derivat unter Ausbildung einer Urethan-Funktion.

Typische Polyurethan Cold-Box Bindemittelsysteme können daher als Dreikomponentensystem beschrieben werden (Bild 2): Komponente 1 besteht aus ca. 50 - 55 % Phenol-Formaldehydharz und ca. 45 - 50 % Lösungsmitteln, Komponente 2 besteht hauptsächlich aus polymerem Isocyanat und 15 - 30 % Lösungsmitteln und Komponente 3 bildet ein tertiäres Amin, das die Reaktion katalysiert. Häufig verwendete Lösungsmittel der Komponenten 1 und 2 sind Aromaten und Aliphaten sowie polare Ester und Fettsäurederivate.

Zusammensetzung eines PUCB-Bindemittelsystems

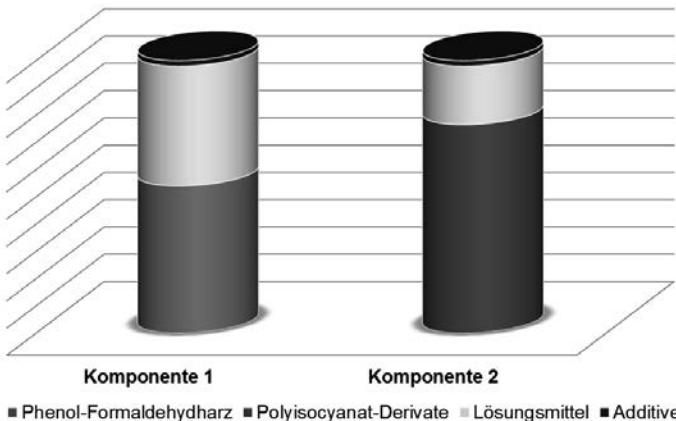


Bild 2: Zusammensetzung eines typischen PUCB-Bindemittelsystems.

Das PUCB-Kernherstellungsverfahren weißt bedingt durch die chemische Zusammensetzung des Komponentensystems ökologische Nachteile auf: Bereits bei Kernherstellung und Lagerung können Emissionen in Form von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) als Bestandteile der Bindemittelkomponenten 1, 2 und 3 wahrgenommen werden. Die thermische Zersetzung (Pyrolyse) von in den Formen und Kernen enthaltenen Lösungsmitteln sowie des Polyurethan-Netzwerks führt zur Bildung von BTX (Benzol, Toluol, Xylool)- und NO_x (Stickstoffoxide)-Emissionen und Luftschadstoffen (HAP) während der Gieß-, Abkühl- und Ausleerprozesse. Unvollständig zersetzte organische Bestandteile verbleiben als Kondensat, Teer oder Koks meist an kühlen Oberflächen der Kerne oder Metalldauerformen (z.B. Kokille) und führen zu hohem Reinigungs- und Instandhaltungsaufwand und damit zu einer geminderten Produktivität. Weiterentwicklungen dieser typischen PUCB-Technologie umfassen u.a. den Einsatz von speziellen Lösungsmitteln als Bestandteile der Bindemittelkomponenten

1 und 2 zur Reduzierung von gesundheitsschädlichen Emissionen während Kernherstellung, Lagerung und Abguss (z.B. ECOCURE Technologie, ASK Chemicals GmbH) [1].

Das PUCB-Verfahren bietet jedoch vor allem ökonomische Vorteile: die Nutzung unbeheizter Kernwerkzeuge bei hoher Taktfrequenz der Fertigungszyklen ermöglichen eine kostengünstige Kern- und Formherstellung bei moderatem Investitionsaufwand. Hohe mechanische Festigkeiten der Formen und Kerne bei geringen Zugabemengen des PUCB-Bindemittelsystems begünstigen einen hohen Automatisierungsgrad des gesamten Fertigungsprozess (Herstellung, Handling, Lagerung) und erhöhen letztendlich Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Gießereibetriebe.

2. INOTEC™-Verfahren

Die INOTEC™-Technologie der ASK Chemicals GmbH beschreibt eine außerordentlich ressourcen- und umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen organischen Kernherstellungsverfahren. Diese Technologie hat sich vor allem im Aluminium Niederdruckkokillen- und Schwerkraftguss bei der Fertigung von Zylinderköpfen und Kurbelgehäusen als hoch produktives Kernherstellungsverfahren durchgesetzt.

Zusammensetzung eines INOTEC™- Bindemittelsystems

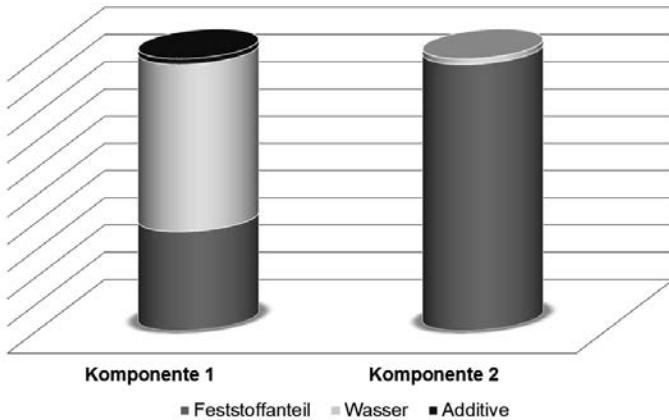


Bild 3: Zusammensetzung eines typischen anorganischen Bindemittelsystems.

Die INOTEC™-Technologie umfasst den Einsatz eines zweiteiligen Bindemittelsystems: Komponente 1 (INOTEC™-Binder) basiert auf einer modifizierten, wässrigen Alkalisilikat-Lösung; Komponente 2 (INOTEC™-Promotor) ist als Feststoffmischung von synthetischen

und mineralischen Rohstoffen zu beschreiben, die die Eigenschaften (z.B. Sofortfestigkeit, thermische Stabilität) der hergestellten Formen und Kerne maßgeblich beeinflussen (Bild 3). Bei der Herstellung von anorganischen Formen und Kernen werden die Formstoffmischungen aus feuerfestem Formgrundstoff (z.B. Quarzsand) und anorganischem Bindemittelsystem bei Temperaturen zwischen 130 – 200 °C durch beheizte Kernwerkzeuge und Einbringen von auf über 100 °C erhitzter Druckluft gehärtet. Der physikalisch-chemische Härtemechanismus beruht auf dem Verdampfen des Wassers aus der Formstoffmischung und der thermischen Initiierung einer Polykondensationsreaktion, die, unter Abspaltung von Wasser und Ausbildung von Si-O-Si-Bindungen, zur Bildung eines dreidimensionalen Netzwerks aus SiO_4 -Tetraedern führt [2].

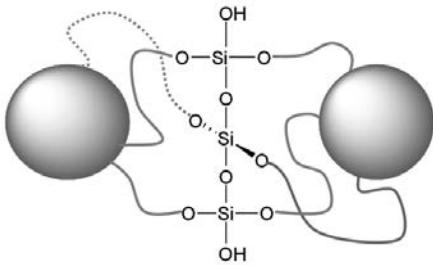


Bild 4: Polykondensation von Alkalisilikat-Lösungen unter Ausbildung eines dreidimensionalen SiO_4 -Netzwerks (links) und schematischer Einbau von netzwerkbildenden Be standteilen des INOTEC™-Promotors in das Silikatnetzwerk (rechts).

Die wässrige Alkalisilikat-Lösung der Komponente 1 beinhaltet monomere und dimere sowie polymere Silikatanionen, die teilweise in Form von kolloidalen Teilchen durch das Vorhandensein einer elektrostatischen Doppelschicht stabilisiert in Lösung vorliegen. Durch Änderung des äußeren Zustandes, z. B. durch Wasserentzug, bei der Kern- bzw. Formherstellung, wird das chemische Gleichgewicht auf die Seite der Kondensationsprodukte und Molekülvergrößerung verschoben. Dabei wird in Abhängigkeit des pH-Werts der Alkalisilikat-

Lösung eine kontinuierliche Partikelvergrößerung (Sole) oder die Agglomeration einzelner Partikel zu Ketten und Netzwerken (Gele) beobachtet.

Das dreidimensionale Bindemittelgerüst beinhaltet dabei Netzwerkbildner (z.B. SiO_2) und Netzwerkwandler (z.B. Na_2O). Die netzwerkbildenden Bestandteile der Bindemittelkomponente 2 werden teilweise über reaktive Gruppen an den Partiktoberflächen der mineralischen und/oder synthetischen Rohstoffe in das Silikat-Grundgerüst eingebaut und erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit der chemischen Härtung des Bindemittelsystems.

Das INOTEC™-Kernherstellungsverfahren bietet vor allem ökologische Vorteile: Das Fehlen von Emissionen bei Kernherstellung und Lagerung sowie während der Gieß-, Abkühl- und Ausleerprozesse, die ein Wegfall von Luftaufbereitungsmaßnahmen ermöglichen, sind bekannte Stärken anorganischer Bindemittelsysteme. Die Umweltfreundlichkeit des INOTEC™-Bindemittelsystems ist in einer vergleichenden Ökobilanz mit einem PUCB-Bindemittelsystem bestätigt [3]. Im Serieneinsatz (z.B. Al-Niederdruckkokillenguss) führt die fehlende Kondensatbildung beim Gießprozess zu einem geringen Reinigungsaufwand der Metalldauerformen (Kokillen) und ermöglicht neben einer höheren Gussteilausbringung auch eine gezielte Abkühlung, so dass Einfluss auf das Erstarrungsverhalten der Aluminiumschmelze genommen werden kann. Diesem Produktivitätsgewinn stehen höhere Investitions- und Energiekosten zur Bereitstellung, Instandhaltung und Betrieb der beheizten Kernwerkzeuge gegenüber.

3. Methode zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von organisch- und anorganisch-gebundenen Formen

Die Temperaturleitfähigkeit α beschreibt das Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit λ zur Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ eines Stoffes der Dichte ρ und spezifischen Wärme c_p . Die Methode zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von organisch- und anorganisch-gebundenen Formen basiert auf dem Heizdraht- bzw. Heizstreifenverfahren [4]. Dabei erzeugt eine Wärmequelle einen Wärmeimpuls, der entlang eines Temperaturgradienten zur Wärmesenke diffundiert und dort zu einem orts- und zeitabhängigen Temperaturanstieg $\Delta T(r,t) = T(r,t) - T_0$ führt. Das Einfüllen der flüssigen Aluminiumschmelze in die Gießform zum Zeitpunkt t_0 verursacht also einen Wärmeimpuls H , der durch die Gießform diffundiert und an einem Thermoelement (Temperaturfühler) mit einem definierten Abstand r zur Aluminiumschmelze (Wärmequelle) durch einen Temperaturanstieg erfasst wird (Gleichung 1):

$$\Delta T(r, t) = \frac{H}{4\pi Lat \rho c_p} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$$

Gleichung 1: Zeit- und ortsabhängiger Temperaturanstieg.

Unabhängig von der eingebrachten Wärmemenge wird das jeweilige Temperaturmaximum zur Zeit t_{\max} erreicht (Gleichung 2). Die Ermittlung der Zeitdifferenz Δt_{\max} zwischen Erfassen der Temperaturmaxima zweier Temperaturfühler mit verschiedenen Abständen r_1 und r_2 ($r_2 > r_1$) zur Wärmequelle ermöglicht die Berechnung der Temperaturleitfähigkeit a .

$$t_{\max} = \frac{r_1^2}{4a} \quad \Delta t_{\max} = \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{4a} \quad \Leftrightarrow \quad a = \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{4\Delta t_{\max}}$$

Gleichung 2: Berechnung der Temperaturleitfähigkeit.

4. Versuchsbeschreibung zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit

Die zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit verwendeten Formen wurden nach den in Kapitel 1 und 2 dargestellten organischen und anorganischen Kernherstellungsverfahren auf Basis von Quarzsand definierter Kornverteilung hergestellt. Der vertikal geteilte Kernkasten ist über externe vollflächige Heizplatten temperiert und entweichende Luft wird über Schlitzdüsen nach außen abgeführt. Die hergestellten Formen wurden direkt nach Formherstellung verwendet.

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit beinhaltet ein vertikal geteiltes Formpaket aus zwei identisch aufgebauten Formen, die über externe Sicherungen vereint sind. Die Formen sind näherungsweise rechteckig aufgebaut und weisen auf der einen Formseite eine rechteckige Kavität mit seitlichem Einguss auf. Die andere Formseite weist eine plane Oberfläche auf und schließt die rechteckige Kavität auf der Vorderseite des Formpaketes. Das rechteckige Gussteil mit den ungefähren Abmessungen von 20,5 cm x 18,0 cm x 5,8 cm wird durch steigende Füllung der Formkavität abgebildet. Insgesamt wurden 6 Temperaturfühler durch Bohrungen nach Kernherstellung in die Oberseite einer Formseite integriert (Bild 5). Der Temperaturfühler T1 wurde im Abstand von 50 mm und einer Tiefe von 60 mm, gemessen an den Begrenzungen der Gussteilkavität, in einem Quarzglasrohr zur Messung der Abkühlrate der flüssigen Aluminiumschmelze in die rechteckige Kavität des Formpaketes positioniert. Weitere 5 Temperaturfühler (T2 – T6) wurden jeweils im Abstand von 15 mm zueinander und in einer Tiefe von 60 mm, gemessen an den Begrenzungen der Gussteilkavität, in das Formpaket integriert. Der Abstand des Temperaturfühlers T2 zur flüssigen Aluminiumschmelze beträgt dabei 10 mm und die weiteren Temperaturfühler wurden in einem Abstand von 5 mm zum vorherigen Temperaturfühler angeordnet, so dass eine dia-

gonale Anordnung der Messpunkte resultiert. Die Aufnahme der Temperaturprofile erfolgte zum Zeitpunkt t_0 , der dem Einfüllen der flüssigen Aluminiumschmelze in das Formpaket entspricht.

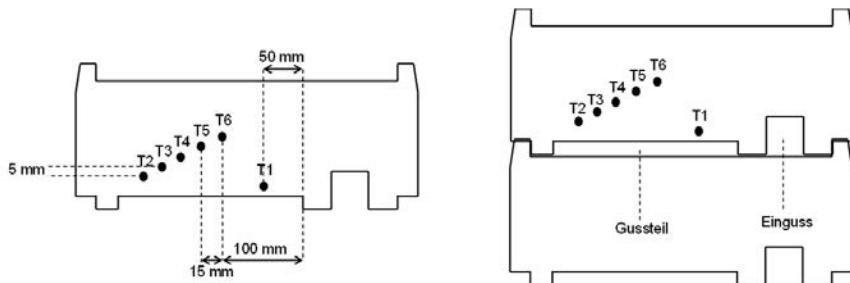


Bild 5: Anordnung der Temperaturfühler auf der Oberseite einer Formhälfte (Aufsicht, links) und Zusammenschluss des Formpaketes (Aufsicht, rechts).

Im Widerstandstieglofen wurden 75 kg der Legierung AlSi10Mg(Cu) chargiert und bis zur Gießtemperatur von $745\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Nach dem Aufschmelzen erfolgte die Schmelzreinigung durch eine Rotationsentgasung (Impeller, 15 min, Argon). Die Aluminiumschmelze wurde manuell mittels Gießlöffel mit möglichst konstanter Gießgeschwindigkeit in die vorbereiteten Formpakete zum Zeitpunkt t_0 (Start der Temperaturmessung) eingefüllt. Die Aufnahme der Temperaturprofile wurde nach 5 Minuten und nach Erreichen einer Gussteiltemperatur von $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgebrochen. Das Gussteil wurde über Nacht im Formpaket unter Standardbedingungen abgekühlt und anschließend entformt sowie gesäubert.

Die abgebildeten Gussteile wurden zur Untersuchung des Sekundärdendritenarmabstands (SDAS) nach VDG-Merkblatt P220 in jeweils 6 metallographische Proben mit den Abmessungen 30 mm x 25 mm x 20 mm unterteilt. Der SDAS wird in erster Linie von der lokalen Erstarrungszeit beeinflusst ($SDAS = k \cdot t_E^{1/3}$), so dass eine rasche Erstarrung im Allgemeinen zu kleinen SDAS-Werten führt und somit gute mechanische Eigenschaften des erhaltenen Gussteils gewährleistet sind.

5. Ergebnisse der Temperaturleitfähigkeitsbestimmung von PUCB- und INOTEC-gebundenen Formen und Vergleich des Sekundärdendritenarmabstands

Die Bilder 6 und 7 zeigen die Abkühlkurven der Aluminiumschmelze (T1) und die Temperaturprofile der Form-integrierten Messpunkte (T2 – T6) der PUCB- und INOTEC™-

gebundenen Formpakete. Die angegebenen Werte basieren auf simultan durchgeföhrten Doppelbestimmungen, um statistische und systematische Fehlerquellen zu minimieren.

Aus der jeweiligen Abkühlkurve der Aluminiumschmelze können Liquidus- und Solidustemperatur ermittelt werden, die einen Rückschluss auf das Erstarrungsverhalten der flüssigen Aluminiumschmelze ermöglichen. Die Liquidustemperatur wird als Wendepunkt und die Solidustemperatur als Minimum der 1. Ableitung der Abkühlkurve erhalten. Die lokale Erstarrungszeit der Aluminiumschmelze wird als zeitliche Differenz von Erstarrungsbeginn und -ende berechnet. Die ermittelten Liquidus- (T_{Liquidus}) und Solidustemperaturen (T_{Solidus}) sowie die berechneten Erstarrungszeiten (t_E) sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Aluminiumschmelze der INOTEC™-gebundenen Form erstarrt mit einer deutlich höheren Abkühlrate als die Aluminiumschmelze der PUCB-gebundenen Form.

Tabelle 1: Vergleich von lokalen Erstarrungszeiten für Aluminiumschmelzen der PUCB- und INOTEC™-gebundenen Formen.

	PUCB-Form	INOTEC™-Form
T_{Liquidus} [°C]	591	588
T_{Solidus} [°C]	532	530
t_E [sec]	1915	1375

Ein Vergleich der Temperaturprofile der Form-integrierten Messpunkte könnte einen Hinweis zur verkürzten Erstarrungszeit der Aluminiumschmelze im Fall INOTEC™-gebundener Formen geben. Die Temperaturprofile der INOTEC™-gebundenen Formen weisen näherungsweise ein Temperaturplateau für die Verdampfungsenthalpie von Wasser auf. INOTEC™-gebundene Formen weisen im Allgemeinen nach Herstellung einen Wassergehalt von ca. 0,1 - 0,2 % auf. Das im Formpaket enthaltene Wasser wird durch die thermische Energie der Aluminiumschmelze während des Gieß- und Abkühlprozesses verdampft, so dass der Aluminiumschmelze kontinuierlich Wärme entzogen wird und kürzere Erstarrungszeiten beobachtet werden. Dieser Verdampfungsprozess ist durch eine geringe Steigung der jeweiligen Temperaturkurve zu verfolgen.

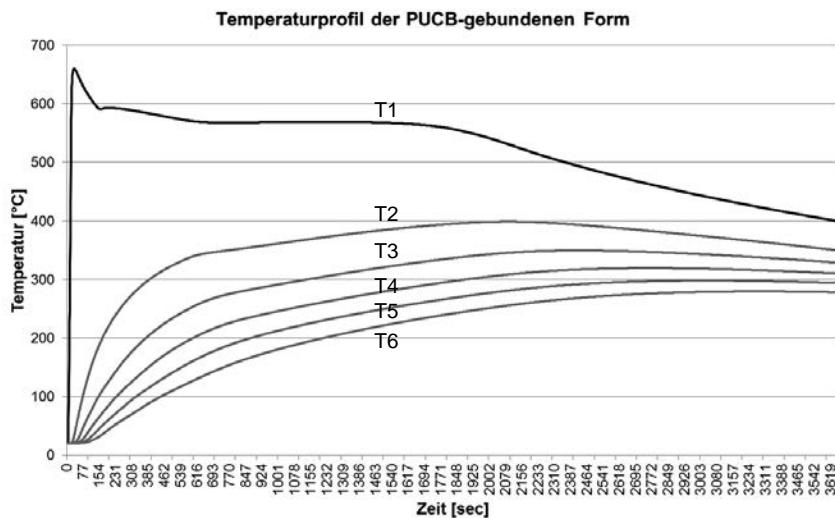


Bild 6: Temperaturprofile der PUCB-gebundenen Form.

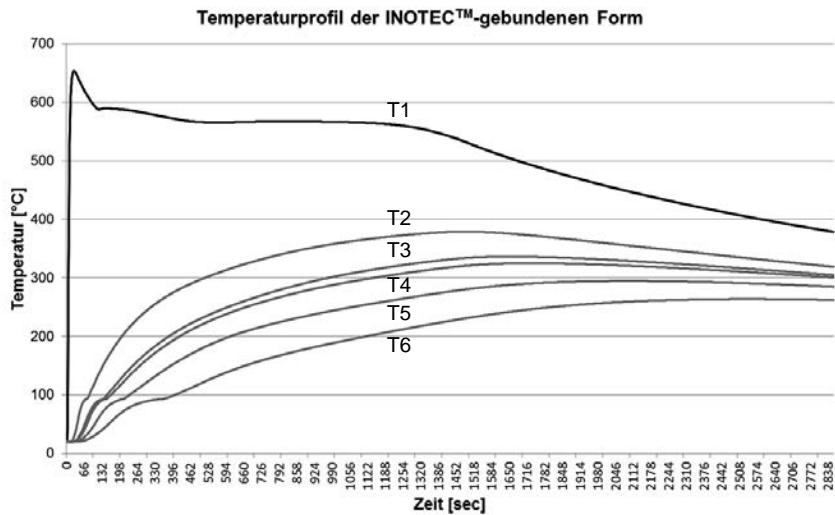


Bild 7: Temperaturprofile der INOTEC™-gebundenen Form.

Tabelle 2: Temperaturmaxima an den Messpunkten T2 – T6 der PUCB- und INOTECTM-gebundenen Formen.

Abstand	PUCB-Form		INOTEC TM -Form	
	T _{max} [°C]	t _{max} [sec]	T _{max} [°C]	t _{max} [sec]
r ₂ (10 mm)	398,8	2092	379,2	1480
r ₃ (15 mm)	349,7	2413	336,5	1640
r ₄ (20 mm)	319,5	2741	325,0	1735
r ₅ (25 mm)	298,2	3021	294,6	2094
r ₆ (30 mm)	279,7	3253	263,8	2525

Die Temperaturkurven der PUCB- und INOTECTM-gebundenen Formen weisen mit zunehmendem Abstand der Messpunkte T2 – T6 zur Aluminiumschmelze abnehmende Temperaturmaxima auf, deren Erfassung mit zunehmendem Abstand zur Aluminiumschmelze zu späteren Zeiten erfolgt (Tabelle 2). Im Vergleich sind die Temperaturmaxima der INOTECTM-gebundenen Form dabei stets geringer als die der PUCB-gebundenen Form. Unter Berücksichtigung der Zeitdifferenz Δt_{\max} zwischen Erfassen der Temperaturmaxima zweier Messpunkte mit verschiedenen Abständen r₁ und r₂ (r₂ > r₁) zur Aluminiumschmelze wurde die Temperaturleitfähigkeit a berechnet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Berechnete Temperaturleitfähigkeiten der PUCB- und INOTECTM-gebundenen Formen.

Abstandsintervall	PUCB-Form	INOTEC TM -Form
	a * 10 ⁻⁶ [m ² /sec]	a * 10 ⁻⁶ [m ² /sec]
r ₃ – r ₂	0,097	0,195
r ₄ – r ₃	0,133	0,461
r ₅ – r ₄	0,201	0,157
r ₆ – r ₅	0,296	0,160

Die Temperaturleitfähigkeit der PUCB-gebundenen Form nimmt mit zunehmendem Abstand zur Aluminiumschmelze zu. Diese Beobachtung könnte auf den hohen Pyrolysegrad des organischen Bindemittelnetzwerks in unmittelbarer Nähe zur Aluminiumschmelze zurückzuführen sein. Im Vergleich ist die Temperaturleitfähigkeit der INOTECTM-gebundenen Form bereits im ersten Abstandsintervall r₃ – r₂ um den Faktor 2 erhöht. Im nächsten Abstandsinter-

vall wird eine maximale Temperaturleitfähigkeit beobachtet, die mit zunehmendem Abstand zur Aluminiumschmelze auf ein konstantes Minimum fällt.

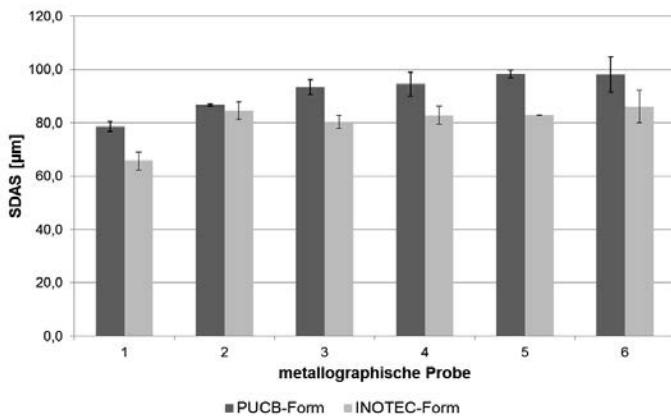


Bild 8: Sekundärdendritenarmabstände (SDAS) der metallographischen Proben.

Die im Vergleich höheren Temperaturleitfähigkeitswerte der anorganisch-gebundenen Form korrelieren mit guter Übereinstimmung mit den kürzeren Erstarrungszeiten der Aluminiumschmelze. Die kurze Erstarrungszeit der Aluminiumschmelze der INOTECTM-gebundenen Form beeinflusst den Sekundärdendritenarmabstand (SDAS) des erhaltenen Gussteils maßgeblich (Bild 8). Die SDAS-Werte des Gussteils der PUCB-gebundenen Form liegen im Bereich zwischen 79 µm und 99 µm, während für das Gussteil der INOTECTM-gebundenen Form SDAS-Werte im Bereich von 66 µm bis 86 µm erhalten werden. Durchschnittlich werden um ungefähr 9,8 % kleinere SDAS-Werte für das Gussteil der INOTECTM-gebundenen Form beobachtet.

6. Ausgewählte Literatur

- [1] Vacelet, P. H., Priebe, C., Muniza, J.: Neue Solventless Cold-Box-Technologie reduziert Emissionen während des gesamten Gießereiprozesses, Giesserei-Rundschau, 60, 2013, 67 - 70.
- [2] Iller, R. K., The Chemistry of Silica, John WILEY & Sons, 1979.
- [3] Dr. Deters, H., Dr. Müller, J.: Ökobilanz-Vergleich von INOTECTM, dem anorganischen Bindersystem, mit einem klassischen Cold-Box Bindersystem, Giesserei-Rundschau, 61, 2014, 74 - 76.
- [4] Patentschrift DE 102 06 275 B4

Prüfmethode zur Ermittlung des Umformvermögens von Aluminium-Gusswerkstoffen (Duktilitätstest)

Test method for evaluating the deformability behavior of structural castings (ductility test)

Dr.-Ing. Christian Böhnlein, Ingo Seitz, Daimler AG, Sindelfingen;
Thomas Traxler, Daimler AG, Esslingen/Mettingen

Abstract

To achieve light weight construction goals different materials are used in Body in White structures of vehicles as their potential has to be fully exploited depending on the specific use. For body concepts aluminium and steel are to be combined. Especially aluminium die cast parts bear a high light weight construction potential within the vehicle structure due to the design flexibility. This mixed construction method places new demands to the joining method, which is mostly solved by Self-Piercing Riveting. However, this joining technology presumes a certain formability of the join partners.

To assess the punch rivet capability of aluminium die cast structure components Daimler AG requires to determine the bending angle. The samples for this test method have to be detached from the die cast parts and have to be bended on a tensile testing machine. Afterwards, they are measured and scaled. Due to the necessary sample geometry it is not always possible to evaluate these areas, which are used for joining later on. In addition to that more and more complex part geometries make it difficult to detach suitable samples for the bending test. Thus, it is not always feasible to make a statement about the formability of an aluminium die cast part at all joints.

In order to determine the forming behaviour of die cast parts even at the later joining areas, a new test method has been compiled and developed in cooperation with Development, Joining Department and Production Department. This method allows evaluating die cast parts without detaching samples out of the part. The setting of the test equipment can be combined to one of a punch rivet gun. But in contrast to that, neither a punch rivet nor a bonding partner is needed to determine the formability. The quantitative measured values of this new test method allow to make a statement about the formability and thus about the quality of the joining result to be.

1. Hybrid-Rohbaustrukturen

Zur Erreichung von Leichtbauzielen werden in der Rohbaustruktur von Fahrzeugen unterschiedliche Werkstoffe eingesetzt, um anwendungsspezifisch deren Potentiale vollständig ausschöpfen zu können. In Karosseriekonzepten gilt es, Aluminium mit Stahl zu kombinieren. Aufgrund der hohen Gestaltungsfreiheit bieten insbesondere Aluminium-gussteile ein sehr hohes Leichtbaupotential in der Fahrzeugstruktur. Diese Mischbauweise stellt neue Anforderungen an die Fügeaufgabe, die meist durch die Halbholzstanzniettechnik gelöst wird. Diese Fügetechnik setzt jedoch eine gewisse Umformbarkeit der Fügepartner voraus.

2. Anforderungen an Aluminium-Strukturgussteile hinsichtlich mechanischer Fügbarkeit - Plättchen-Biegewinkel-Versuch

An Aluminiumstrukturteile werden aufgrund der Crashperformance erhöhte Anforderungen an die Dehnung gestellt. In den bei Mercedes-Benz rohbaurelevanten Ausführungsarten A.20 (einstufige Wärmebehandlung) und A.30 (zweistufige Wärmebehandlung) nach DBL4918 werden Dehnungen im Zugversuch von mindestens 10% gefordert, Tabelle 1. Da die Dehnung jedoch nicht unmittelbar mit der Stanznietbarkeit des Werkstoffs korreliert, wird serienbegleitend als weiteres Kriterium der Biegewinkel an Proben aus dem Gussteil gemessen, da dieser in einem mehrachsigen Spannungszustand ermittelt wird und folglich eine bessere Vergleichbarkeit zum Stanznietprozess bietet als allein der Dehnungswert.

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte nach DBL4918

	A.10	A.20	A.30
0,2 Dehngrenze (MPa)	≥ 100	≥ 100	≥ 120
Zugfestigkeit Rm (MPa)	≥ 180	≥ 180	≥ 180
Dehnung A (%) bzw. A30 mm (%)	≥ 4	≥ 10	≥ 10
Biegewinkel α (°) (d=2 mm)	keine Anforderung	≥ 50	≥ 60

Zur Ermittlung der Biegewinkel müssen Biegeplättchen mit den Abmessungen 60mm x 60mm aus dem Bauteil herausgetrennt werden. Da mit diesen Abmessungen aufgrund der komplexen Geometrien der Gussteile nahezu keine Biegeplättchen entnommen werden können, darf die Größe auf minimal 15mm x 60mm reduziert werden. Damit können ebene Bauteilbereiche beprobt werden, um deren Duktilität bewerten zu können.

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Biegewinkels erfolgt auf einer Vorrichtung mit Rollen auf einer Zugprüfmaschine, wobei die Biegeprobe mit einem Schwert zwischen die Rol-

len gedrückt und dadurch gebogen wird, Bild 1. Das Versagen der Biegeprobe in Form eines Anrisses entspricht messtechnisch einem Kraftabfall. Der Versuch wird beendet und der Winkel an der Mittelachse des Biegeplättchens gemessen. Um den Einfluss der Wanddicke zu eliminieren, wird der gemessene Biegewinkel auf die Norm-Wanddicke von 2mm umgerechnet und ist somit zu anderen Wanddicken vergleichbar.

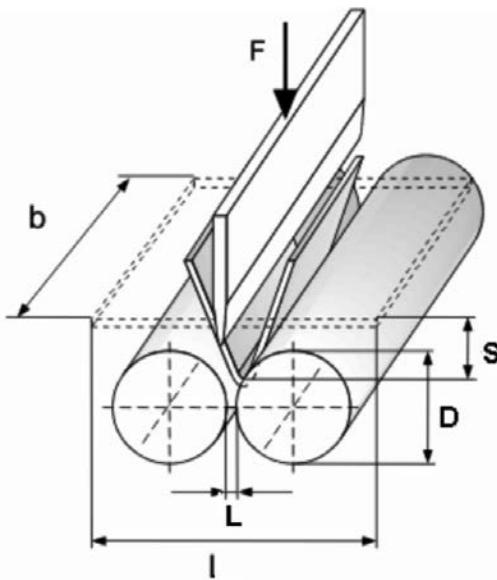


Bild 1: Schematische Darstellung der Biegeapparatur [1]

Mit dieser Prüfmethode ist es bisher nicht möglich, Randbereiche von Gussbauteilen hinsichtlich der Duktilität zu bewerten, da lediglich ein linienförmiger Bereich geprüft werden kann, der aufgrund der Geometrie der Biegeplättchen mindestens 30mm vom Bauteilrand entfernt ist. Sitzt in diesem Bereich ein Fügepunkt, so kann nur auf die Duktilität des Bauteils in diesem Bereich durch umliegende Proben geschlossen werden.

Darüber hinaus erschweren die zunehmend komplexeren Bauteilgeometrien die Entnahme von geeigneten Biegewinkel-Proben. Aufgrund der erforderlichen Probengeometrie ist es nicht immer möglich, jene Bauteilbereiche zu beproben, an denen später auch gefügt werden soll. Eine Aussage über die Umformbarkeit eines Aluminiumgussteils an allen späteren Fü-

gestellen ist somit nur begrenzt möglich. Bild 2 zeigt einen Federbeindom mit Fügeelementen (orange), wobei an vielen dieser Stellen keine Biegewinkelproben entnommen werden können, da die Flanschbreite zu gering ist, die Flansche auf der geforderten Länge von 60mm nicht eben sind oder die Rückseite des Bauteils verrippt ist.

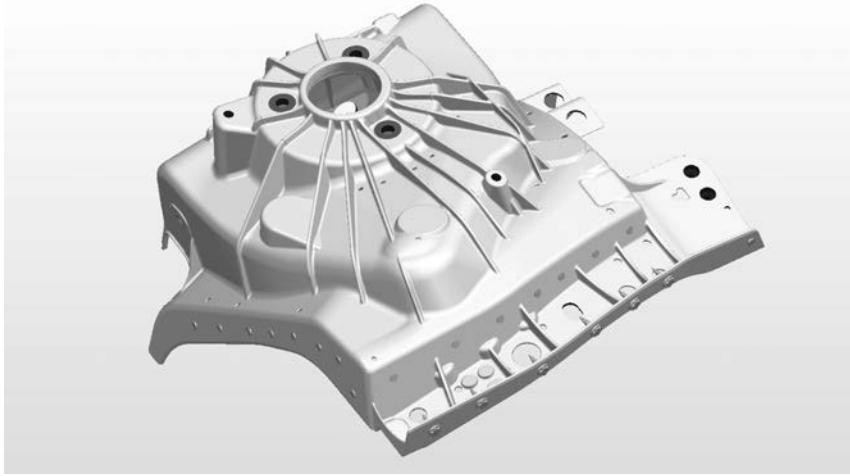


Bild 2: Federbeindom mit Fügeelementen (orange)

3. Entwicklung einer Prüfmethode zur Bewertung der Duktilität

Um das Umformverhalten von Gussteilen auch an den späteren Fügestellen bewerten zu können, wurde in Zusammenarbeit von Entwicklung, Fügetechnik und Produktion eine neue Prüfmethode konzipiert und entwickelt. Bei der Konzeption der Prüfeinrichtung zur Bewertung der Umformbarkeit des Aluminiumwerkstoffs wurde versucht, lediglich den Werkstoff des Bauteils selbst punktuell testen zu können und nicht zusätzliche Abhängigkeiten von unterschiedlichen Fügepartnern, Niet- oder Matrizegeometrien zu schaffen. Das Prinzip wurde mit einem Stempel umgesetzt, welcher den zu prüfenden Werkstoff in eine zylinderförmige Matrize drückt.

Während des Versuchs werden Stempelweg und Stempelkraft aufgezeichnet. Matrize seitiges Versagen des Werkstoffs wird messtechnisch erfasst und der Versuch kann beendet werden. Unter Berücksichtigung der zusätzlich gemessenen Wanddicke und der erforderlichen Umformarbeit wird für jeden Prüfpunkt ein spezifischer Kennwert ermittelt. Dieser

Kennwert kann mit dem definierten Grenzwert der jeweiligen späteren Fügeaufgabe verglichen werden und erlaubt somit eine Aussage hinsichtlich der Fügbarkeit. Durch weitere Untersuchungen konnte der ermittelte Kennwert in Korrelation zum Messwert des Biegewinkels gesetzt werden und ermöglicht so die Vergleichbarkeit der bestehenden und der neuen Messmethode.

Die neu entwickelte Prüfmethode bietet folgende Vorteile:

- Biegeplatten müssen nicht aus Bauteilen herausgetrennt werden
- punktförmiges Prüfverfahren vergleichbar mit dem Stanznietprozess
- Ermittlung der Duktilität des Werkstoffs an den späteren Fügestellen
- Fügestellen zweiseitiger Zugänglichkeit können ohne Bauteilschnitte beprobt werden
- quantitativer Messwert ohne optische Bewertung
- Versuchsdurchführung je Prüfpunkt innerhalb weniger Sekunden

4. Übertragung der Methode auf eine seriennahe Prüfeinrichtung

Um die Vergleichbarkeit zum späteren Stanznietprozess zu erhöhen wurde die Prüfmethode von der zunächst verwendeten Zugprüfmaschine auf eine Stanznietzange übertragen, wobei auf die die Zuführtechnik von Fügeelementen verzichtet werden kann. So konnte die Voraussetzung geschaffen werden, dass all jene Bauteilbereiche beprobt werden können, an welchen später im Rohbau auch gefügt wird – und dies ohne das Bauteil zersägen oder Proben entnehmen zu müssen. So ist es möglich, die Duktilität eines Bauteils genau an jenen Stellen eines Bauteils zu bestimmen, die für die Fügetechnik relevant sind.

[1] VDA 238-100 (Prüfblatt), Plättchen-Biegeversuch für metallische Werkstoffe, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Dezember 2010

Prozessstabilisierung durch automatisierte Erkennung von Oberflächenfehlern in der Gesamtprozesskette Al-Druckgussbearbeitung

Improving the process chain after high-pressure die casting of complex aluminum structures by an automated detection of surface failures

Prof. Dr.-Ing. **Sven Roeren**, Hochschule Landshut, Technologiezentrum „Produktions- und Logistiksysteme PuLS“, Dingolfing
Matthias Wagensonner, M.Sys.-Eng., Technologiezentrum Dingolfing GmbH – Aninstitut der Hochschule Landshut

Kurzfassung

Ziel des vorgestellten Forschungsthemas ist zum einen die Entwicklung einer Technologie zur automatischen Erkennung und Klassifizierung von Oberflächenfehlern bei druckgegossenen Aluminium-Strukturbauten. Im Weiteren sollen durch eine objektive Bewertung von potenziellen Schadstellen Wirkketten zwischen einzelnen Prozessen der Prozesskette identifiziert und faktenbasiert verifiziert werden. Abschließendes Ziel ist die Reduzierung von Ausschuss durch die Verbesserung der Beherrschbarkeit von Prozesseinflüssen in der komplexen Wertschöpfungskette von gegossenen Aluminium-Strukturbauten.

Ferner wird angestrebt, eine übergreifende Systematik hinsichtlich der Definition und Kategorisierung von Blistern zu erstellen, da derzeit für die Anwender von Aluminium-Druckguss-Strukturbauten noch keine abgestimmte allgemein gültige Richtlinie zur Bewertung von Schadstellen existiert.

Abstract

Aluminum tends to be a favorite concept for many automotive OEM, with a rising impact on characteristics of lightweight structures. Thus, complex process chains after a high-pressure die casting process including grinding, machining, and coating are to be established to fulfill all requirements of the customers. In this paper a first approach is shown to implement certain quality cycles to improve the correlation between different steps in the process chain. For that purpose a common understanding of failures of these structures is needed. In some cases, e.g. blisters, there is no actual guideline for a systematic evaluation of failures. This is a main target of the authors' research work. Upon that an automatically evaluation of failures

can be implemented into a process chain of pressure casting and the machining processes of complex aluminum parts in automotive industry.

1. Ausgangslage und Beschreibung der Herausforderungen

Der Markt von Aluminium-Strukturauteilen wird sich in den kommenden Jahren stark verändern, eine starke Zunahme von Bearbeitungsumfängen und Produktionskapazitäten ist für die kommenden Jahre abzusehen. Alle großen Premiumhersteller im Automobilbereich erhöhen den Anteil an Aluminium-Druckguss-Komponenten und folgen damit einem konsequenten Umsetzen der Vorgaben an Leichtbau-Konzepte im Zusammenhang mit der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes der eigenen Flotte [1,2,3].

Der gesellschaftliche und politische Druck auf die Fahrzeughsteller zur Reduzierung von Emissionen führt dazu, dass auf der Basis von Aluminiumwerkstoffen immer komplexere Bauteile mit hoher Funktionalität entwickelt werden. Als Konsequenz daraus steigen die Komplexität in den Prozessketten und zwangsläufig die Anforderungen an die Abstimmung einzelner Glieder der komplexen Prozesskette.

Die Einsetzbarkeit der Strukturauteile und die Realisierung dezidierter Funktionen und Anforderungen bedingt einen teilweise hohen Aufwand an Nachbearbeitung nach dem Gießprozess, im Fachjargon auch „Folgeprozesse“ genannt. Neben der Oberflächenbearbeitung der gegossenen Strukturen, vor allem zur Vorbereitung späterer Fügeflächen sind die Einbringung zahlreicher Innengewinde, Gewindegelenken und Durchgangslöcher zu nennen, um im Anschluss weitere Anbauelemente fixieren zu können. Außerdem gibt es einige Aluminium-Legierungen, die durch einen nachgelagerten Wärmeprozess gehärtet werden müssen, um spezifische Festigkeitsanforderungen erreichen zu können. Auch Richtprozesse sind in diesem Zusammenhang vorstellbar, um eine beim Gießen nicht erreichte oder erreichbare Maßhaltigkeit der Bauteile beim Einbau in das Fahrzeug gewährleisten zu können. Schließlich existieren noch Anforderungen an die Beständigkeit der Oberfläche, was einen Beschichtungsprozess, wahlweise nach Anforderungen des OEM in Form einer kathodischen Tauchlackierung oder in Form eines Beizpassivierprozesses. Diese Prozesse in Verbindung mit logistischen und qualitätsbezogenen Umfängen ergeben den Betrachtungsgegenstand des vorliegenden Berichtes und werden in Abbildung 1 zusammenfassend dargestellt.



Bild 1: Überblick zu den Folgeprozessen der Aluminium-Druckguss-Strukturauteile; die Darstellung beinhaltet eine fiktive Prozesskette, je nach Produkt und Kunde wird diese Prozesskette individuell angepasst. Der mit * bezeichnete Montageschritt ist je nach Produkt auch an anderer Stelle in der Prozesskette platzierbar, etwa nach einer Beschichtung.

Durch die Ausreizung der produktspezifischen Eigenschaften der Bauteile, etwa hinsichtlich Festigkeitswerte oder Maßhaltigkeit ergibt sich eine deutliche Zunahme an die Qualitätskriterien der beschriebenen Teilprozesse in der Produktion. Betrachtet man die unterschiedlichen physikalischen Beeinträchtigungen etwa bei einem Prozessschritt der Wärmebehandlung, während dessen sich das Verzugsverhalten in Abhängigkeit der Eigenspannungssituation, maßgeblich resultierend aus dem urformenden Gießprozess ergibt. Nach dem Auflösen der inneren Spannungen ergibt sich ein indefiniter maßlicher Zustand. Simulationsbasierte Vorgehensweisen zeigen realitätsnahe Ergebnisse und sind gerade in Hochlohnländern unverzichtbarer Bestandteil einer effizienten Prozesskettenauslegung. Allerdings sind in der Etablierung einer situationsspezifischen produktionsnahen Situation aufwendig und stark durch das Know-how der Anwender beeinflusst [4].

Eine weitere potenzielle Qualitätsbeeinträchtigung über mehrere Prozessschritte hinweg besteht in der Ausbildung von so genannten Blistern, die während einer Wärmebehandlung eines gegossenen Bauteils entstehen [5]. Ursächlich dafür sind zum Teil minimale Lufteinschlüsse im Bauteilkontinuum während des Gießprozesses, die während der Wärmebehandlung in Gestalt einer ausgasenden Blase die Form der Oberfläche markant verändern.

Derzeit existiert weder für die Beschreibung noch für die Bewertung solcher Blister eine branchenweit etablierte Richtlinie, die in der Kommunikation zwischen Lieferant und Kunde oder auch zur Definition von schadhaften bzw. nachzuarbeitenden Bauteilen innerhalb eines Unternehmens herangezogen werden kann. Diese stellt die Basis für eine objektive Bewertung von Schadstellen dar. Aktuell erfolgt die Qualitätskontrolle der Bauteile meist manuell durch eine Sichtkontrolle der einzelnen Werker. Die Bewertung und die Klassifizierung von (potenziellen) Fehlstellen sind daher stark subjektiv beeinflusst. Dadurch können Ergebnisse zur Verbesserung der vorherigen Prozesse können nur begrenzt genutzt werden und die Identifizierung von Wirkketten zwischen den Prozessen lässt sich nicht effizient und faktenbasiert darstellen.

Im Folgenden soll das Vorgehen des Forschungsvorhabens „Automatisierte Blistererkennung von aluminiumgegossenen Strukturauteilen“ am Technologiezentrum Dingolfing der Hochschule Landshut beschrieben werden.

2. Konzeptionelles Vorgehen

Letztendlich werden mit der Objektivierung der Merkmalserkennung von Oberflächenfehlern zwei wesentliche Zielrichtungen verfolgt. Neben der Reduzierung von Produktkosten durch die Verringerung der Nacharbeits- und Ausschussumfänge durch eine situative Wirkkettenbildung trägt die Erhöhung der Planbarkeit und der Stabilität in der Prozesskette zu einer Erhöhung der Attraktivität von Aluminium-Strukturguss-Konzepten bei.

Wesentlicher Ausgangspunkt einer objektivierten Fehlererkennung liegt in einem klar spezifizierbaren Raum möglicher Merkmalsausprägungen. Dafür muss eine einheitliche und transparent anwendbare Klassifizierung von Anforderungen aber auch von gemessenen Größen etabliert sein, um Algorithmen zur Fehlererkennung und zur Vergleichbarkeit von Messergebnissen realisieren zu können. Diese sind notwendige Faktenbasis, um Wirkketten identifizieren zu können und Relationen zwischen Einflussgrößen im Prozess und Auswirkungen am Produkt darstellen zu können. In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. Diese Vorgehensweise beschreibt den Ansatz der Forschungsaktivitäten mit dem Ziel der Stabilisierung von komplexen Prozessketten, innerhalb derer eine rein theoretisch-analytische Vorgehensweise nicht in ausreichend anwendungsorientierten Maße die komplexen Einflussgrößenüberlagerungen der produktionstechnischen Praxis widerspiegelt.

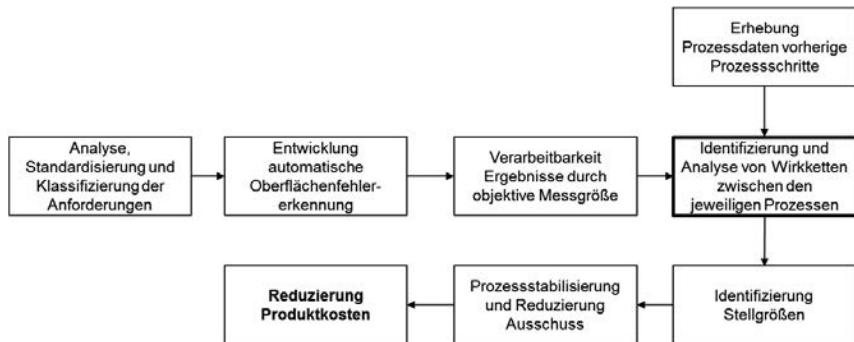


Bild 2: Vorgehensweise zur Prozessstabilisierung durch automatisierte Erkennung von Oberflächenfehlern in der Gesamtprozesskette der Aluminium-Druckguss-Bearbeitung

3. Hypothesen

Aus den bislang erkannten Zusammenhängen im Umfeld der Bearbeitung von gegossenen Strukturbauteilen im Umfeld der Automobilindustrie können auf der Basis von relevanten Projekten und Beobachtungen folgende Hypothesen festgehalten werden:

Hypothese 1: Die Bedeutung von Aluminium-Strukturbauteilen in der Automobilindustrie wird in den kommenden Jahren weiter steigen. Zunehmend werden die Auslegungen von Strukturbauteilen an die Möglichkeiten und Grenzen der Gießprozesse angepasst werden und erlauben dadurch eine weitere Verbesserung von spezifischen Festigkeitscharakteristika

Hypothese 2: Die Gießerei-Folgeprozesse werden künftig hinsichtlich organisatorischer, technologischer und qualitätsbezogener Komplexität weiter steigen. Letztendlich kann ein Optimum nur durch eine frühzeitige und intensive Abstimmung aller Teilprozesse der Prozesskette aufeinander erreicht werden.

Hypothese 3: Eine Objektivierung der Fehlermerkmale ist zwingende Voraussetzung für eine effiziente Industrialisierung und eine stabile und ausschussminimierte Fertigung von gegossenen Aluminium-Strukturbauteilen.

Hypothese 4: Gelingt es, eine Standardisierung von Kriterien zur Definition von Schadstellen an der Oberfläche zu erreichen, können heute bereits verfügbare technische Lösungen etwa

der Bilderkennung eingesetzt werden, um automatisiert Schadstellen zu identifizieren und während des Serienbearbeitungsprozesses (im Rahmen der Taktzeiten) zu befinden.

4. Automobiler Arbeitskreis

Zur Validierung der dargestellten Hypothesen und zur Definition branchenweiter Standards zur Beschreibung von Blistern ist im Jahr 2015 ein Arbeitskreis aus dem Kreis von Anwendern und Herstellern druckgegossener Aluminium-Struktur-Bauteile etabliert worden. Im Rahmen der ersten beiden Sitzungen des Arbeitskreises konnten Vertreter der Unternehmen AUDI, BMW, Daimler, Georg Fischer, Handtmann, Magna BDW, Nemak, Porsche, RDW und SAR elektronic (Nennung in alphabetischer Reihenfolge und ohne Bezeichnung der Rechtsform) begrüßt werden. Die Zielsetzung des Arbeitskreises besteht in einer Verbesserung der Standards zur Beschreibung von Fehlern von gegossenen Aluminium-Strukturbauten und damit in einer Vorbereitung der standardisierbaren automatisierten Fehlerdetektion in dieser komplexen Prozesskette.

Bereits im Jahr 2016 soll ein Entwurf einer Richtlinie erstellt werden, der die Anforderungen aller wesentlichen Marktteilnehmer repräsentiert. Parallel soll am Technologiezentrum „Produktions- und Logistiksysteme“ der Hochschule Landshut in Dingolfing eine Pilotanlage zur automatisierten Erkennung von Oberflächen-Schadstellen an gegossenen Aluminium-Strukturbauten aufgebaut werden

- [1] Ahrens, M.: Leichtbaupotenziale von Leichtmetallguss-Metallhybriden. In: Tagungsband zum Leichtbaugipfel, Vogel Business Media. 18.-19. März 2015, Würzburg.
- [2] Zangerle, S.: Marktentwicklung von Leichtmetall-Strukturgussbauteilen. In: Tagungsband zur 1. VDI-Tagung Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten, VDI-Wissensforum. 11.-12. Februar 2015, Freising.
- [3] Sauber, K.; Von der Idee zum Bauteil: Anforderungen an die OEM-Prozesskette im Leichtmetall-Druckguss. In: Tagungsband zum 5. VDI-Leichtbaukongress. VDI-Wissensforum. 7.-8. Juli 2015, Wien.
- [4] Siegbert, R.; Yesildag, N.; Frings, M.; Schmidt, F.; Elgeti, S.; Sauerland, H.; Behr, M.; Windeck, C.; Hopmann, C.; Queudeville, Y.; Vroomen, U.; Bührig-Polaczek, A.: Individualized production in die-based manufacturing processes using numerical optimization. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80 /5, S. 851-858.
- [5] Lumley, R.; O'Donnell, R.; Gunasegaram, D.; Kittel-Sherri, T.; Gershenzon, M.; Yob, A.; Polmear, I.: The role of alloy composition in the heat treatment of aluminium high pressure die castings. In: Metallurgical Science and Technology, 2008, 26 /2, S. 2-11.

Simulationsgestützte Auslegung des Sprühprozesses im Leichtmetall-Druckguss

Simulation-based design of the spraying process in high pressure die casting

Dipl.-Ing. **Johannes Müller**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Martin Fehlbier**,
GTK, Universität Kassel;
Dipl.-Ing. **Kay Sauber**, AUDI AG, Ingolstadt

1. Motivation und Zielsetzung

Der Temperaturhaushalt eines Werkzeugs im Leichtmetall-Druckguss ist eine entscheidende Prozessrandbedingung bei der Produktion komplexer Strukturguss-Bauteile. Die Werkzeugtemperaturen werden dabei neben dem Formfüll- und Erstarrungsprozess vor allem durch die interne Temperierung der Form und den Sprühprozess beeinflusst [1].

Die Auslegung der Sprühkühlung erfolgt heute rein erfahrungsorientiert, ohne eine simulationsgestützte Auslegung und Absicherung. Darüber hinaus nimmt die Programmierung und Einrichtung des Sprühprozesses viel Zeit in Anspruch. Dieser Einrichtungsprozess findet zudem innerhalb der Gießzelle statt, was einen kostenverursachenden Produktionsstillstand mit sich führt. Weiterhin stellen sich der bedarfsgerechte Auftrag des Trennstoff-Wasser-Gemisches und die taktzeitoptimierte Bewegungssteuerung des Sprühroboters als Optimierungspotential dar. Bei einer herkömmlichen Prozessoptimierung in der Gießzelle ist dies wiederum mit einem Stillstand des Produktionsprozesses und damit mit hohen Kosten verbunden.

Die Ursache, dass bei der Auslegung des Sprühprozesses die thermischen Simulation bis heute eine untergeordnete Rolle spielt, liegt zum einen an der fehlenden Schnittstelle zwischen Simulation und Realprozess und zum anderen in der stark vereinfachten Modellierung und Berechnung der Sprühkühlung im Leichtmetall-Druckguss [2].

In Bild 1 ist der reale Sprühprozess auf der beweglichen Formhälfte der Federbeinaufnahme des Audi R8 dargestellt. Für eine bessere Visualisierung des Prozessschritts sind die resultierenden Sprühkegel des Sprühwerkzeugs hervorgehoben.

Innerhalb der ersten 7 s wird die gesamte Formhälfte flächig mit einem Trennstoff-Wasser-Gemisch beaufschlagt. Im Anschluss erfolgt die lokale Kühlung von Hot-Spots mit drei speziifischen Sprühdüsen. Insgesamt ergibt sich für die Sprühkühlung eine Dauer von 20 s.

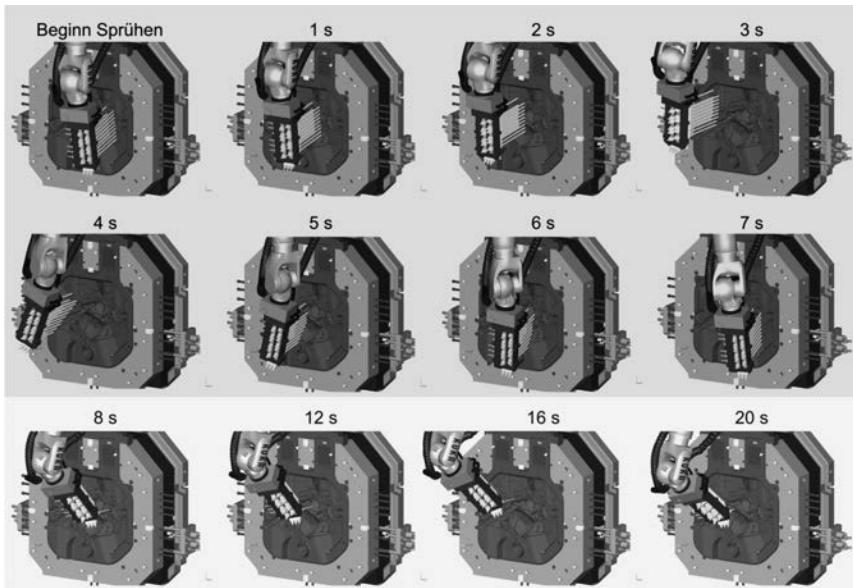


Bild 1: Sprühprozesses auf der beweglichen Formhälfte der Federbeinaufnahme des Audi R8. Für eine bessere Visualisierung sind die Sprühkegel am Sprühwerkzeugs grafisch dargestellt. Innerhalb der ersten 7 s erfolgt ein flächiger Auftrag des Trennstoff-Wasser-Gemischs. Im Anschluss werden lokale Hot-Spots gezielt gekühlt. Insgesamt dauert der Prozessschritt 20 s.

Um den thermischen Haushalt des Werkzeugs zu berechnen, wird eine Zyklensimulation durchgeführt, in der alle thermisch relevanten Prozessschritte abgebildet werden. In Bild 2 ist das Ergebnis der Simulation während des Sprühprozesses abgebildet. Aufgetragen ist die Temperatur der Werkzeugoberfläche zwischen 100 °C und 200 °C. Zu Beginn des Sprühprozesses ist eine Druckguss-typische Temperaturverteilung im Werkzeug, mit thermisch hoch belasteten Bereichen in der Amboss- und Anschnittgeometrie sowie in lokalen Hot-Spots in der Kavität zu erkennen.

Während der Sprühkühlung findet die Abkühlung ausschließlich innerhalb der Werkzeugkontur statt. Somit wird weder die reale Sprühfläche noch die Bewegung des Sprühkopfes im

Simulationsmodell berücksichtigt. Aufgrund der Tatsache, dass die Kühlung nur innerhalb der Werkzeugkontur stattfindet und somit keine realen Prozesszeiten übertragen werden können, muss eine Sprühkontaktezeit abgeschätzt werden [3]. Diese besitzt eine Auswirkung auf die thermische Simulation und wird in diesem Beispiel mit 5 s angenommen.

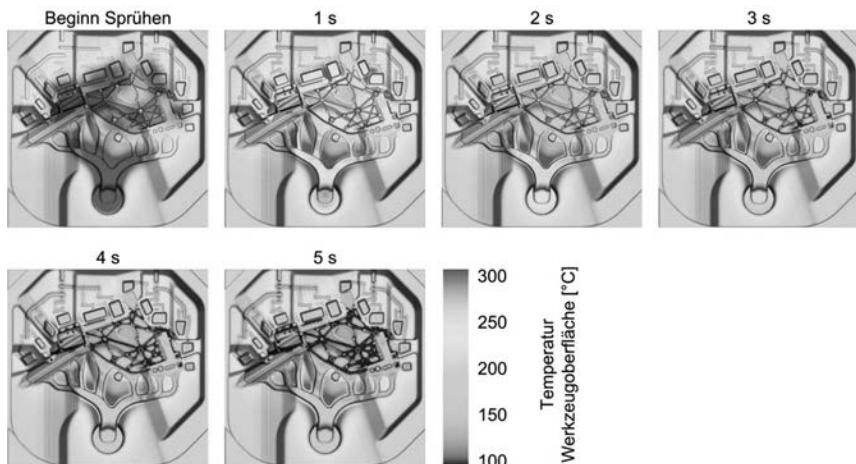


Bild 2: Thermische Simulation der festen Formhälfte während des Sprühprozesses. Hierfür wird die Sprühkontaktezeit mit 5 s abgeschätzt. Die Abkühlung findet ausschließlich innerhalb der Werkzeugkontur, welche das Gussteil abbildet statt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Modellierung des Sprühprozesses aktuell nicht realitätsnah erfolgt, sind die Ergebnisse der thermischen Simulation nur bedingt für eine Prozessauslegung geeignet.

Das Ziel besteht in einer durchgängigen, simulationsgestützten Auslegung des Sprühprozesses. Dazu wird zum einen die Modellierung der Sprühkühlung in der thermischen Zyklensimulation optimiert und eine Schnittstelle definiert, durch welche Ergebnisse unmittelbar für die Auslegung des Sprühprozesses genutzt werden können. Zum anderen wird eine Methode vorgestellt, den Sprühprozess zukünftig in einem simultaneous engineering Prozess offline innerhalb einer virtuellen Gießzelle zu programmieren und anschließend auf den Realprozess zu übertragen.

2. Realitätsnahe Abbildung des Sprühprozesses in der Simulation

Für die exakte Berechnung des thermischen Haushalts eines Werkzeugs im Leichtmetall-Druckguss sind die realitätsnahe Modellierung des Sprühprozesses und die genaue Kenntnis temperaturspezifischer Eingangsparameter entscheidend. Deshalb wird im Folgenden die Modellierung der realen Sprühfläche, der Übertrag der Sprühkopfbewegung und die Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten vorgestellt.

Modellierung der realen Sprühfläche

Für eine Modellierung der realen Sprühfläche in der thermischen Simulation wird der Sprühkegel aus dem CAD-Modell in das Simulationsmodell übertragen. Das Prinzip ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Die Grundalge bildet das CAD-Modell der Sprühdüse und des resultierenden Sprühkegels. Die Definition des Sprühkegels im Simulationsmodell erfolgt über die Ursprungs- und Richtungskoordinaten. Dadurch ergibt sich ein Richtungsvektor, welcher in Zusammenhang mit einem Öffnungswinkel jeden Sprühkegel in dessen Lage und Form eindeutig beschreibt. Über die Schnittfläche des Sprühkegels mit der Werkzeugoberfläche ist die Ermittlung der realen Sprühfläche möglich [4].

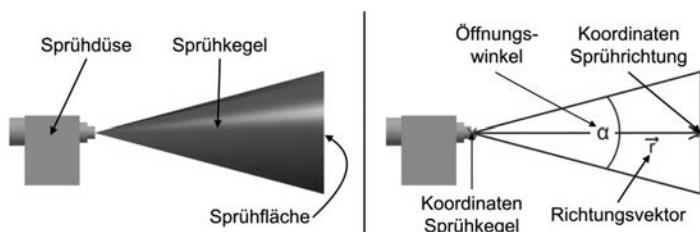


Bild 3: Übertrag des Sprühkegels aus dem CAD-Modell in das Simulationsmodell zur Modellierung der realen Sprühfläche. Jeder Sprühkegel wird in der Simulation mittels der Ursprungs- und Richtungskoordinaten und eines Öffnungswinkels beschrieben [4].

Übertrag der Sprühkopfbewegung

Die Kopplung der virtuellen Prozessplanung mit dem Simulationsmodell ist der entscheidende Baustein um die Bewegung des Sprühkopfes zu berücksichtigen. Für einen Übertrag der Roboterbewegung erfolgt der Export der Roboter-Trajektorie und der realen Prozesszeiten aus dem digitalen Modell der Gießzelle.

In Bild 4 ist die Sprühfläche während der Sprühkühlung als Ergebnis im Simulationsmodell dargestellt. Die bewegliche Formhälfte des Druckguss-Werkzeugs ist in rot, die Sprühfläche in blau dargestellt. Analog des Realprozesses werden sowohl die variierende Sprühfläche als auch die korrekten Prozesszeiten abgebildet. Somit ist keine Abschätzung der Sprühkontakteidauer mehr notwendig. Neben der Sprühkopfbewegung ist zudem die geometrisch exakte Abbildung der einzelnen Sprühkegel, welche auf der Werkzeugoberfläche eine runde Fläche projizieren erkennbar.

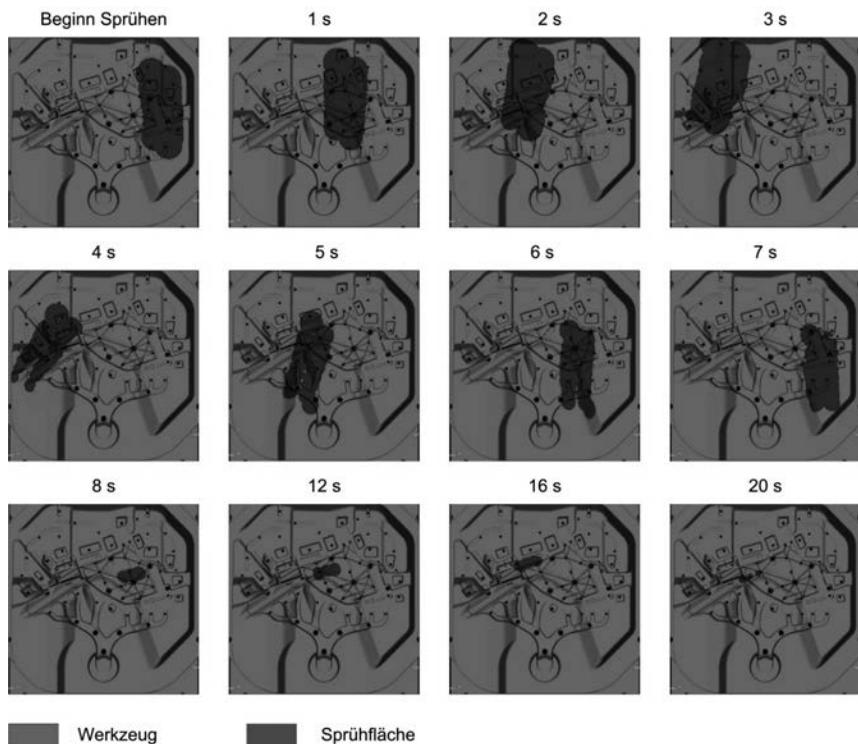


Bild 4: Darstellung der Sprühkopfbewegung im thermischen Simulationsmodell. Das Werkzeug ist in rot und die Sprühfläche, welche analog des Realprozesses variiert, in blau verdeutlicht.

Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten

In einem weiteren Schritt werden Wärmeübergangskoeffizienten für das neue Simulationsmodell experimentell bestimmt. Der Wärmeübergangskoeffizient gilt in der Simulation als zentrale Größe zur Beschreibung von Wärmeübergängen an der Grenzfläche zweier Medien [5]. Der Wärmeübergangskoeffizient ist dabei von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig [6]. Vor allem sind dabei der geometrische Einfluss der Werkzeugoberfläche und deren Temperatur interessant [7]. Der Lösungsansatz liegt in einer experimentellen Untersuchung der Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der in Bild 5 dargestellten Einflussfaktoren. Zunächst wird der Einfluss einer variierenden Temperatur der Werkzeugoberfläche (1) auf die der Sprühkegel (2) trifft untersucht. Dabei erfolgt die Variation der Oberflächentemperatur zwischen 50 °C und 350 °C.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist der Abstand zwischen Ursprung des Sprühkegels (3) und Werkzeugoberfläche entlang des Sprühvektors (3). Der Abstand variiert dabei zwischen 50 mm und 500 mm. Die verwendeten Intervalle liegen bei 50 mm.

Weiterhin erfolgt die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Einfallswinkels ε . Dieser ergibt sich zwischen der Oberflächennormalen (5) und dem Sprühvektor. Bei einem Sprühwinkel von 0 ° trifft der Sprühstrahl senkrecht auf die Werkzeugoberfläche. Bei 90 ° liegt der Sprühvektor parallel zur Werkzeugoberfläche. Innerhalb dieses Wertebereichs erfolgt die Untersuchung in 10 ° Intervallen.

Der dritte geometrische Einflussfaktor auf den Wärmeübergangskoeffizienten ist der Sprühwinkel ε . Hierbei handelt es sich um den Winkel innerhalb des Sprühkegels zwischen dem Sprühvektor und einer Geraden zwischen dem Ursprung des Sprühkegels und einem Punkt auf der Sprühfläche. Bei einem Sprühwinkel von 0 ° liegt die Oberflächenzelle des Rechennetzes unmittelbar im Zentrum der Sprühfläche. Bei einem Sprühwinkel von 10 ° befindet sich die Oberflächenzelle am Rand der Sprühfläche, da der Öffnungswinkel der verwendeten Sprühdüse 20 ° beträgt.

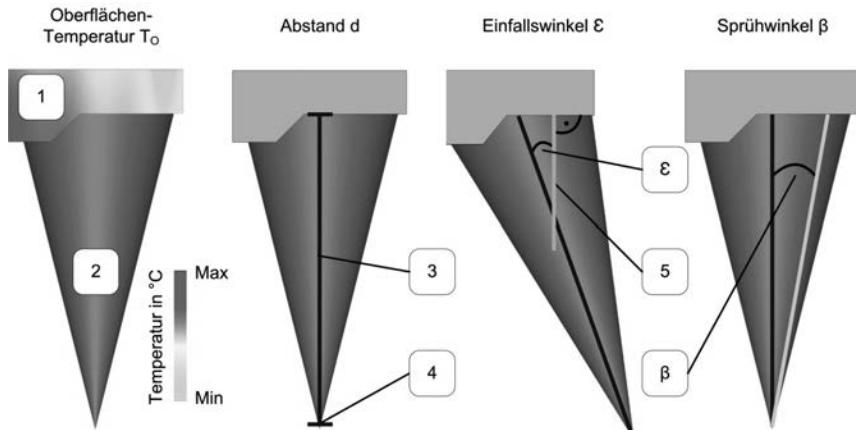


Bild 5: Übersicht der untersuchten Einflussfaktoren auf den Wärmeübergangskoeffizienten. Unter den jeweiligen Parametern ist das Ergebnis der experimentellen Untersuchung dargestellt.

Im neu entwickelten Simulationsmodell wird der Wärmeübergangskoeffizient in jedem Zeitschritt lokal in jeder Oberflächenzelle des Rechennetzes, die im Kontakt mit Sprühmedium steht, mittels der experimentell bestimmten Werte berechnet.

3. Anwendung des neuen Sprühmodells am Beispiel Federbeinaufnahme Audi R8

Nachdem die einzelnen Funktionsbestandteile des neuen Simulationsmodells und die Untersuchungsschwerpunkte bei der Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten vorgestellt sind, erfolgt die Anwendung und Validierung im Realprozess. Dazu wird das Strukturgussbauteil Federbeinaufnahme des Audi R8 herangezogen. In Bild 6 ist die Karosseriestruktur des Audi R8 mit einer graphischen Darstellung der Gussteile, der Profile und der Bleche aus Aluminium sowie der Magnesium-Bauteile abgebildet [8]. Dabei ist auch die Federbeinaufnahme in einer detaillierten Ansicht zu erkennen.

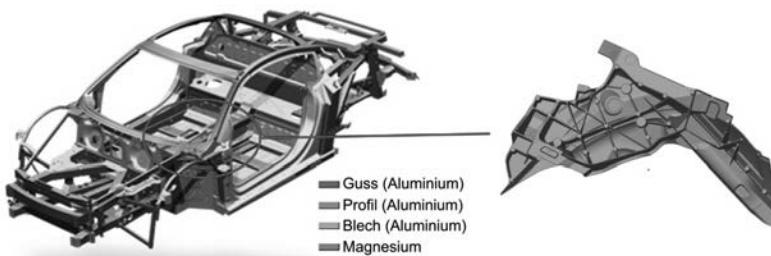


Bild 6: Karosseriestruktur des Audi R8. Farblich gekennzeichnet sind Gussbauteile, Profile und Bleche aus Aluminium sowie Magnesiumbauteile. Das Strukturgussteil Federbeinaufnahme ist dabei vergrößert dargestellt [8].

Das Werkzeug der Federbeinaufnahme wird zunächst in einem konventionellen Simulationsmodell und anschließend dem neu entwickelten Modell thermisch berechnet. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Temperaturen im Werkzeug während der Sprühkühlung. Für eine Gegenüberstellung der Temperaturverläufe werden bei der Simulation in die bewegliche Formhälfte des Werkzeugs insgesamt drei virtuelle Thermoelemente positioniert, wie in Bild 7 dargestellt.

Das erste Thermoelement ist innerhalb des Gussteils platziert. Das zweite Thermoelment befindet sich außerhalb der Werkzeugkavität. Das dritte Thermoelment ist im Amboss positioniert.

Der Sprühprozess ist bereits in Bild 1 detailliert vorgestellt. Für die thermische Simulation werden alle thermisch relevanten Prozessschritte abgebildet. Um ein thermisches Gleichgewicht innerhalb der Gießzyklen zu gewährleisten, werden je Simulationsmodell 8 aufeinander folgende Zyklen berechnet.

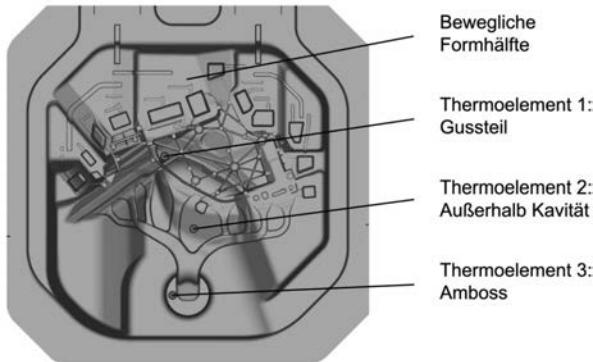


Bild 7: Bewegliche Formhälfte des Werkzeugs für die Federbeinaufnahme des Audi R8. In den Simulationsmodellen werden darin an drei Positionen virtuelle Thermoelemente für eine Gegenüberstellung der Simulationsmodelle positioniert. Im Gussteil (Thermoelement 1), außerhalb der Werkzeugkavität (Thermoelement 2) und im Amboss (Thermoelement 3).

In Bild 8 ist die simulierte Oberflächentemperatur des Werkzeugs während der Sprühkühlung, welche mit dem neuen Simulationsmodell ermittelt wurde dargestellt. Hierbei ist die Berechnung der exakten Sprühfläche deutlich zu erkennen. Auch die Bewegung des Sprühkopfes ist analog der im Realprozess, wie in Bild 1 verdeutlicht. Zunächst ist innerhalb der ersten 7 s der flächige Auftrag des Trennstoff-Wasser-Gemischs ersichtlich und im Anschluss das Kühlen lokaler Hot-Spots in der Form.

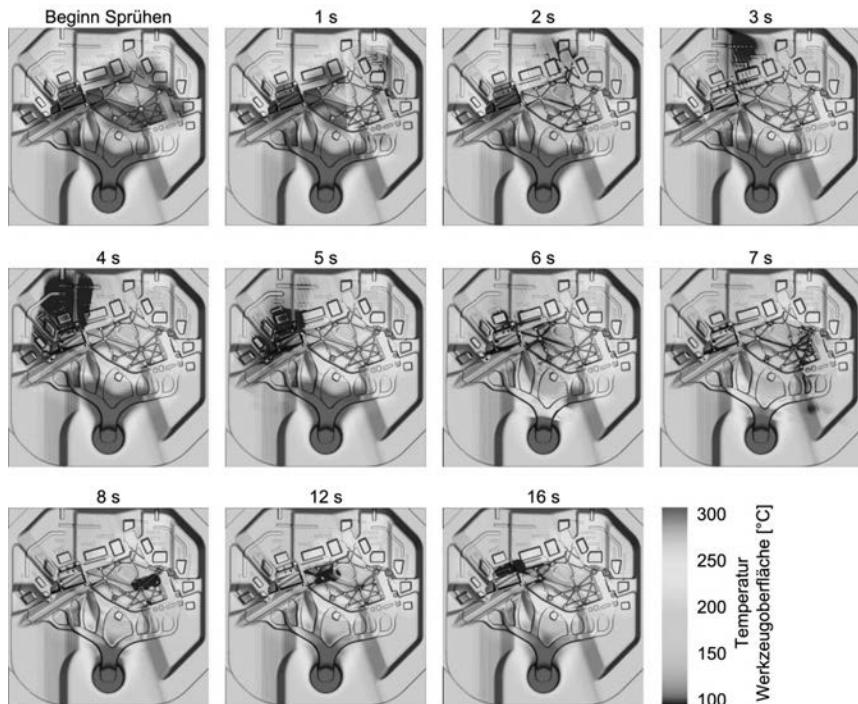


Bild 8: Simulierte Oberflächentemperaturen während der Sprühkühlung. Dargestellt ist die bewegliche Formhälfte des Werkzeugs für die Federbeinaufnahme des Audi R8.

In Bild 9 ist der Temperaturverlauf der drei Thermoelemente dargestellt, welche mit dem konventionellen Simulationsmodell berechnet wurden. Im linken Teilbild ist die Temperatur über den gesamten Gießzyklus abgebildet. Im rechten Teilbild ist der detaillierte Temperaturverlauf während der Sprühkühlung verdeutlicht.

Dabei ist festzuhalten, dass die Abkühlung ausschließlich innerhalb der Kavität und für die definierte Sprühkontaktezeit von 5 s andauert. Außerhalb der Kavität findet beispielsweise keine Abkühlung statt, auch wenn diese im Realprozess erfolgt. Der Amboss hingegen erfährt in der Simulation eine Abkühlung, auch wenn diese im Realprozess nicht vorliegt.

Zum Ende des Sprühprozesses beträgt die Temperatur des Thermoelements im Gussteil 209 °C, im Amboss 249 °C und außerhalb der Kavität 266 °C.

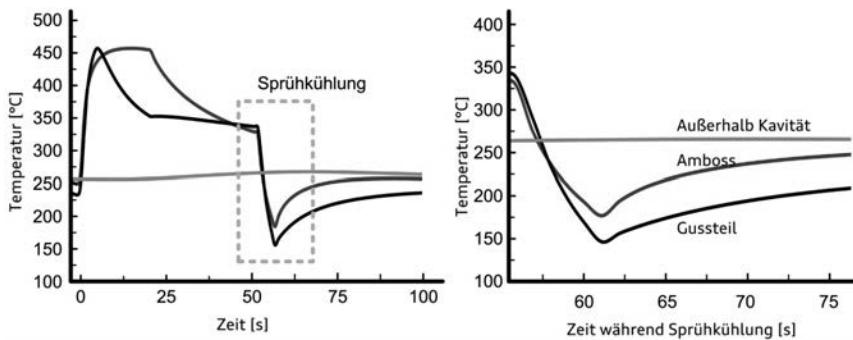


Bild 9: Temperaturverlauf im Validierungszyklus, berechnet mit dem konventionellen Simulationsmodell. Im linken Teilbild ist die Temperatur über den gesamten Gießzyklus, im Rechten während der Sprühkühlung aufgetragen. In beiden Diagrammen sind die Ergebnisse der drei Thermoelemente, Gussteil, Außerhalb Kavität und Amboss abgebildet.

Die Temperaturverläufe, die mit dem neu entwickelten Simulationsmodell berechnet wurden, sind in Bild 10 abgebildet. Auch hier ist im linken Teilbild die Temperatur des Thermoelements im Gussteil, im Amboss und außerhalb der Kavität über den gesamten Gießzyklus dargestellt. Im rechten Teilbild liegt der Fokus auf der Sprühkühlung.

Hierbei ist auch das grundlegend unterschiedliche thermische Verhalten der Thermoelemente auszumachen. Zunächst erfolgt die Abkühlung nicht an allen Positionen gleichzeitig, vielmehr ist diese abhängig der Roboterbewegung. Darüber hinaus erfolgt im Gussteil beispielsweise eine mehrmalige Abkühlung. Auch außerhalb der Kavität wird im Realprozess gekühlt, was auch im simulierten Temperaturverlauf abgebildet wird. Der reale Sprühprozess ist somit realitätsnah in das neue Simulationsmodell übertragbar.

Die Temperatur nach der Sprühkühlung liegt im Thermoelement im Gussteil bei 186 °C, im Amboss bei 331 °C und außerhalb der Kavität bei 250 °C.

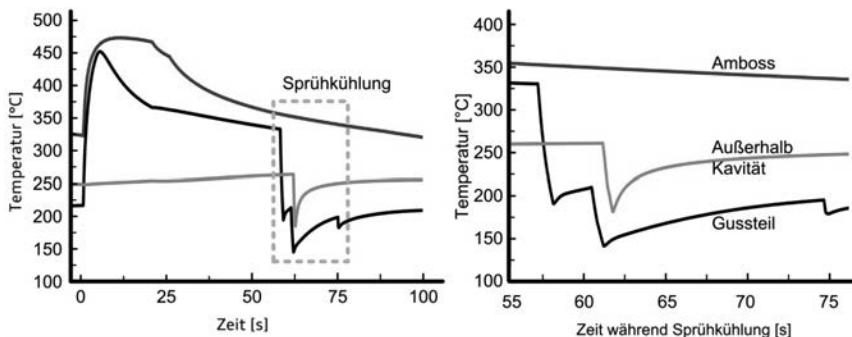


Bild 10: Temperaturverlauf im Validierungszyklus, berechnet mit dem neu entwickelten Simulationsmodell. Im linken Teilbild ist die Temperatur über den gesamten Gießzyklus, im Rechten während der Sprühkühlung aufgetragen. In beiden Diagrammen sind die Ergebnisse der drei Thermoelemente, Gussteil, Außerhalb Kavität und Amboss abgebildet.

Damit ist ein erheblicher Unterschied zwischen den beiden Simulationsmodellen während der Sprühkühlung auzumachen. Das Thermoelement im Gussteil zeigt eine Differenz von 23 K. Im Amboss liegt der Unterschied bei 82 K und außerhalb der Kavität bei 16 K. Diese Temperaturunterschiede können bereits eine erhebliche Auswirkung auf den realen Gießprozess haben. Dies kann in Form von lokalen Hot-Spots zu einer erhöhten Klebeneigung des Aluminiumbauteils in die Form führen oder beispielsweise zu einer Kaltlaufgefahr bei zu geringen Temperaturen im Angussystem.

4. Virtuelle Prozessplanung in der digitalen Gießzelle

Um die Erkenntnisse und Ergebnisse der thermischen Simulation optimal in den Realprozess übertragen zu können, wird die virtuelle Prozessplanung als Schnittstelle eingesetzt. Innerhalb des digitalen Modells der gesamten Gießzelle können alle Roboter-Bewegungen analog des Realprozesses simuliert und anschließend programmiert werden.

Bild 11 stellt die virtuelle Gießzelle dar. Für eine optimale Auslegung des Sprühprozesses werden die Ergebnisse der thermischen Simulation in die virtuelle Prozessplanung eingebunden. Auf dieser Basis werden sowohl die Auslegung der Trajektorien des Roboters als auch die Programmierung der SPS-Befehle durchgeführt. Zur Kollisionsprävention werden

die erstellten Sprühprogramme in deren Bewegungsablauf in der virtuellen Gießzelle simuliert.

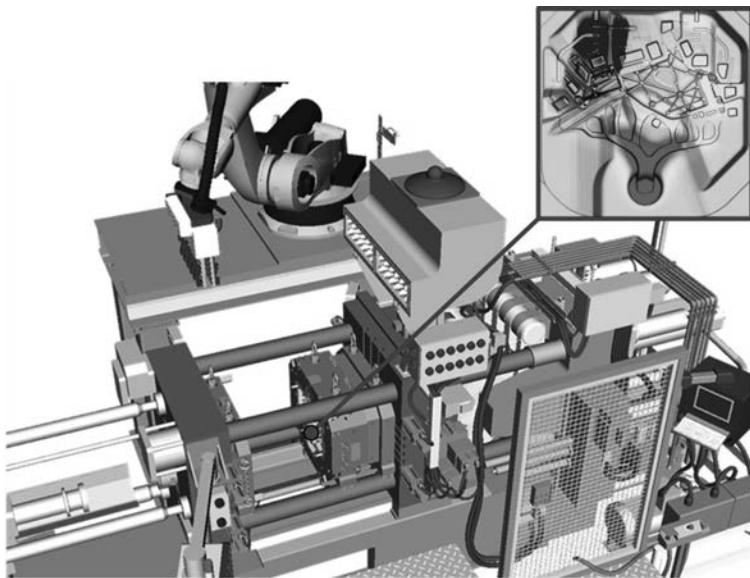


Bild 11: Digitales Modell der virtuellen Gießzelle. Hiermit können sämtliche Roboterbewegungen beispielsweise während des Sprühprozesses auf Grundlage der thermischen Simulationsergebnisse programmiert und hinsichtlich Taktzeit und Bewegungsablauf optimiert werden.

Nachdem das Sprühprogramm in der virtuellen Gießzelle hinsichtlich der Roboterbewegung und der Programmierung der SPS-Befehle optimiert und auf Kollision geprüft ist, erfolgt der Export und Übertrag des Programms auf den Realprozess. In der realen Gießzelle wird das Roboterprogramm anschließend in einem Einrichtungsprozess übernommen und kann gegebenenfalls bedarfsgerecht angepasst werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der große Vorteil, der sich aus der simulationsgestützten Auslegung des Sprühprogramms ergibt, ist die Möglichkeit zum simultaneous engineering, also zur Auslegung und Optimierung des Sprühprogramms bereits im Werkzeugentstehungsprozess. Die Produktivität der

Gießzelle ist während dieses Auslegungsprozesses im Gegensatz zur online-Programmierung nicht beeinflusst.

Weiterhin erfolgt der Übertrag und Einrichtungsprozess des virtuell geplanten Sprühprozesses in die reale Gießzelle in einem Bruchteil der Zeit, die für einen konventionellen Einrichtungsprozess in der Druckgussanlage benötigt wird.

Durch die Kopplung der thermischen Simulation mit der virtuellen Prozessplanung ist darüber hinaus die simulationsgestützte Auslegung und thermische Validierung der Sprühkühlung sichergestellt. Dies bildet die Grundlage für einen taktzeitoptimierte, bedarfsgerechten Sprühprozess, unabhängig davon ob eine flächige Kühlung oder ein lokales Vorsprühen für den anschließenden Auftrag von Trennstoff-Konzentraten erfolgt.

Die grundsätzliche Anwendung der offline-Programmierung in der virtuellen Gießzelle ist dabei nicht ausschließlich auf den Sprühprozess beschränkt. Auch alle peripheren Roboter, die beispielsweise zur Entnahme und Weiterverarbeitung des Gussteils eingesetzt werden, können offline programmiert und optimiert werden, um anschließend in die reale Gießzelle übertragen zu werden.

Im Gießerei-Technikum der AUDI AG in Ingolstadt werden heute alle robotergestützten Prozesse in der Gießzelle simulationsgestützt abgesichert und offline programmiert. Der Fokus liegt dabei in der Kopplung mit der thermischen Simulation zur Auslegung des Sprühprozesses und dem Ableiten von Prozessgrößen.

Literaturangaben

- [1] Fehlbier, M., Aguilar, J., Hennings, A., Sahm, P.R.: Thixocasting of the Magnesium Alloys AZ91, AM50 and AM70. Proceedings International Conference – High Tech Die Casting for Al and Mg Alloys, Vicenca, Italy, 2002.
- [2] Heid, R., Thoma, C., Müller, J., Eibisch, H.: Erweitertes Softwaremodul zur Vorhersage von Schädigungen in Dauerformen für den Aluminium Druckguss – Hybrid Fatigue Test. Gießerei, 2014.
- [3] Flow Science Inc.: Flow-3D User's Manual. New Mexico, USA.
- [4] Müller, J., Thoma, C., Eibisch, H., Fehlbier, M.: Konzeptentwicklung und Untersuchungen zur realitätsnahen Abbildung des Sprühprozesses in Druckguss-Simulationen. Gießerei, 2014.
- [5] Liu, G.W., Morsi, Y.S., Clayton, B.R.: Characterisation of the spray cooling heat transfer involved in a high pressure die casting process. International Journal of Thermal Sciences, 2000.
- [6] Kim, J.: Spray cooling heat transfer: The state of the art. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007.
- [7] Rodman, D., Kerber, K., Yu, Z., Mozgova, I., Nürnberg, F., Bach, F.W.: Orts- und temperaturabhängige Wärmeübergangskoeffizienten bei der Sprühkühlung von Al-Si10Mg-Gussplatten. Forschung im Ingenieurwesen, 2011.
- [8] Lakeit, A.: Resource efficient body-in-white production at AUDI. Strategies in Car Body Engineering, Bad Nauheim, 2011.

Simulationsgestützte Auslegung von Druckgießwerkzeugen mit konturnahen Temperiersystemen

Dipl.-Ing. **Sven Jansen**, AUDI AG, Ingolstadt

Abstract

Mit dem Leichtmetall-Druckguss lassen sich komplexe und gleichzeitig leichte Strukturteile herstellen, weshalb die Nachfrage seitens der Automobilindustrie stetig steigt. Auf der Seite des Druckgießprozesses besteht weiterhin ein hohes Optimierungspotential hinsichtlich dessen Effizienz. Hierzu zählt die Zykluszeit, die Standzeit der Druckgießformen oder auch der Wasserbrauch durch den Sprühprozess zur Kühlung der Formen. Mit einem optimierten Temperierkonzept für die Druckgießwerkzeuge können die genannten Faktoren deutlich verbessert werden. Der folgende Beitrag zielt auf den Wärmeaushalt von Druckgießformen ab und wie dieser durch konturnahe Temperiersysteme und eine simulationsgestützte Auslegung optimiert werden kann.

1. Ausgangssituation

Das Druckgießen ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteile, die sich durch eine hohe Funktionsintegration bei einem gleichzeitig geringem Gewicht auszeichnen. Daher findet dieses effiziente Fertigungsverfahren zunehmend für die Herstellung von Strukturauteilen für Fahrzeugkarosserien Anwendung. Denn nur mit innovativen Leichtbaukonzepten können moderne Fahrzeuge den hohen Anforderungen hinsichtlich geringem Kraftstoffverbrauch, optimaler Sicherheit und Komfort gleichermaßen gerecht werden. [1] In diesem Zusammenhang lässt sich aus aktuellen Entwicklungen eine Zunahme der Bauteilgröße und –komplexität beobachten. Diese Trends, in Kombination mit steigenden Stückzahlen, resultieren in deutlich höheren Anforderungen an die Druckgießwerkzeuge. Bei zunehmenden Gussteildimensionen steigen die Belastungen auf die Formen stark an, da insbesondere komplexe, dünnwandige Bauteile hohe Gießdrücke und hohe Formfüllgeschwindigkeiten für eine einwandfreie Teilequalität erfordern. Gleichzeitig werden kurze Zykluszeiten und hohe Formstandzeiten verlangt. Um diesen Anforderungen gerecht werden zu können, müssen klassische Werkzeugkonzepte überdacht und gezielt optimiert werden. [2, 5]

2. Optimierungsansatz

Optimierungspotential auf Seite der Druckgießformen besteht insbesondere in Bezug auf deren Wärmehaushalte, die sowohl durch die werkzeuginternen Temperierkreisläufe, als auch durch den Sprühprozess beeinflusst werden. Denn ein effektives Thermomanagement durch leistungsstarke fominterne Kühlsysteme ermöglicht hohe Abkühlraten und somit kurze Formzuhaltezeiten (Zeitspanne zwischen der Formfüllung, Erstarrung der Gusslegierung und dem Ausstoßen des Gussteils). Gleichzeitig kann die Sprühmenge des Wasser-Trennstoff-Gemisches reduziert werden, im optimalen Fall kann auf eine externe Kühlung der Werkzeugoberflächen mit Wasser sogar vollständig verzichtet werden. Hierdurch reduziert sich die Thermoschockbelastung auf den Formstahl erheblich, was einen maßgeblichen Beitrag für eine signifikante Verlängerung der Formstandzeiten leisten kann.

Mit konventioneller Ausführung der Temperierkreisläufe in den Formeinsätzen ist eine effektive Wärmeabfuhr nicht möglich. Denn gebohrte Kanäle, die parallel zur Formkavität verlaufen oder in Form von Steigbohrungen ausgeführt sind, bieten in der Regel nur eine unzureichend große Oberfläche und können den meist zerklüfteten Formoberflächen nicht mit dem erforderlichen geringen Abstand folgen, die für eine hohe Kühlleistung Voraussetzung sind. Um die Grundlage für das so genannte Mikrosprühen zu schaffen, das heißt dem Auftrag weniger Milliliter Trennmittelekonzentrat anstelle großer Mengen eines Wasser-Gemisches, sind folglich neue Formkonzepte mit konturnahen Kühlkreisläufen erforderlich. Um diese Potentiale voll nutzen zu können, müssen einerseits die gängigen Werkzeugkonstruktionen überdacht werden, andererseits müssen auch die Fertigungsmethoden im Formenbau erweitert werden. In diesem Zusammenhang sind für thermisch-hochbelastete Werkzeuggbereiche auch neue, innovative Verfahren in Betracht zu ziehen, wie zum Beispiel das generative Fertigungsverfahren *selektives Laserschmelzen*. [3, 4]

3. Methodische Auslegung eines Versuchswerkzeugs mit konturnaher Kühlung

Da im Druckgussformenbau aktuell kein oder kaum Erfahrungswissen zur Auslegung von Werkzeugen mit konturnahen Temperiersystemen existiert, muss zunächst eine Auslegungsmethodik erarbeitet werden, welche die thermischen und mechanischen Belastungen aus dem Gießprozess berücksichtigt. Hierfür ist der Einsatz von modernen Simulationsmethoden unabdingbar, um bauteilspezifische, maßgeschneiderte Lösungen generieren zu können. Die Entwicklung einer Auslegungsmethodik, die sich durch einen allgemeingültigen Charakter auszeichnet, ermöglicht eine einfache Übertragbarkeit auf andere Bauteilgeometrien und stellt dabei kurze Reaktionszeiten bei der Unterstützung des Konstruktions- und Anfertigungsprozesses von Druckgießwerkzeugen sicher.

Im Folgenden wird auf ein Versuchswerkzeug für eine Federbeinaufnahme eingegangen, welches mit einer konturnahen Kühlung konzipiert, gebaut und in Versuchskampagnen erprobt wurde. Die Abbildung 1 zeigt die beiden Formhälften des Versuchswerkzeugs. Eine Prämisse bei der Auslegung des Werkzeugs war, die Temperierung so effektiv zu gestalten, so dass hierdurch das Mikrosprühen ermöglicht wird, ohne Einbußen in der Zykluszeit – beziehungsweise sogar einhergehend mit einer Taktzeitverkürzung. Um diese anspruchsvolle Aufgabe realisieren zu können, musste unter anderem ein besonderes Augenmerk auf die Kühlung des Angussbereichs gelegt werden. Denn gerade bei dünnwandigen Strukturauteilen stellt der Bereich des Gießlaufs und Pressrests häufig die größte Materialanhäufung im Gussteil dar, aus dem folglich am meisten Wärme abgeführt werden muss und die Erstarrung der Schmelze am längsten dauert. Daher beeinflusst die Effektivität der Werkzeugkühlung in diesem Bereich direkt die Formzuhaltezeit und somit die Zykluszeit des Gesamtprozess.

Daher steht im Folgenden die Umsetzung der Temperierung im Angussbereich des Versuchswerkzeugs im Fokus. Zunächst werden Ergebnisse einer thermomechanischen Simulation an einem konventionellen Angussverteiler gezeigt. Auf dieser Basis wird schließlich das neue, optimierte Konzept für diese Werkzeugkomponente im Detail vorgestellt, für welche das generative Fertigungsverfahren selektives Laserschmelzen zur Anwendung kam.

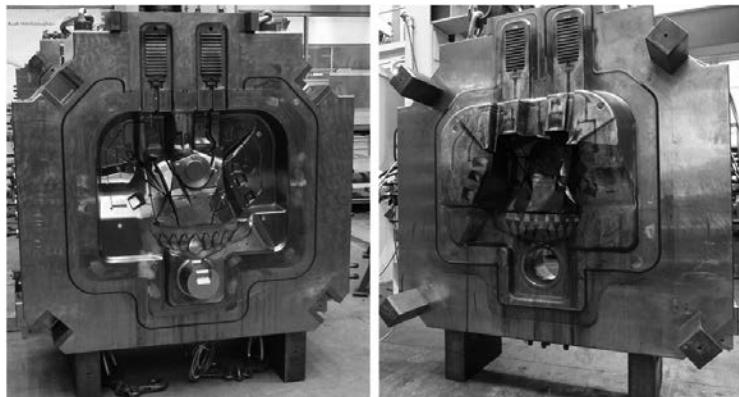


Bild 1: Versuchswerkzeug für eine Federbeinaufnahme mit konturnaher Temperierung

4. Konventioneller Angussverteiler

In Druckgießwerkzeugen konventioneller Bauart kommen in der Regel Angussverteiler zum Einsatz, die mit einer einfachen Kühlbohrung versehen sind, in die gegebenenfalls noch ein Spiraleinsatz zur Strömungslenkung eingesetzt wird. In der Abbildung 2 ist beispielhaft ein solcher Angussverteiler gezeigt. Aufgrund des verhältnismäßig großen Abstands zwischen den schmelzebeaufschlagten Flächen und der Temperierung ist keine effektive Wärmeabfuhr möglich. Daher muss der Großteil der von der Schmelze eingebrachten Energie durch den Sprühprozess abgeführt werden. Die Ergebnisse einer zyklischen thermischen Simulation des Versuchswerkzeugs sind in Abbildung 2 gezeigt. Das linke Diagramm zeigt den Temperaturverlauf über einen Gießzyklus für den gekennzeichneten Punkt auf der Oberfläche des Angussverteilers. Die Kurve im rechten Diagramm zeigt das Ergebnis einer thermomechanischen Simulation. Hier ist für die entsprechende Stelle auf der Oberfläche die erste Hauptnormalspannung aufgetragen. Als Simulationssoftware kam das FEM-Programm Abaqus von Simulia / Dassault Systèmes zum Einsatz.

Die berechneten Temperatur- und Spannungskurven weisen einen für die konventionelle Prozessführung charakteristischen Verlauf auf. Nach der Formfüllung steigt die Oberflächentemperatur stark an. Da oberflächenentfernte Bereiche zu diesem Zeitpunkt kälter sind, führt dies zu einem Temperaturgradienten innerhalb der Werkzeugkomponente. Hierdurch entstehen auf der heißen Werkzeugoberfläche hohe Druckspannungen (negative Spannungswerte), da sie die Tendenz hat, sich gegenüber dem darunterliegendem Material auszudehnen. Mit der Gussteilabkühlung und dem Temperaturausgleich innerhalb des Formstahls nehmen die Spannungen ab. Die leichte Unstetigkeit bei 25 Sekunden in den beiden Kurven entspricht dem Zeitpunkt, zu dem die Form geöffnet wird. Mit dem Beginn der Benetzung des Angussverteilers durch das Trennstoff-Wassergemisch während dem Sprühprozess (im Beispiel 55 bis 58 Sekunden) kommt es zu einer rapiden Abkühlung der Formoberfläche von etwa 150 °Celsius und somit zu einer Umkehr des Temperaturgradienten (kalte Oberfläche, heiße darunter liegende Bereiche). Dies hat einen Wechsel der Spannungen vom Druck- in den Zugbereich (positive Spannungswerte) zur Folge.

Diese Wechselbelastung zwischen Druck- und Zugspannungen, im betrachteten Beispiel mit einer Schwankungsbreite von circa 1.000 Megapascal innerhalb eines jeden Druckgießzyklus, ist maßgeblich für den Werkzeugverschleiß in Form von Brandrissbildung in den Formoberflächen mitverantwortlich.

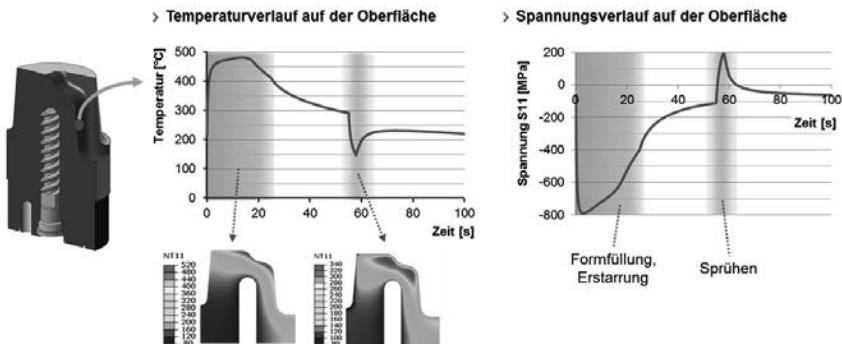


Bild 2: Thermische und thermomechanische Prozesssimulation am Beispiel eines konventionellen Angussverteilers mit Spiraleinsatz

5. Angussverteiler mit konturnaher Kühlung

Mit den Erkenntnissen aus den zuvor beschriebenen Untersuchungen soll eine optimierte Variante des Angussverteilers ausgelegt, konstruiert und gefertigt werden, welche den prinzipbedingten Nachteilen des konventionellen Kühlkonzepts gezielt begegnet. Die Entscheidung fiel dabei auf eine Anfertigung mittels dem generativen Fertigungsverfahren *selektives Laserschmelzen*, um eine höchstmögliche Gestaltungsfreiheit bei der Konstruktion der Temperierung nutzen zu können. Im Folgenden wird zunächst kurz auf das Fertigungsverfahren eingegangen und anschließend der optimierte Angussverteiler im Detail vorgestellt.

Selektives Laserschmelzen „Metall 3D-Druck“

Das selektive Laserschmelzen (häufig vereinfacht als 3D-Druck bezeichnet) gehört zu den generativen Fertigungsverfahren, bei welchem das Werkstück aus feinsten Metallpulverschichtweise aufgebaut wird. Hierfür wird zunächst auf einer Grundplatte eine Metallpulverschicht (Dicke 20-80 µm) von einem Beschichter aufgetragen. Ein Laser schmilzt das Pulver in den Bereichen, welche später dem Bauteil entsprechen sollen, lokal auf. Anschließend wird die Grundplatte um die Dicke einer Schicht nach unten gefahren, eine neue Pulverlage aufgebracht und wiederum stellenweise erschmolzen. So entsteht schichtweise das gewünschte massive Werkstück. Ein entscheidender Vorteil dieses Fertigungsverfahrens ist die hohe geometrische Gestaltungsfreiheit bei der Auslegung der Bauteile. Somit ist dieses Verfahren für die Herstellung von Formeinsätzen mit komplexen innenliegenden Kühlgeometrien prädestiniert. Aus der Reihe der Warmarbeitsstähle wird typischerweise die Legierung

1.2709 (X3NiCoMoTi 18-9-5), ein nahezu kohlenstofffreier, stark nickelhaltiger Stahl verarbeitet, da er sich durch seine Zusammensetzung und spezifischen Eigenschaften – im Gegensatz zu klassischen kohlenstoffhaltigen Stählen – besonders für das Laserschmelzen eignet. Durch ein Warmaushärten bei 500-550 °Celsius über mehrere Stunden kann eine Härte von 52 bis 55 HRC erzielt werden, wodurch auch die herstellbedingten Eigenspannungen in den gedruckten Werkstücken abgebaut werden. [3, 4]

Auslegung eines 3D-gedruckten Angussverteilers

Für den Angussverteiler galt es zunächst ein Kühlkanaldesign zu erarbeiten, mit welchem einerseits die erforderliche hohe Kühlleistung erzielt werden kann und das andererseits den Belastungen im Druckgießprozess standhält. Hierzu wurden verschiedene Varianten untersucht und in Simulationen bewertet. Die Wahl fiel schließlich auf ein Konzept, das einen Hauptkanal vorsieht, der die Form einer Spirale hat und dessen Verlauf optimal an die Außenkontur des Angussverteilers angepasst ist. Der Hauptkanal teilt sich dabei in Teilbereichen in kleinere, parallel durchströmte Unterkänele auf, um die Kühlkanaloberfläche zu vergrößern und um auch die Eckbereiche gleichmäßig und konturnah temperieren zu können. Die Abbildung 3 zeigt das finale Temperierkonzept des Angussverteilers zusammen mit dem Ergebnis der CFD-Strömungssimulation, mit welcher die Kühlkanalgeometrie gezielt durchflussoptimiert ausgelegt wurde. [4]

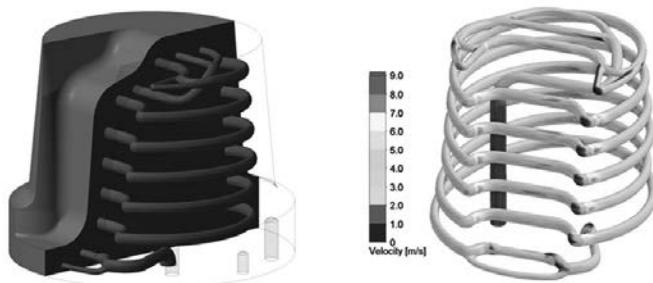


Bild 3: Kühlkonzept des 3D-gedruckten Angussverteilers mit dem Ergebnis der Strömungs-simulation

Für die Bewertung der Kühlkonzepte wurden sowohl zyklische thermische Simulationen, als auch thermomechanische Berechnungen durchgeführt. Mit dem Ziel eine Zykluszeiteinspa-

rung im Realprozess auf Basis einer verbesserten Temperierung zu erzielen, wurde für die thermischen Simulationen eine um 20 Sekunden reduzierte Taktzeit im Vergleich zur konventionellen Variante angenommen. Zudem wurde im Hinblick auf das Mikrosprühen ohne externe Abkühlung der Formoberflächen simuliert. Die Abbildung 4 zeigt den Temperaturverlauf für einen repräsentativen Punkt auf der Oberfläche während eines Gießzyklus im betriebswarmen Werkzeugzustand, sowie die Temperaturverteilungen während der Formzuhaltezeit (Zeitpunkt 12 Sekunden) und während dem Mikrosprühprozess (Zeitpunkt 50 Sekunden) als Schnittdarstellungen. Zusätzlich ist im Diagramm die Temperaturkurve des konventionellen Angussverteilers zum Vergleich eingezeichnet.

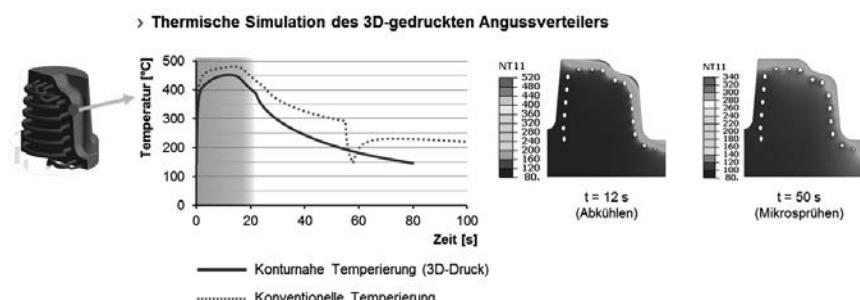


Bild 4: Thermische Simulation des generativ hergestellten Angussverteilers mit konturnahem Kühlkreislauf

Aus den Simulationsergebnissen lässt sich bereits eindrucksvoll erkennen, wie effektiv die konturnahen Kühlung des gedruckten Angussverteilers im Vergleich zur konventionellen Variante ist. Trotz der um 20 Prozent verkürzten Zykluszeit und dem Entfall der externen Kühlung durch das Sprühen, zeigt der Temperaturverlauf einen deutlichen, kontinuierlichen Abfall nach der Erstarrung der Aluminiumlegierung.

Auch für den generativ gefertigten Angussverteiler wurden thermomechanische Berechnungen durchgeführt, die in der Abbildung 5 dargestellt sind. Im Diagramm ist der Verlauf der Hauptnormalspannung für einen Gießzyklus aufgetragen. Zum Vergleich ist der Spannungsverlauf des konventionellen Angussverteilers gegenübergestellt. Vergleicht man die beiden Kurvenverläufe, so fällt zunächst auf, dass die Druckspannungen auf der Oberfläche kurz nach der Formfüllung bei der gedruckten Variante etwas höher ausfallen als bei der Konventionellen. Dies lässt sich drauf zurückführen, dass bei konturnahen Temperiersystemen zwischen der Formoberfläche und dem Strömungskanal aufgrund des geringen Abstands ein

vergleichsweise hoher Temperaturgradient vorliegt. Die in der Simulation ermittelte Druckspannung ist für den gehärteten Warmarbeitsstahl 1.2709 als unkritisch zu bewerten. Im weiteren Verlauf bis zum Zyklusende (80 Sekunden) baut sich das Spannungsniveau kontinuierlich ab, bleibt aber weiterhin im Druckspannungsbereich. Der plötzliche Vorzeichenwechsel der Hauptnormalspannung während dem Trennmittelsprühen beim konventionellen Prozess entfällt mit der formschonenden Mikrosprühtechnologie. In dem betrachteten Beispiel erfährt der Formstahl somit nur eine schwelende Beanspruchung im Druckgießzyklus mit einer Spannungsamplitude von etwa 700 Megapascal (vgl. konventionell: ca. 1.000 Megapascal Wechselbeanspruchung). Auf Basis dieser Simulationsergebnisse lässt sich bereits ableiten, dass der gedruckte Angussverteiler das Potential besitzt, eine deutlich höhere Standzeit zu erreichen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf Brandrissbildung auf den Oberflächen, da beim Mikrosprühen die Thermoschockbelastung im Vergleich zum konventionellen Sprühen ausbleibt.

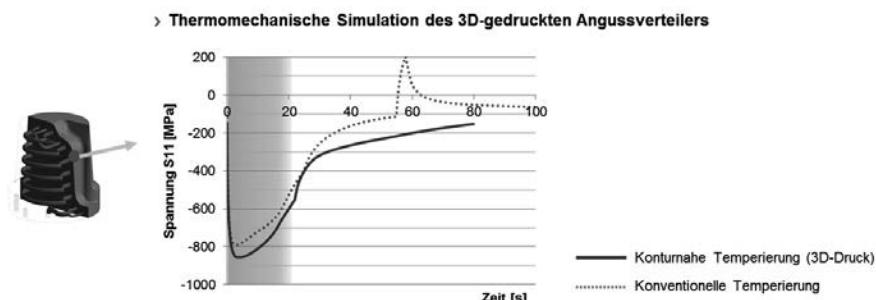


Bild 5: Thermomechanische Simulation des generativ hergestellten Angussverteilers mit konturnahem Kühlkreislauf

Das Versuchswerkzeug mit dem gedruckten Angussverteiler wurde in Gießkampagnen erfolgreich erprobt. Es wurden damit etwa 1.500 Federbeinaufnahmen abgegossen, wobei ausschließlich nur wenige Milliliter Trennmittelkonzentrat pro Zyklus auf die Formen aufgetragen wurden. Die Ergebnisse der Gießversuche bestätigen das große Potential konturnah gekühlter Druckgießwerkzeuge. Trotz der Substitution der externen Kühlung sind deutliche Zykluszeitreduzierungen im Prozess möglich. Die für die Simulationen angenommene Zeiteinsparung von 20 Prozent erwies sich auch in den Gießversuchen als realistisch. Aufgrund der hohen Abkühlrate konnte die Formzuhaltezeit signifikant reduziert werden, zudem bean-

spricht der Mikrosprühprozess deutlich weniger Prozesszeit als ein konventioneller Auftrag von Trennmittel-Wassergemisch.

6. Zusammenfassung

Mit den vorgestellten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine deutliche Effizienzverbesserung im Druckgießprozess möglich ist. Konturnahe Temperiersysteme ermöglichen signifikante Zykluszeiteinsparungen, wodurch die Ausbringung einer Druckgussanlage entsprechend erhöht wird und gleichzeitig die Fertigungskosten pro Gussteil sinken. Daneben stellen optimierte Wärmeaushalte von Druckgießwerkzeugen die Basis für das Mikrosprühen dar. Durch den Auftrag von Trennmittelkonzentrat anstelle eines Wassergemisches, können die thermomechanischen Belastungen auf den Formstahl minimiert werden, was auch die vorgestellten Simulationen bestätigen. Jedoch kann nach den 1.500 abgegossenen Federbeinaufnahmen noch keine Aussage getroffen werden, inwieweit sich die Standzeit hierdurch tatsächlich erhöht. Hierfür sind noch deutlich längere Gießkampagnen nötig. Es kann jedoch festgehalten werden, dass der Warmarbeitsstahl 1.2709, der für den 3D gedruckten Angussverteiler zum Einsatz kam, in Verbindung mit dem gewählten Temperierkonzept für Druckgussanwendungen geeignet ist.

Die vorliegenden Untersuchungen entstanden im Rahmen eines Kooperationsprojekts der AUDI AG in Ingolstadt und des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwerken von Prof. Dr.-Ing. W. Volk an der Technischen Universität München.

- [1] Lakeit, A.: Resource efficient body-in-white production at Audi - Strategies in Car Body Engineering 201, 22.03.2011, Bad Nauheim.
- [2] Kahl, M. A.; Davies, G.: The automotive industry falls for aluminum, Automotive World Briefing, 2014.
- [3] Heid, R., et. al.: Optimierung von Druckgießwerkzeugen, GIESSEREI, Ausgabe März 2014
- [4] Jansen, S., et. al.: Konturnahe Temperiersysteme in Druckgießwerkzeugen – 3-D-Druck mit Warmarbeitsstahl, GIESSEREI, Ausgabe Dezember 2015
- [5] Jordi, U.: Strukturbauten: Ein interessanter und wachsender Markt – Wie Strukturen Leichtbauteile den Automobilbau verändern helfen. VDI-Berichte Nr. 2217, 2014

Al-Gusslegierungen für Bauteile in Struktur und Fahrwerk mit großem Anteil an Schrotten als Inputmaterial

Anforderungen und Möglichkeiten von Recyclinglegierungen im Automobil

Dr.mont. **Werner Fragner**, AMAG Austria Metall GmbH, Ranshofen;

Dr.mont. **Philip Pucher**, AMAG casting GmbH, Ranshofen;

Dipl.-Ing. (FH) **Marc Hummel**, AUDI AG, Neckarsulm

Abstract

After studying CO₂ emissions caused by vehicles itself, automotive manufacturers now also consider CO₂ emission during the production of vehicles and attempt to reduce them according to a holistic approach. This is where AUDI AG as first OEM together with AMAG casting applies this approach at the production of structural components, which have been produced by primary alloys up to now. This component segment, which is significantly growing by now, requests mainly high ductility values, in order to absorb as much energy as possible in the case of a crash. In addition to the Fe-content, recycling alloys also have further tramp elements, which occur inevitably at scrap treatment. Besides Cu and Zn there are also elements like Bi, Cr, Ni, Sb, Sn etc. which have to be considered, since they influence the requested alloy properties in a negative way. The results of the existing work show that skilled scrap input at the alloy production can reduce this negative effect close to zero.

1. Recycling-Gusslegierungen für Automobilbauteile

Bis vor kurzem wurden Recycling-Gusslegierungen für den Einsatz in Crash-relevanten Automobilbauteilen nicht betrachtet, weil diese Legierungen besonders aufgrund der höheren Gehalte an Eisen und anderen Begleitelementen als zu spröd galten. Schon in den vergangenen 5 Jahren konnte AMAG mit einer Reihe von Untersuchungen an der Legierung Al-Si9Cu3 demonstrieren, dass dieses Vorurteil nicht allgemein gültig ist, sondern dass bei geeigneter Wahl der Legierungszusammensetzung selbst bei erhöhten Eisengehalten beachtliche Dehnungswerte erzielt werden können [1-3]. Ausgehend von diesem Wissen – speziell dem über die gegenseitige Beeinflussung von Legierungselementen – war es nur logisch, die Arbeiten auf andere Legierungen im System Al-Si-Mg auszudehnen. Die ressourcenschonende Herstellung von modernen Automobilen stand dabei im Vordergrund.

2. CO₂-Reduktion durch Leichtbau

Nach der CO₂-Emissionsbetrachtung von Fahrzeugen im Betrieb (bei der Leichtbau positiv zu Buche schlägt) untersuchen die Automobilhersteller zunehmend auch die Kohlendioxidemissionen während der Herstellung eines Fahrzeugs und versuchen dabei gemäß einem ganzheitlichen Ansatz auch diese zu reduzieren. Die AUDI AG und AMAG setzen hier gemeinsam mit der Entwicklung von Recycling-Gusslegierungen für Strukturbauten an, die bisher aus Primärgusslegierungen erzeugt wurden [4]. In diesem stark wachsenden Bauteilsegment werden bei den mechanischen Eigenschaften vor allem hohe Dehnungswerte verlangt, um im Crashfall möglichst viel Energie zu absorbieren. Bis dato wurde diese Forderung zum einen durch porenarmen Guss aus vakuumunterstützten Druckgießverfahren erreicht, zum anderen überwiegend mit primären, wärmebehandelbaren Aluminiumlegierungen. Da die Automobile effizienter werden und im Betrieb immer weniger CO₂ emittieren, ist es wichtig, auch den Energieaufwand bei der Herstellung zu berücksichtigen. Im Idealfall fallen bei einem Elektroauto beim Betrieb mittels regenerativer Energie nur geringe Mengen an Emissionen an, während durch die Herstellung mehr Treibhausgase im Vergleich zu einem gleichartigen Auto mit Verbrennungsmotor emittiert werden [5]. Ein nächster logischer Schritt bei der Automobilherstellung ist daher folglich die Verwendung von Bauteilen, die aus Recyclingmaterial hergestellt wurden.

Die Begriffe Schrott, Recycling und Rezyklatgehalt werden dabei in der Norm EN ISO 14021:2001 genau definiert [6]. Die AMAG richtet sich bei der Kalkulation des Schrottanteiles ihrer Legierungen (das heißt dem Rezyklatgehalt) strikt nach dieser Norm.

3. Recycling-freundliche Legierungen

Die oftmals geforderte kritische Messgröße für Crashbauteile der hier betrachteten Recyclinglegierung ist die Dehnung. Nach einer gezielten Wärmebehandlung weist die Primärlegierung AlSi10MnMg (EN AC-43500 nach DIN EN 1706:2010) bei ordnungsgemäßem Guss ausgezeichnete Werte im Bauteil auf und erreicht damit die in der Norm angegebenen Werte. Unter anderem wird dort abhängig von der Wärmebehandlung die Erfüllung folgender Werte für aus dem Druckgussbauteil entnommene Proben gefordert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften der EN AC-43500 (AlSi10MnMg) nach DIN EN 1706:2010 [7].

Ausführung	0,2%-Dehngrenze Rp0,2	Zugfestigkeit Rm	Bruchdehnung A
	(MPa)	(MPa)	(%)
Druckguss nach T5	150	270	4
Druckguss nach T7	120	200	12

Da diese Anforderungen bisher lediglich durch Primärlegierungen erfüllt wurden, legt die DIN EN 1706:2010 auch eine entsprechende chemische Zusammensetzung fest (Tabelle 2):

Tabelle 2: Legierungsbestandteile (Masselanalyse in Massen-%) der EN AC-43500 nach DIN EN 1706:2010.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sonst. einzeln	Sonst. ges.
min	9,0			0,40	0,15				
bis					bis	bis			
max	11,5	0,20	0,03	0,80	0,60	0,07	0,15	0,05	0,15

Einige Werte der obigen Tabelle sind auch bei anderen Legierungsspezifikationen in der Branche zu finden. So ist die Einschränkung der sonstigen Elemente meist mit 0,05 Massenprozent (entspricht 500 ppm) angegeben, wobei die Summe der Einzelelemente keine 0,15 Massenprozente überschreiten darf. Dabei fällt auf, dass bei dieser Spezifikation die Elemente Kupfer und Zink mit 300 ppm bzw. 700 ppm beschränkt sind. Eine Recyclinglegierung mit einer derart engen Toleranzgrenze für diese beiden Elemente ist technisch und wirtschaftlich schwer darstellbar, da nur wenige, sortenrein getrennte Schrotte hierfür eingesetzt werden können.

Bei Recyclinglegierungen müssen aber neben Fe, Cu und Zn, auch Elemente wie Bi, Cr, Ni, Sb und Sn berücksichtigt werden, da diese die gewünschten Legierungseigenschaften negativ beeinflussen können. Insofern ist es wichtig, mittels metallurgischer Kenntnisse und gemeinsamer Diskussion mit dem Anwender die Obergrenzen dieser Elemente zu definieren, ohne einerseits die gewünschten Eigenschaften der Legierung zu verlieren, andererseits aber nicht durch unnötige Einschränkung eine hohe Schrotteinsatzquote zu verhindern. Nicht nur der Anteil des Schrottes, auch die Art des Einsatzmaterials wird durch die Menge an erlaubten Spurenelementen definiert. Tabelle 3 zeigt den möglichen Materialeinsatz bei der Herstellung der Strukturgusslegierung EN AC-43500 nach DIN EN 1706:2010, jenen bei einer Erweiterung der Toleranz für Eisen, Kupfer und Zink (jedoch mit niedrigen Gehalten der Spurenelemente ähnlich einer Primärlegierung) und jenen bei einer gemeinsam definierten

elementabhängigen Toleranz für Spurenelemente in einem Bereich, der noch keine negativen Auswirkungen auf die Performance der Legierung hat.

Die Einschränkung von Natrium, Calcium und Phosphor ist ebenfalls auf vielen Legierungsspezifikationen zu finden und schwankt teilweise je nach Kunde und dessen Erfahrungen im eigenen Haus, eine Grenze von 20 ppm ist aber ein durchaus gängiger Wert. Auch hier bedeutet diese Restriktion eine starke Reduktion der potentiell nutzbaren Schrotte, um eine Legierung gemäß Tabelle 2 herzustellen. Eine geringe Erweiterung der Toleranzgrenze, beispielsweise von 20 ppm auf 25 ppm, kann hier große Unterschiede in Art und Menge des einsetzbaren Inputmaterials bedeuten. Elemente wie Antimon, Chrom, Nickel, Wismut, Zinn und andere können bei Gehalten von 0,05 Massenprozent durchaus Auswirkungen auf die (mechanischen) Eigenschaften der Legierung haben.

Tabelle 3: Einsatzraten von Massel, Legierungselementen und Schrotten in Abhängigkeit der Spezifikation. Werte bei definierter Einsatzmenge (Schrottverfügbarkeit) auf 5 % gerundet. Stand ist September 2012.

Erweiterung / Spezifikation der Toleranz für			
	gemäß EN 1706	Cu, Fe, Zn	Cu, Fe, Zn + Spuren
Massleinsatz	> 60	< 30	< 10
Legierungselemente	10	10	10
Schrotte	< 30	> 60	> 80

Für die Sicherstellung der angestrebten Schrotteinsatzquote für ein Großserienbauteil sind auch eine Abschätzung der ins Auge gefassten jährlichen Produktionsmenge sowie der zeitliche Rahmen der Herstellung von Bedeutung. Diese Faktoren müssen bekannt sein, um Art, Qualität, Quantität und Verfügbarkeit der erforderlichen Schrotte gewährleisten zu können (Bild 1).

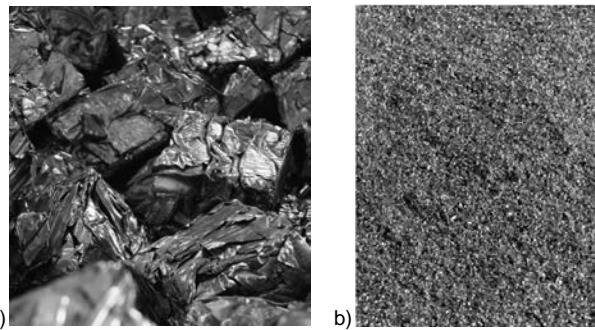


Bild 1: Beispiele für Schrotteinsatz bei Recyclinglegierungen: a) saubere, sortenreine gepresste Folien- und Blechpakete mit definierter Zusammensetzung. b) öl- und emulsionsbehaftete Aluminiumspäne aus der spanenden Bearbeitung, teilweise mit anderen Materialien vermischt.

4. Versuche im Kokillenguss

Über Kokillengussversuche wurde eine erste Reihung vorgenommen. Dazu wurden kleinere Schmelzemengen in einem Tiegelofen aufgeschmolzen, gemäß den Vorgaben legiert und in eine Zugstabkokille abgegossen.

Kennwerte der Legierungsvarianten für maximale Festigkeit (peak-aged) wurden ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt. Neben den Dehnwerten ändern sich auch die Festigkeiten mit unterschiedlicher Legierungszusammensetzung, da der Mischkristall gesättigt ist und sekundäre Phasenausscheidungen eine maximale Hinderniswirkung auf die Versetzungsbewegung erreicht haben. Auch hier erlauben die Werte der Kokillengussproben eine erste Auswahl erfolgversprechender Toleranzgrenzen für eine recyclingfreundliche Legierung.

Die Kombination der Ergebnisse der verschiedenen Legierungsvarianten bei verschiedenen Wärmebehandlungen ermöglicht eine genauere Einschränkung der Toleranzgrenze für einzelne Elemente und die Bestimmung geeigneter Legierungsvarianten die anschließend unter Serienbedingungen im Druckguss abgegossen werden. Dabei sind Unterschiede in den Prozessen zu berücksichtigen.

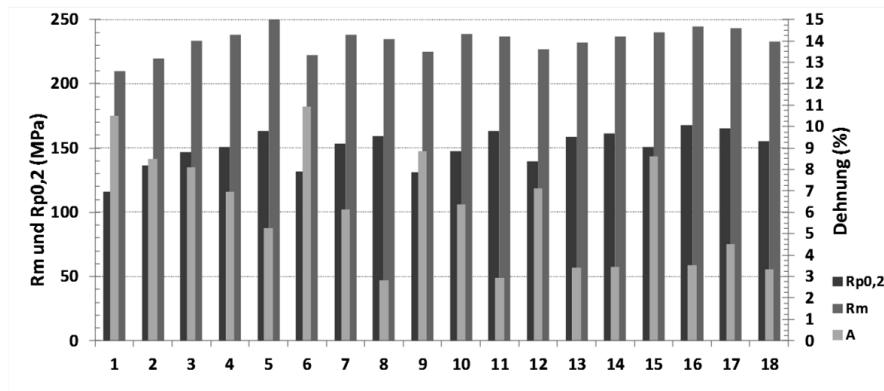


Bild 2: Mechanische Kennwerte von Kokillengussprobestäben 18 verschiedener Legierungen ähnlich der EN AC-43500 nach DIN EN 1706:2010. Dabei können Dehnwerte von 3 bis 11 % entsprechend der Legierungszusammensetzung erreicht werden. Die Festigkeiten variieren dabei für Rp0,2 von 115 bis 155 MPa und für Rm von 210 bis 250 MPa. Auch hier kann eine Auswahl aussichtsreicher Legierungsvarianten durchgeführt werden.

5. Verifikation mittels Druckguss

Zur experimentellen Verifikation von theoretisch mittels Computersimulation optimierten Legierungsvarianten wurden reale Recycling-Legierungen hergestellt und mit einer Druckgießmaschine im Serienumfeld zu Platten gegossen und danach wärmebehandelt. Die ermutigenden Ergebnisse der Versuche lassen erwarten, dass Recycling-freundliche Strukturgusslegierungen in Serie verarbeitet werden können, wenn die geeigneten Prozessparameter gewählt und die erforderliche Gefügeausbildung erzielt werden. Dabei sind neben den sekundären auch primäre Ausscheidungen im Gefüge zu berücksichtigen, da diese ab einer gewissen Größe negativen Einfluss insbesondere auf die Dehnungswerte haben. Beispielsweise sei hier das Gefüge einer im Projekt getesteten AlSiMg-Legierung mit unterschiedlichen Gehalten an Eisen und Mangan gezeigt (Bilder 3a und 3b) [9]. Die Versuche bestätigen, dass der Einsatz von Recyclinggusslegierungen mit hohen Schrotteinsatzquoten für Strukturanzwendungen im Automobilbau technisch möglich ist. Dies erfordert jedoch eine ausgetüpfelte Schrottlogistik und Schrottverfügbarkeit für industriell bedeutsame Mengen. Selbst anspruchsvolle Karosseriebauteile können mit diesen Legierungen realisiert werden, wenn Legierungslieferant, Gießer und Konstrukteur (Automobilhersteller) eng zusammenarbeiten [8].

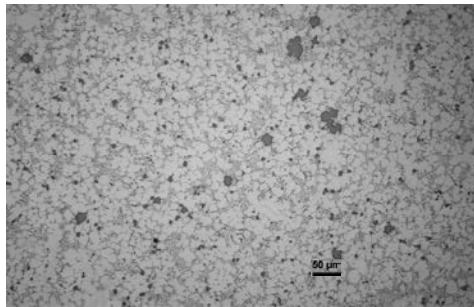


Bild 3a: Schliff einer Druckgussplatte mit groben primären Al-Fe-Mn Phasen. Diese durch Kokillengussversuche ermittelte aussichtsreiche Legierung hat noch kein optimales Fe-Mn Verhältnis und wurde noch nicht mit angepassten serientauglichen Prozessparametern abgegossen.

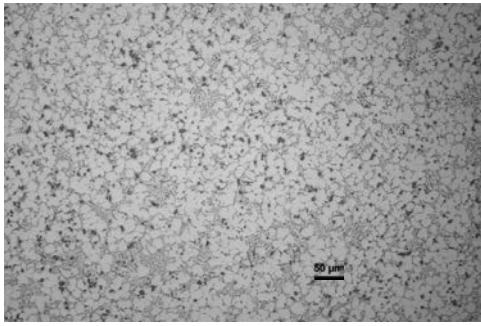


Bild 3b: Schliff einer Druckgussplatte mit kleinen, fein und gleichmäßig verteilten primären Al-Fe-Mn Phasen. Diese durch Kokillengussversuche ermittelte aussichtsreiche Legierung hat ein optimales Fe-Mn Verhältnis und wurde mit angepassten serientauglichen Prozessparametern abgegossen.

6. Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass der Einsatz von Recyclinggusslegierungen mit hohen Schrotteinsatzquoten für Strukturanwendungen im Automobilbau technisch möglich ist, dies jedoch eine ausgeklügelte Schrottlogistik und Schrottverfügbarkeit für industriell bedeutsame Mengen erfordert. Selbst hochfordernde Applikationen können realisiert werden, wenn Lieferant, Gießer und Konstrukteur (Automobilhersteller) zusammenarbeiten. Weitere Fragestellungen zum

Thema Fügbarkeit und Korrosionsresistenz müssen definiert und beantwortet werden. Hier ist die Zusammenarbeit mit dem Anwender unabdingbar.

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass dieses Projekt darauf abzielt, die Anwendungsmöglichkeiten von Aluminiumlegierungen mit hohem Recyklatanteil zu erweitern. Durch die wachsende globale Nachfrage von Aluminium ist jedoch Elektrolysemetall weiterhin notwendig, um den Bedarf zu sichern.

Nutzen:

Es ist wichtig, den Energieaufwand bereits bei der Fahrzeugherstellung zu berücksichtigen. Je höher deshalb der Anteil von Schrotten als Einsatzmaterial für eine Aluminiumlegierung ist, desto geringer ist der entsprechende CO₂ Ausstoß bei der Herstellung. Eine Recyclinglegierung trägt daher zur Verringerung des ökologischen Rucksacks bereits in der Herstellung einer Komponente bei, besonders bei Treibhausgasemissionen [4].

7. Literatur

- [1] P. Pucher, H. Böttcher, J. Hübler, H. Kaufmann, H. Antrekowitsch and P.J. Uggowitzer: Einfluss der Legierungszusammensetzung auf das Speisungsverhalten der Recyclinglegierung A226 (AlSi9Cu3) im Sand- und Kokillenguss, Giesserei 7 (2011), S. 26-37
- [2] P. Pucher, H. Antrekowitsch, H. Böttcher, H. Kaufmann, P.J. Uggowitzer: Influence of compositional variations on microstructural evolution, mechanical properties and fluidity of the secondary foundry alloy AlSi9Cu3. International Journal of Cast Metals Research 23 (2010), S. 375-383
- [3] P. Pucher, H. Antrekowitsch, H. Böttcher, H. Kaufmann, P.J. Uggowitzer: Einfluss der Legierungszusammensetzung auf die mechanischen Eigenschaften der Sekundärlegierung A226 (AlSi9Cu3) im wärmebehandelten Zustand. Gießereipraxis 11 (2009), S. 354-358
- [4] P. Pucher, H. Böttcher, H. Kaufmann, H. Antrekowitsch und P.J. Uggowitzer: Einfluss der Legierungszusammensetzung auf die mechanischen Eigenschaften und das Fließvermögen der Sekundärlegierung A226 (AlSi9Cu3). Gießereipraxis 3 (2009), S. 71-78
- [5] „Broschüre zur Umweltbilanz des Audi A6 nach DIN EN ISO 14040“, zertifiziert durch TÜV NORD CERT, AUDI AG, Entwicklung Gesamtfahrzeug und Kommunikation Produkt, Ingolstadt, 05/2011, Seiten 18-23 und 29
- [6] EN ISO 14021:2001 (D, E): „Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II)“, Ausgabe: 2002-01-01, Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2002 und Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2001-08, bes. Kapitel 7.8.1.1
- [7] DIN EN 1706:2010 (D): „Aluminium und Aluminium Legierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften“, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010-06
- [8] W. Fragner, K. Baumgartner, H. Suppan, M. Hummel, D. Bösch, H.W. Höppel, P.J. Uggowitzer: Einsatz von Schrotten in Recyclinglegierungen für Strukturanwendungen im Automobilbau, 7. Ranshofener Leichtmetalltage, Gmunden 7.-8.11.2012, Energieeffiziente Mobilität, Seiten 72-83, ISBN-13: 978-3-902092-07-6
- [9] D. Bösch, H.W. Höppel, M. Göken, M. Hummel, P.J. Uggowitzer: Sekundäraluminium-Gusslegierungen für Strukturanwendungen in der Karosserie, Große Gießereitechnische Tagung 2012, Salzburg, 26-27. April 2012, Tagungsband, Seiten 52-53

Innovation im Leichtmetallguss

Wandstärkenreduzierung durch Oberflächenstrukturierung

Dipl.-Ing. **Thomas Beganovic**, Dipl.-Ing. **Sebastian Gierth**,
Volkswagen AG, Braunschweig/Wolfsburg

1 Einleitung

Digitalisierung, automatisiertes bzw. autonomes Fahren sowie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die Erreichung der CO₂-Ziele sind die aktuellen Themen in der Automobilindustrie.

Im April 2009 trat die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von PKW in Kraft, die einen verbindlichen Rechtsrahmen und Planungssicherheit für die Automobilindustrie schafft. Hiernach gilt es, den Flottenverbrauch bis 2020 auf 95 g CO₂/km zu senken. Bei Überschreitung dieses Grenzwertes fallen 95 €/g CO₂ an. [1]

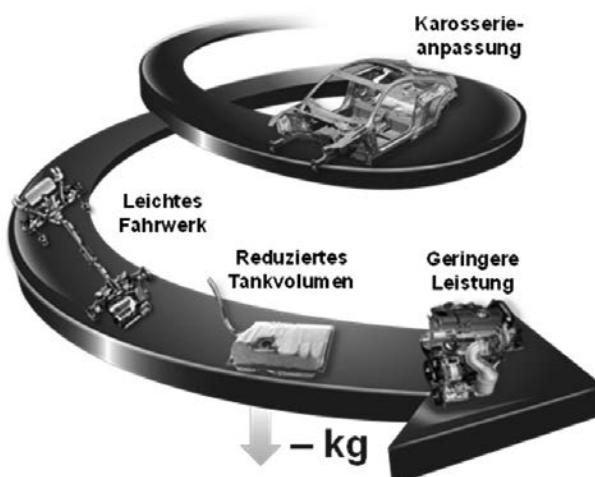


Bild 1: Umkehr der Gewichtsspirale [VW]

Die Volkswagen AG weist in 2014 für die europäische Neuwagenflotte CO₂-Emissionen in Höhe von 126 g CO₂/km aus. [2] Für die kommenden Jahre besteht folglich Handlungsbedarf zur Schließung der Lücke. Ein Schlüssel zur Zielerreichung ist neben der Weiterentwicklung alternativer Antriebe und konventioneller Aggregate die konsequente Optimierung der Fahrzeugstruktur. Um den mit zusätzlichen Komponenten (z.B. Batterie) verbundenen steigenden Fahrzeugmassen entgegenzuwirken und den Verbrauch weiter zu senken, steht das Thema Leichtbau mehr denn je im Fokus. Leichtbaumaßnahmen sind beispielsweise Mischbauweisen in der Karosserie oder Downsizing von Motoren, sowie der zunehmende Einsatz von Leichtbauwerkstoffen wie höchstfester Stähle, Magnesium oder Aluminium. Damit kann die Gewichtsspirale (Bild 1) umgekehrt und der Flottenverbrauch gesenkt werden.

Aluminiumlegierungen werden bereits für Aggregat- und Gehäusekomponenten im Volkswagen-Konzern verwendet. Mit Entwicklung der Space-Frame-Technologie durch die Audi AG haben diese auch Einzug in die Karosserie gehalten, wo neben Blechen und Profilen verstärkt Druckgussbauteile aus Aluminium verwendet werden.

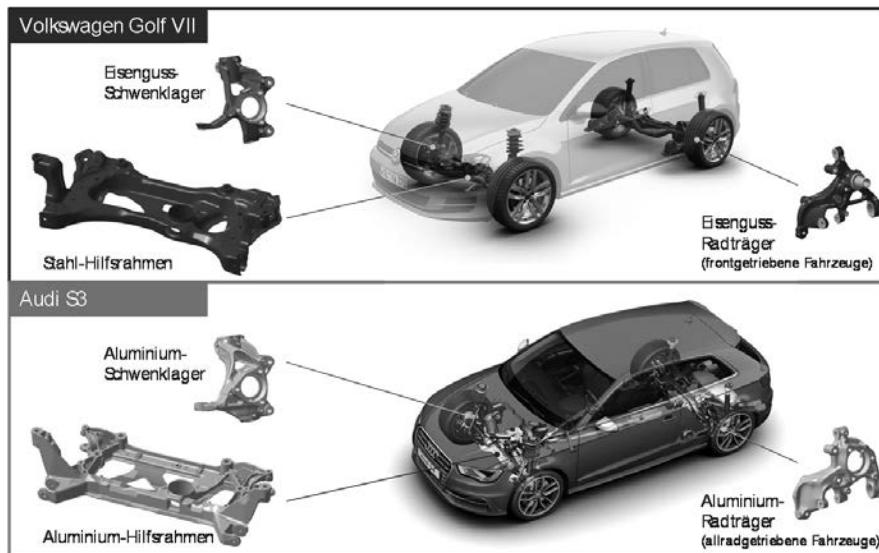


Bild 2: Vergleich Fahrwerk Volkswagen Golf und Audi S3 [Volkswagen/Audi]

Betrachtet man das Fahrwerk, gibt es mehrere Optionen den Leichtbau voranzutreiben. Einerseits kann durch Werkstoffleichtbau Gewicht gespart werden. So können an der McPherson-Vorderachse z.B. Eisenguss-Schwenklager und/oder Stahl-Hilfsrahmen durch Alumi-

um-Derivate ersetzt werden. Bereits heute ist dies z.B. im Vergleich von Volkswagen Golf und Audi A3 anzutreffen, wobei in der Vorderachse des Audi die jeweiligen Aluminium-Lösungen aus dem MQB Einsatz finden und dadurch einen Gewichtsvorteil von insgesamt mehr als 6 kg generieren (Bild 2). Andererseits kann die Umsetzung geringer Wandstärken im Schwerkraftkokillenguss die nächste Evolutionsstufe diverser Aluminiumgussbauteile einläuten.

Bei der Entwicklung von Fahrwerkskomponenten ist der Leichtbau für die Volkswagen AG von zentraler Bedeutung. Hierbei gilt es das wirtschaftlichste Optimum aus Gewicht und Herstellbarkeit bei geforderter Robustheit zu erreichen. Als zentrales Verfahren ist dabei für den Fahrwerksbereich das Kokillengießen mit seinen Ausprägungsstufen vom konventionellen Schwerkraftguss bis hin zu Hochleistungsverfahren wie dem Gegendruck-Gießen (CPC) anzuführen. Diese zeichnen sich durch eine hohe mechanische Festigkeit bei gleichzeitig guter Dehnung und der verfahrensbedingt großen Gestaltungsfreiheit aus. Während letzteres hauptsächlich für höchst dynamisch beanspruchte Bauteile wie Radträger zum Einsatz kommt, werden steifigkeitsgetriebene Komponenten wie beispielsweise der Hilfsrahmen im (Kipp-)Kokillen-Schwerkraftguss hergestellt. Die Vorteile durch höhere Gestaltungsfreiheit, höhere Festigkeit und besserer Duktilität überwiegen hier gegenüber dem Druckguss, der zwar geringere Wandstärken realisierbar macht aber nur durch Sonderverfahren wärmebehandelbar wird. Auch ist hier aufgrund der schlechten Nachspeisbarkeit die Umsetzung von Materialanhäufungen z.B. in Anbindungsbereichen begrenzt.

Im Schwerkraftkokillenguss beschränken Fertigungsrestriktionen, hier vor allem die Fließfähigkeit der Aluminiumschmelze, die Herstellung dünnwandiger Gussteile mit Wandstärken < 5 mm unter Großserienbedingungen. Hierbei kommen bereits Maßnahmen wie die Verwendung naheutekischer AISI-Legierungen bei hohen Gieß- und Werkzeugtemperaturen, sowie der Auftrag hochisolierender Schlichten und das Aufbringen von Fließhilfen (Waffelmustern), zum Einsatz. Besonders in steifigkeitsrelevanten Bereichen wird dennoch oft mehr Material eingesetzt als strukturmechanisch tatsächlich erforderlich ist. Dadurch wird das Leichtbaupotenzial der eingesetzten Aluminiumgusswerkstoffe nicht vollständig ausgenutzt.

Um zukünftig Wandstärken < 5 mm im Großserienprozess durch Schwerkraftkokillenguss herstellen zu können haben die Bereiche Forschung, Entwicklung, Werkzeugbau und Fertigung im Rahmen eines Innovationsprojektes kooperiert und damit ein Maximum an Know-How zusammengetragen können.

2 Stand der Technik

2.1 Anforderungen an Fahrwerkbauteile

Die Schnittstelle zwischen Fahrzeugaufbau und Fahrbahn bildet das aus diversen Komponenten zusammengesetzte Fahrwerk. Die Komponenten dienen der Steuerung und Übertragung von Kräften und Momenten zwischen Aufbau und Fahrbahn. Darüber hinaus beeinflussen Sie in gegenseitigem Zusammenspiel und in Abhängigkeit von Achskonzept und Kinetik Fahrdynamik, Fahrkomfort und akustisches Verhalten des Fahrzeugs.

Bild 3 zeigt das Fahrwerk des modularen Querbaukasten in der Ausführung für den aktuellen Volkswagen Golf der 7. Generation.

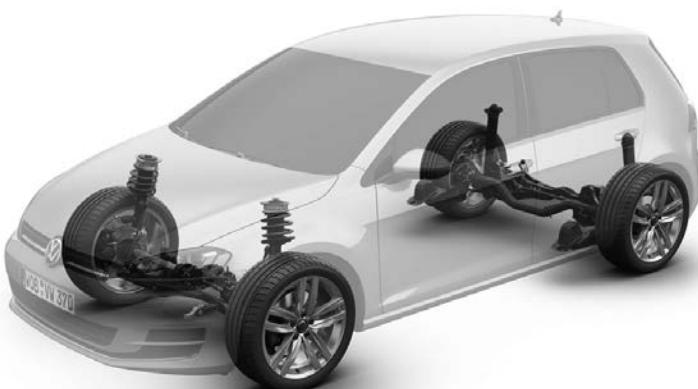


Bild 3: Volkswagen Golf 7 - Fahrwerk

Fahrwerkbauteile sind sicherheitsrelevante Bauteile, die im Rahmen der Auslegung vielfältige Ansprüche erfüllen müssen. So sind neben Anforderungen hinsichtlich statischer Lasten, den Lebensdaueranforderungen durch die Betriebsbelastung auch Sonderereignis- und Missbrauchslasten, also Belastungen außerhalb des bestimmungsgemäßen Gebrauchs durch die Bauteile so zu kompensieren, dass diese zu einem gewissen Grad ertragen werden bzw. der Missbrauch unter Einhaltung einer Schadenskette dem Fahrer ohne Ausfall der Funktion angezeigt wird. Während Lenker typischerweise zu den sogenannten Opferbauteilen zählen, sind sicherheitsrelevante Komponenten wie Radträger, Schwenklager oder Hilfsrahmen zu schützen. Ebenso sind Anforderungen hinsichtlich des Crashverhalten zu berück-

sichtigen, wobei diese Komponenten zumeist in sekundären Crashebenen zum Tragen kommen. Im Allgemeinen sollen Fahrwerk-Komponenten hohe Dehnungen ertragen, insbesondere wenn sie stark dynamisch beansprucht sind und in der Schadenskette große Verformungen zulassen müssen. Gleichzeitig sind bauraumbeding zumeist hohe Festigkeiten erforderlich, um die Belastbarkeit in geringen Querschnitten zu gewährleisten. Darüber hinaus gilt es, bei vielen Fahrwerkkomponenten hohe Steifigkeiten zur Erreichung der geforderten elastokinematischen Effekte und zur Verbesserung von Agilität und Fahrzeugstabilität zu realisieren. Die meisten Komponenten, wie z.B. Radträger oder Schwenklager zählen zu den ungefederten Massen und haben somit großen Einfluss auf das Komfortverhalten des Fahrzeugs.

Die Anforderungen an die Bauteilperformance nehmen zu. Die Bauteile müssen vor dem Hintergrund steigenden Leichtbaudrucks bei weniger Gewicht mehr leisten.

2.2 Schwerkraftkokillenguss

Während bei druckunterstützten Verfahren das Füllen und Erstarren der Legierung unter äußerem Druck erfolgt, wirkt beim Schwerkraftkokillenguss ausschließlich die durch die Masse der Schmelze aufgebrachte Schwerkraft (metallostatischer Druck). Die Verfahrensschritte beim Kokillengießen sind nach Bähr und Schütt in Bild 4 dargestellt. [3]

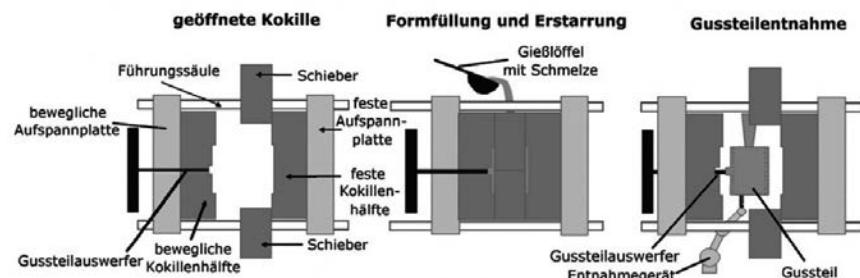


Bild 4: Verfahrensschritte beim Kokillengießen [3]

Es wird deutlich, dass der Schwerkraftkokillenguss ein, relativ zum Druckguss, günstiges Verfahren darstellt, da die benötigte Anlagentechnik gering ausfällt, was den Einsatz in mittleren bis großen Produktionsserien rechtfertigt. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass die Formfüllung und die Darstellung zum Teil komplexer, in der Wandstärke extrem differenzierender Gussteile ohne zusätzliche Kräfte erfolgen müssen. Die Voraussetzung hierfür sind bei-

spielweise ein funktionierendes Anschnitt- und Speisungssystem, sowie eine gute Fließfähigkeit der verwendeten Schmelze.

Weitere Vorteile dieses Verfahrens sind die hohe Maßhaltigkeit, die gute Oberflächenqualität und die erzielbaren hohen mechanischen Eigenschaften. Als Nachteile des Schwerkraftkokillenguss werden der hohe Wartungsaufwand für die Kokillen, wandstärkenabhängige Eigenschaften und Kaltlaufprobleme bei geringen Wandstärken genannt. [4]

In den technischen Richtlinien des BDG zu Sand- und Kokillenguss wird darauf eingegangen, dass die minimale Wandstärke eines Gussteils von den Faktoren Größe (Gussteil), Gießverfahren, Losgröße und Legierungen abhängig ist. [5] Wie aus der Einleitung hervorgeht können im Großserienprozess bei der Herstellung des Hilfsrahmens Wandstärken von minimal 5,5 mm prozesssicher hergestellt werden.

2.3 AISiMg-Gusswerkstoffe

Wie aus Abschnitt 2.1 hervorgeht, ist der Werkstoff Aluminium bereits seit einigen Jahren in Karosserie, Aggregat und Fahrwerk präsent. Die Anforderungen, die an Bauteil und Werkstoff gestellt werden, können durch die Anwendung verschiedener Legierungen realisiert werden. Vorrangig werden Legierungen der Werkstoffgruppe AISiMg, aufgrund ihrer mechanischen und technologischen Eigenschaften, verwendet. Je nach Zusammensetzung werden diese als Knet- (6xxxer) oder Gusslegierungen (EN AC 44000) bezeichnet und verarbeitet. Im weiteren Verlauf werden die naheutektischen AISiMg-Gusslegierungen näher beschrieben.

AISiMg-Legierungen mit Si-Gehalten um 11 wt. % und Mg-Gehalten von ca. 0,3 wt. % werden unter anderem bei der Volkswagen AG für die Herstellung von Fahrwerksbauteilen im Schwerkraftkokillengießen genutzt. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben erfolgt die Formfüllung ohne zusätzlichen Druck. Besonders in waagerechten Bereichen spielen daher das Fließvermögen und das Erstarrungsverhalten der Legierung eine besondere Rolle. Naheutektische, veredelte AISiMg-Legierungen besitzen eine geringe Viskosität und erstarren im Kokillenguss schwamm-/breiartig bis endogen-schalenbildend, wodurch sie sehr gute Fließeigenschaften aufweisen.

Durch eine Wärmebehandlung kann die Legierung aufgrund des vorhandenen Magnesiums (Mg) hohe Festigkeiten bei ausreichender Bruchdehnung erzielen. Weitere Legierungs- und Begleitelemente für diese Legierungsgruppe sind in Bild 5 gezeigt.

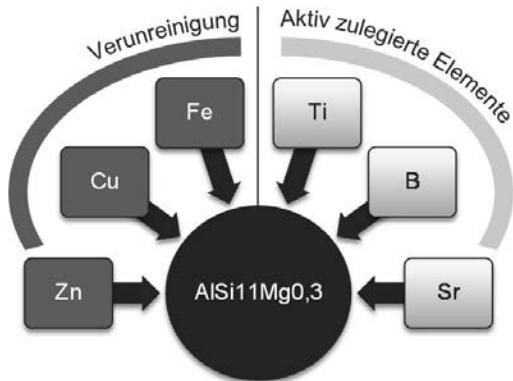


Bild 5: Elemente die als Verunreinigungen gelten (Zn, Cu, Fe) und aktiv zulegierte, Gefügebeeinflussenden Elemente (Ti, B, Sr) am Beispiel einer AlSi11Mg-Primär-Legierung für Fahrwerkanwendungen

Titan (Ti), Bor (B) und Strontium (Sr) werden zum Teil aktiv zulegiert, um die Ausbildung des Gefüges (Kornstruktur und Eutektikum) positiv zu beeinflussen. Eisen (Fe) ist ein Begleitelement das bei der Verarbeitung z.B. durch Werkzeuge in die Schmelze gelangt. Während der Erstarrung bilden sich intermetallische Eisenverbindungen, die auch eine plattenförmige Morphologie aufweisen können. Diese führen vor allem zu einer deutlich reduzierten Bruchdehnung. Der schädliche Effekt von Fe kann durch zulegieren von Mangan (Mn), durch Bildung sogenannter chinesenschriftartiger $Al(Fe,Mn,Si)$ -Verbindungen, geschwächt werden. Zink (Zn) und Kupfer (Cu) sind ebenfalls Verunreinigungen, die die Eigenschaften der Legierung hinsichtlich Korrosion und Festigkeit negativ beeinflussen können.

2.4 Fließ- und Formfüllvermögen

Das Fließvermögen einer Schmelze gibt an, wie weit diese unter gegebenen Randbedingungen, in einem definierten Kanal fließen kann. Das Formfüllungsvermögen beschreibt, wie genau die Kontur des Werkzeugs durch die Schmelze wiedergegeben werden kann. [6]

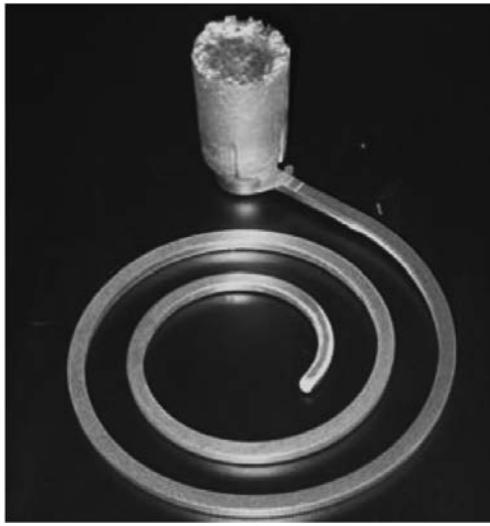


Bild 6: Gießspirale (Gussteil) zur Messung der Fließfähigkeit [8]

Untersuchungen zum Fließverhalten werden meist mit der Gießspirale (Bild 6) durchgeführt. Die Gießspirale eignet sich für die Werkstoffcharakterisierung und die Untersuchung der Wirksamkeit von Schlitten. Hierfür muss sichergestellt werden, dass die Randbedingungen der Versuche konstant bleiben. Chemische Zusammensetzung und Reinheitsgrad der Schmelze, Rauheit der Schlitten und die Fließ- und Formfüllgeschwindigkeiten müssen eingestellt und überwacht werden, da es sonst zu deutlichen Schwankungen der Fließlängen kommen kann. Durch Anpassung des Eingussbereichs können verschiedene Gießgeschwindigkeiten eingestellt werden. Die Untersuchung verschieden strukturierter Oberflächen kann mit dieser Kokille nicht realisiert werden. Das Fließvermögen wird maßgeblich von dem Erstarrungsverhalten der Legierung beeinflusst.

Erfahrungsbasiert können sogenannte Waffelmuster (makroskopische Strukturen auf der Werkzeugoberfläche) das Fließverhalten von Schmelzen positiv beeinflussen. In [7] konnte der positive Effekt im Schwerkraftkokillenguss durch geeignete Untersuchungen bestätigt

werden. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass strukturierte Werkzeugoberflächen ein hohes Potential zur Fließlängensteigerung aufweisen.

Für die Messung des Formfüllungsvermögens kommen spezielle Bolzen- (Bild 7) oder Kugelkokillen zum Einsatz. Auch hier ist die Reproduzierbarkeit von der chemischen Zusammensetzung der Schmelze, der Schlichte und den Temperaturen abhängig.



Bild 7: Gussteil Bolzenprobe aus AlSi7Mg0,3 in Anlehnung an (Engler, Ellebrock 1974) [3]

2.5 Zusammenfassung

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass:

- besonders in steifigkeitsrelevanten Bereichen von Fahrwerkbauteilen mehr Material als strukturmechanisch notwendig verwendet wird um die Herstellbarkeit im Schwerkraft-Kokillenguss zu gewährleisten,
- für Fahrwerkbauteile häufig naheutektische AlSiMg-Legierungen zum Einsatz kommen, deren Fließeigenschaften nicht signifikant gesteigert werden können,
- hochisolierende Schlichten das Fließvermögen positiv beeinflussen können,
- bisher in kaltlaufgefährdeten Bereichen Fließhilfen, vorwiegend in Form von Waffelmustern, eingesetzt werden, um die Formfüllung zu unterstützen.

Aufgabenstellung:

Es sollen Strukturen für die Anwendung im Schwerkraftkokillenguss hergeleitet und unter verschiedenen Bedingungen (mit und ohne Schlichte) im Labormaßstab erprobt werden. Im

weiteren Verlauf sollen die Laborerkenntnisse auf ein Bauteil übertragen und im Serienmaßstab überprüft werden.

3 Experimentelle Durchführung

3.1 Vorstellung der Versuchskokille

Das Fließverhalten von Leichtmetalllegierungen wird meist mit Hilfe der Gießspirale untersucht. Die Konstruktion dieser Kokille sieht nicht vor, Oberflächenstrukturierung zu variieren. Weiterhin reagiert die Gießspirale sehr sensibel auf die Randbedingungen, z.B. auf die Eingussbedingungen ohne Automatisierung (Stopfenpfanne o.ä.). Daraus können in einer Untersuchungsreihe deutliche Fließlängenunterschiede resultieren.

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzeugen, und die Oberflächen variieren zu können wurde eine Versuchskokille entwickelt. Diese Kokille (Bild 8) ermöglicht einen A-B-Vergleich, zwischen linker und rechter Kavität, um die Einflüsse der Randbedingungen zu minimieren. Die sogenannte modulare Kokille ist vierteilig aufgebaut. Im Formunterteil befinden sich das Anschnittssystem, die beiden Kavitäten (plattenförmig), die Entlüftungen am Ende der Kokille, sowie je Seite vier Bohrungen für Thermoelemente und Aussparungen für die sogenannten Modulplatten. Die Oberflächen dieser Modulplatten können durch die Auftragung von Schlichte, oder durch Strukturierung variiert werden. Die Formoberteile sind im Angussbereich geteilt, um die Entformung zu gewährleisten. Im Gussteilbereich können auch im Formoberteil Modulplatten eingesetzt werden. Den Einguss bildet ein metallischer Trichter mit definiertem Querschnittsverlauf, nach Nielsen. [9]

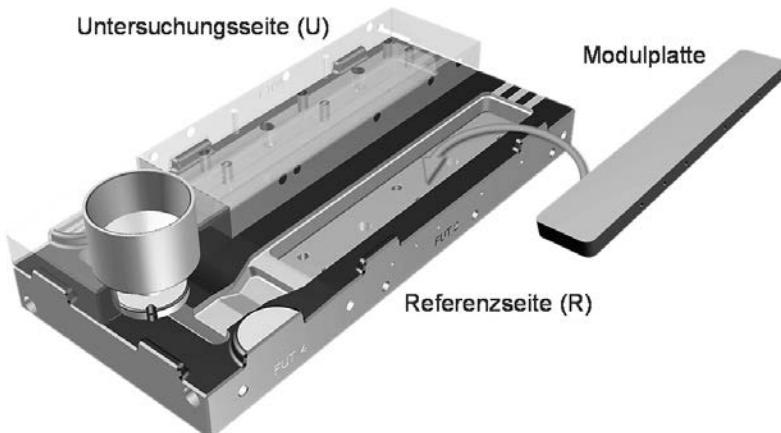


Bild 8: 3D-Modell der Versuchskokille, mit Kennzeichnung von Untersuchungsseite (U) und Referenzseite (R); Transparent: Formoberteil (U)

Die Schmelze strömt durch den Auslauf des metallischen Trichters in den Querlauf, von dem zwei Anschnitte abgehen. Aus diesen zwei Anschnittssystemen wird die Schmelze in die Kavitäten der Form geleitet. Diese werden als Referenz- (rechts) und Untersuchungsseite (links) bezeichnet.

Die Entwicklung wurde durch die Simulation mit Flow-3D unterstützt. Die Gießparameter wurden in Vorversuchen so gewählt, dass die Schmelze weit vor Erreichen der maximalen Fließlänge erstarrt. Somit können Fließlängenänderungen durch die Beeinflussung einzelner Parameter zugelassen werden.

3.2 Herleitung der Strukturen

Die Möglichkeiten bei der Herleitung von Strukturen sind denkbar groß. So kann beispielsweise die Natur als Vorlage genutzt werden, um Ideen zu generieren. Für eine Systematisierung soll hier der Begriff „Elementarzelle“ eingeführt werden. Dieser bildet, ähnlich einem Kristallgitter die kleinste wiederkehrende Einheit des Systems - in diesem Fall das Muster.

Die Elementarzelle kann durch die Parameter Profil und Skalierung beschrieben werden. Durch beliebiges Zusammensetzen der Elementarzellen entsteht das Muster. Die bereits

bekannten, und hergeleiteten Strukturen werden alphabetisch gekennzeichnet. Struktur A bildet dabei die Referenz der Untersuchungen und somit eine unstrukturierte, glatte gestrahlte Oberfläche. Als Struktur B wird das Waffelmuster bezeichnet (Bild 9). Dieses Muster wird bereits in vielen Gießereien verwendet, meist durch Fräsen oder Gravieren eingebracht, um das Fließverhalten der Legierung positiv zu beeinflussen.

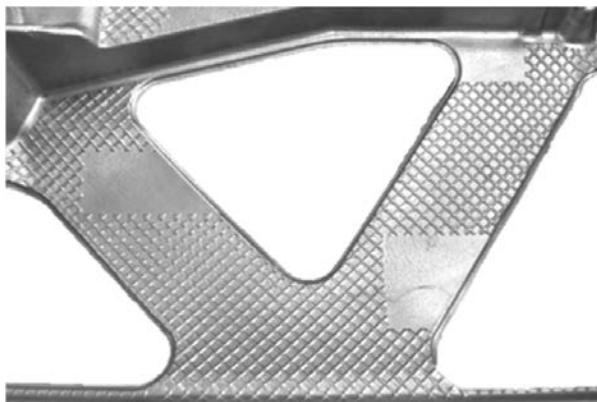


Bild 9: Waffelmuster, auf einem Gussteil der Volkswagen AG

Durch die Übertragung von natürlichen auf technische Oberflächen entstanden die Strukturen F und K. Struktur F soll die Benetzung der Oberfläche minimieren, und Struktur K soll die Strömung der Schmelze positiv beeinflussen. Diese Strukturen werden auf die Anwendung im Schwerkraftkokillenguss angepasst. Zur Realisierung der Strukturen auf den Modulplatten wird das Fertigungsverfahren thermisches Abtragen (Lasernarben) eingesetzt, das eine hohe Gestaltungsfreiheit und Bearbeitungsgenauigkeit ermöglicht.

3.3 Gießkampagnen

Es soll der Einfluss von Strukturierung und Schlichte auf das Fließverhalten der AlSi11Mg untersucht werden. In jeder Versuchsreihe bildet Struktur A (schlichtefrei bzw. geschlichtet) die Referenz. Es werden die im Formunterteil befindlichen Modulplatten variiert. Im Formoberteil wird stets die schllichtefreie Struktur A verwendet. Eine Versuchsreihe (Kombination aus Schlichte und Struktur) besteht aus sechs Versuchsabgüssen.

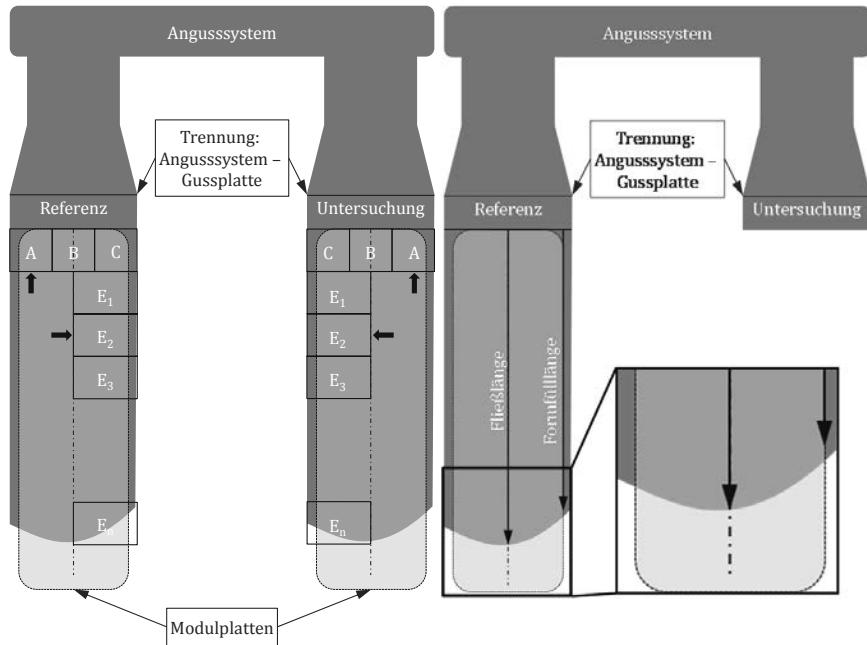


Bild 10: Schematische Darstellung eines Gussteils mit Referenz- und Untersuchungsseite, Darstellung der Probeentnahmestellen für Metallographie, Pfeile deuten die Be- trachtungsrichtung (Längs-/Querschliff) an

Das Versuchswerkzeug wird vor jedem Versuch angepasst, d.h. die strukturierten (geschlichteten) Modulplatten werden in die jeweilige Hälfte des Formunterteils eingesetzt. Die hochisolierende Schlichte wird mittels Lackerpistole möglichst gleichmäßig in Struktur und Dicke aufgetragen.

Bild 11: Schematische Darstellung eines Gussteils, Ermittlung von Fließ- und Formfülllänge am Beispiel der Referenzseite

Die AISI11Mg-Legierung (Stranggussmaterial) wird in SiC-Tiegeln, in einem Kammerofen geschmolzen und für mind. 90 min. bei 800 °C gehalten. Vor dem Abguss wird die Badoberfläche abgekratzt. Es erfolgt keine weitere Behandlungen der Schmelze (Ent-/Begasung, Kornfeinung, Veredelung). Die Gieß- und Kokillentemperaturen werden für diese Untersuchungen nicht variiert. Der Abguss erfolgt manuell, wobei auf einen konstanten Füllstand des metallischen Trichters geachtet wird.

Nach dem Abguss folgen die Entnahme des Gussteils (Bild 10), das Zusammensetzen und die Abkühlung des Werkzeugs. Am Gussteil werden die erreichten Fließ- und Formfülllängen ermittelt (Bild 11).

3.4 Metallographie

Um die Wirkung der Strukturierung genauer deuten zu können werden mikrostrukturelle Analysen durchgeführt. Hierfür werden Schliffproben der entstehenden Gussteile angefertigt. Die Auswertung erfolgt an Stitching-Aufnahmen, die mit einem Keyence VHX-2000 bei 200-facher Vergrößerung aufgenommen werden. Vermessen werden Schichten, die durch die mit der Plattengeometrie verbundenen Erstarrung entstehen (Bild 12) sowie die Abstände der darin befindlichen Dendritenarme (DAS). Dies soll Hinweise auf die Isolationswirkung von

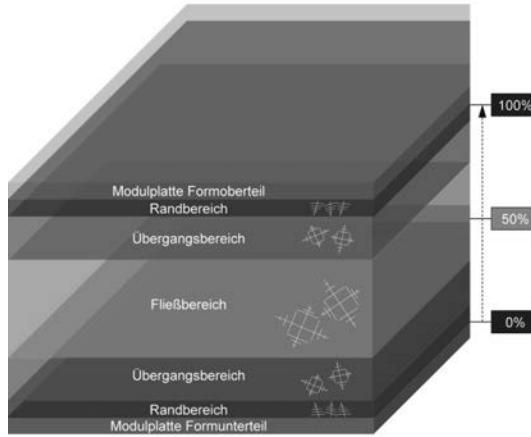


Bild 12: Schematische Darstellung des plattenförmigen Gussteils mit Kennzeichnung der durch Erstarrung entstehenden Bereiche

Strukturierung und Schlichte liefern. Dargestellt werden die ermittelten DAS an Schliffprobe E₂ (Bild 10) in verschiedenen Höhenlagen des Schliffes ausgehend von der bearbeiteten Oberfläche.

4 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Im Folgenden werden phänomenologisch die Fließlängen in Abhängigkeit von den Parametern Struktur, Schlichte und Wandstärke einzeln dargestellt.

Ergänzend hierzu werden die Ergebnisse der metallographischen Analysen (DAS-Messungen) auszugsweise dargestellt.

4.1 Strukturabhängiges Fließverhalten

Zunächst werden die Ergebnisse der Untersuchungen im schlichtefreien, im weiteren Verlauf die Ergebnisse im geschlichteten Zustand vorgestellt. Dabei werden die Merkmale Fließlänge und Formfülllänge, sowie die Verteilung der DAS im Querschliff betrachtet.

Schlichtefrei

Die maximale Fließlänge wurde durch die Verwendung von Struktur K erreicht und beträgt, relativ zu Struktur A, 218 %. Die Struktur B (Waffelmuster) erreicht eine Fließlänge von ca. 152 %. Struktur F weist im Mittel eine Fließlänge von ca. 146 % auf. Unter diesen Randbedingungen erreichen die untersuchten Strukturen, im Vergleich zur Referenz, signifikant höhere Fließlängen (Bild 13).

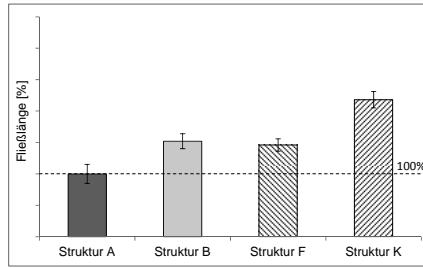


Bild 13: Fließlängen [%] in Abhängigkeit von der Strukturierung, ohne Verwendung von Schlichte

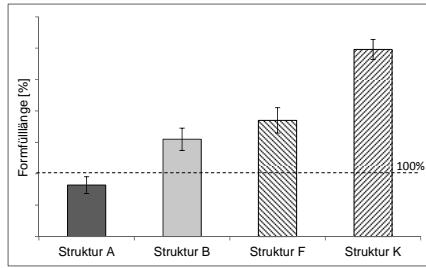


Bild 14: Formfülllängen [%] in Abhängigkeit von der Strukturierung, ohne Verwendung von Schlichte

Die maximale Formfülllänge wurde für Struktur K ermittelt (ca. 298 %). Struktur B erreicht eine Formfülllänge von 155 %, Struktur F 185 % (Bild 14).

Die Steigerung der Formfülllänge ist somit, gegenüber der Steigerung der Fließlänge, für die bionischen Strukturen F und K stärker als für die konventionelle Struktur B.

Bild 15 zeigt die ermittelten DAS in Abhängigkeit von der Position im Querschnitt an Stelle E₂ und der verwendeten Strukturierung. Zu erkennen ist, dass die DAS von den Rändern (0 % bzw. 100 %, < 10 µm) hin zu der Mitte (50 %, > 13 µm) deutlich größer werden. Im Mittel wurden für Struktur A im unteren und mittleren Bereich der Platte die geringsten, für Struktur K die höchsten DAS ermittelt. Strukturen B und F weisen ähnliche DAS in der Plattenmitte auf.

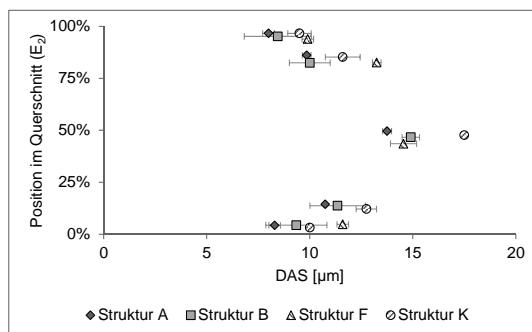


Bild 15: Verteilung der DAS im Querschnitt der Gussplatten an Position E₂, in Abhängigkeit von der Strukturierung, schlichtefrei

Hochisolierende Schlichte

Die ermittelten Fließlängen sind in Bild 16, die Formfülllängen in Bild 17 dargestellt. Die Strukturen B und F erreichen, auch im geschlichteten Zustand und bezogen auf die geschlichtete Referenzfließlänge, ähnliche Fließlängen wie im schlichtefreien Zustand. Struktur K erreicht eine Fließlänge gegenüber Struktur A von 180 %.

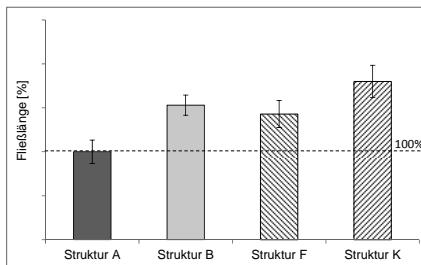


Bild 16: Fließlänge [%] in Abhängigkeit von der Strukturierung, mit Verwendung der hochisolierenden Schlichte

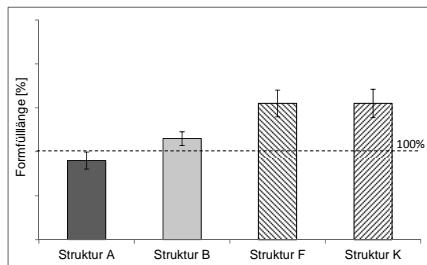


Bild 17: Formfülllänge [%] in Abhängigkeit von der Strukturierung, mit Verwendung der hochisolierenden Schlichte

Bei Betrachtung der Formfülllängen erkennt man, dass Struktur B, unter Berücksichtigung der Schwankungen, keine signifikante Steigerung gegenüber Struktur A bewirkt. Strukturen F und K erreichen Formfülllängen von ca. 155 %.

Bild 18 stellt die Verteilung der DAS innerhalb der Gussplatte bei Verwendung der Strukturierungen und der hochisolierenden Schlichte dar.

Die ermittelten DAS an der Oberkante (100 %, ca. 11 µm), dem oberen Viertel (75 %, ca. 12 µm) und in der Mitte (50 %, ca. 18 µm) der Probe sind nahezu identisch. Für Struktur A wurden jeweils die geringsten DAS ermittelt.

An der Plattenunterkante (0 – 25 %) zeigen sich z.T. signifikante Unterschiede. Die maximalen DAS wurden für Struktur K (ca. 15 µm) ermittelt, während die minimalen DAS für Struktur B und F gemessen wurden.

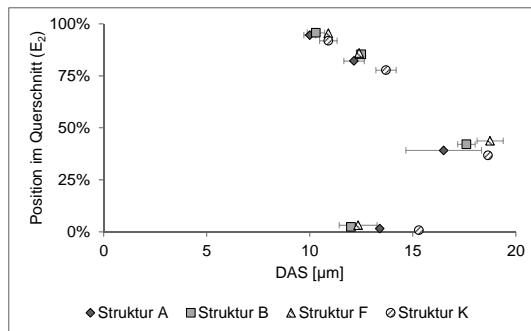


Bild 18: Verteilung der DAS im Querschnitt der Gussplatten an Position E₂,
in Abhängigkeit von der Strukturierung, hochisolierende Schlichte

4.2 Wandstärkenabhängiges Fließverhalten

Um abschätzen zu können, wieviel des Potentials der Fließlängensteigerung zur Wandstärkenreduzierung genutzt werden kann, wurden unter den Modulplatten Blecheinleger mit einer Dicke von je 0,5 mm installiert. Für die Untersuchungen wurden die Strukturen A, B und K verwendet.

Bild 19 zeigt die ermittelten Fließlängen und Bild 20 die entsprechenden Formfülllängen. Mit sinkender Wandstärke sinken entsprechend auch die Fließ- und Formfülllängen. Für die Strukturen A und B erhält man bei jeweils ca. 5 mm einen Schnittpunkt. Struktur K weist hinsichtlich der Fließ- und Formfülllänge bis 4,5 mm keinen Schnittpunkt mit Struktur A auf. Die Änderung der Formfülllänge ist in Abhängigkeit von der Wandstärke deutlich stärker, als für die Fließlänge.

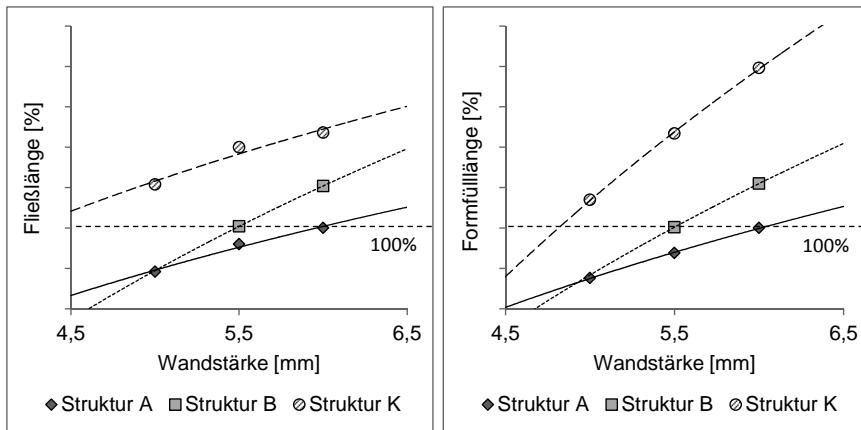


Bild 19: Fließlänge [%] in Abhängigkeit von Strukturierung und Wandstärke, schlichtefrei

Bild 20: Formfülllänge [%] in Abhängigkeit von Strukturierung und Wandstärke, schlichtefrei

4.3 Zusammenfassung

Wie in den Abschnitten 4.1 und 4.2 gezeigt, können die Strukturen F und K, hinsichtlich der Fließ- und Formfülllänge deutliche Steigerungen gegenüber Struktur A und teilweise auch gegenüber Struktur B bewirken. Dabei sind die Effekte bei schlichtefreier Anwendung am stärksten. Durch das Schlichten der Oberfläche mit der hochisolierenden Schlichte nimmt die Steigerung der Fließlänge, insbesondere bei Struktur K ab.

Die Verwendung der strukturierten Oberflächen kann, hinsichtlich der DAS, zu einer signifikanten Änderung der Mikrostruktur führen (Bild 15 und Bild 18, Struktur K).

Das Potential das durch die Fließ- und Formfülllängensteigerung generiert wird, kann zur Wandstärkenreduzierung genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass strukturierte Oberflächen bei geringeren Wandstärken auch negative Wirkung haben können (Bild 20, Struktur B).

5 Anwendung auf Serienbauteil

5.1 Randbedingungen zur Strukturüberführung

Bei der Überführung der identifizierten Oberflächenstrukturen gibt es vielfältige Aspekte, die zu berücksichtigen sind. Dabei ist für die Auswahl der entsprechenden Struktur neben der gewünschten Zielwandstärke das Verhalten unter dynamischer und korrosiver Umgebung das wichtigste Kriterium. Auch können strukturierte Flächen nur soweit erzeugt werden, wie keine Hinterschnitte entstehen.

Aus dem Einsatz des Waffelmusters ist bereits bekannt, dass dessen Verwendung unter Einhaltung gewisser Konstruktionsregeln keinen Einfluss auf das Verhalten des Gesamtbau- teils hat. Ziel der Konstruktionsregeln ist, eine kerbwirkende Ausbildung der Struktur zu vermeiden. Insbesondere kann dies geschehen, wenn Bereiche, die durch mechanische Bearbeitung verändert werden, eine Struktur beinhalten, die nach der Bearbeitung die Ansammlung lokaler Spannungen begünstigt. Dies kann ebenfalls im Falle eines ungünstigen Auslaufes der Struktur in Randbereiche der Bauteilgeometrie oder beim Einlauf in Rippen geschehen.

Es lassen sich folgende Konstruktionsregeln festhalten:

1. Scharfkantige Geometrien sind zu vermeiden. Diese sind kerbwirkend und können bei ungünstiger Lage die Lebensdauer des Bauteils reduzieren
2. Strukturen sind ggü. dem Querschnitt erhaben auszuführen. Eine Querschnittsschwächung über den gesamten Geometriebereich durch Einsatz einer Strukturierung muss vermieden werden.
3. Ein harmonischer Auslauf der Struktur zu Bereichen, die später mechanisch bearbeitet werden, ist zu gewährleisten. Dabei endet die Struktur außerhalb des Bereiches der späteren Bearbeitung
4. Der Einlauf in Rippenbereiche ist mit einem weichen, abgerundeten Übergang zu versehen. Dies kann durch einen großen Radius im Rippengrund, durch eine Abflachung der Struktur zur Rippe hin oder durch frühzeitigen Auslauf der Struktur erfolgen
5. Der Auslauf der Strukturierung zu Kantenbereichen ist vor deren Ende in die Geometrie mit weichem Einlauf auszuführen

Bild 21 veranschaulicht auszugsweise diese Regeln. Neben den Konstruktionsregeln ist darauf zu achten, dass die Strukturen keine Hinterschnitte erzeugen. Die Strukturen können nur unter Berücksichtigung eines Maximalwinkels, mit dem die zu strukturierenden Flächen zur Entformungsrichtung stehen, auf die gewünschten Teilbereiche aufgebracht werden.

	ungünstige Ausführung	günstige Ausführung	
Gusszustand			Im Bereich späterer mech. Bearbeitung ist die Oberflächenstrukturierung mit hinreichendem Abstand zu unterbrechen.
mech. Bearb.			Dadurch ist die Vermeidung undefinierten Schnittkonturen gewährleistet.
Detail			Diese können, wie im Detail zu erkennen, bei ungünstiger Ausführung eine kerbartige Wirkung haben. Diese gilt es zu vermeiden.

Bild 21: Auszug Konstruktionsrichtlinien für die Auslegung strukturierter Werkzeugoberflächen

5.2 Entwicklung der Seriengeometrie

Zur Überführung der identifizierten Strukturen wird der Vorderachs-Hilfsrahmen der MQB-Plattform gewählt, da dieser große, flächige Bereiche aufweist, die prozessbedingt aktuell mit höherer Wandstärke ausgeführt wurden, als von Seiten Festigkeit und Steifigkeit erforderlich wären. Ferner soll das Dünnwand-Pendant im aktuellen Serienprozess gefertigt werden, um vergleichbare Ergebnisse zum Serienstand zu erzeugen. Der Hilfsrahmen bekommt folglich kein komplettes Re-Design. Es werden lediglich diejenigen Bereiche ausgedünnt, die gemäß der Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen dünnwandiger gestaltet werden können, was mittels FEM-basierte Betriebslasten- und Lebensdauerrechnungen abgesichert wird (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Aufgrund gegebener Prozessrandbedingungen werden Außenkontur wie auch die Formteilung nicht verändert. Damit kann der optimierte Geometriestand unter Serienbedingungen neben der aktuellen Geometrie gefertigt werden und den verketteten Prozess durchlaufen. Auf Basis der prognostizierten Potenziale zur Wandstärkenreduzierung sind Flächen, die weitge-

hend senkrecht zur Entformungsrichtung verlaufen und damit strukturierbar sind, in Ihrer Stärke um 35 % reduziert worden. Damit kann für den Hilfsrahmen ein Leichtbaupotenzial von gut einem halben Kilo gegenüber dem Serienstand ausgewiesen werden. Bei komplettem Re-Design wäre das Potenzial höher ausgefallen.

Unter Berücksichtigung der unter 5.1 genannten Regeln können die erprobten Strukturen F und K auf ausgewählte Bereiche des Bauteils gebracht werden. Zur Festlegung, ob lokal Struktur F oder K eingesetzt werden müssen, wird mittels der Gießsimulation das Fließ- und Formfüllverhalten bewertet. Bereiche, die mit einer Vorzugsrichtung gefüllt werden, wird die Struktur K zugewiesen. In Bereichen, die eher turbulent bzw. mit Richtungswechsel oder uneindeutig gefüllt werden, kommt Struktur F zum Einsatz.

Bei der Umsetzung der Struktur auf der Kokille finden klassische Fertigungsverfahren, wie das Fräsen, das bisher das Mittel der Wahl für die Waffelmuster war, ihre Grenzen. Die Komplexität und Filigranität der neuen Strukturen ist zu groß. Eine Lösung bietet das Lasernarben, also das Laserstrukturieren mittels 3D-Laserabtrag zur Herstellung filigraner Konturen. Dabei wird die im CAD erzeugte Zielstruktur in einer speziellen Software in ein Graustufenbild überführt. Jeder Stufe werden unterschiedliche Abtragstiefen zugeordnet, sodass die Struktur mit hoher Abbildungsgenauigkeit hergestellt werden kann. Hierbei wird der maximale Abtrag bei Schwarz bzw. kein Abtrag bei Weiß erzeugt. Zudem können die Konstruktionsregeln im Rahmen des softwareseitigen Design-Prozesses berücksichtigt werden. Homogene, weiche Strukturverläufe in die Hauptgeometrie sind gewährleistet. Die Geschwindigkeit ist akzeptabel, grundsätzlich aber langsamer als beispielweise das Gravieren bzw. Fräsen des klassischen Waffelmusters. Der Mehraufwand wird durch die Gewichtsersparnis allerdings sehr schnell kompensiert.

5.3 Seriengießversuche

Zur Vorbereitung der Seriengießversuche wurde der aktuelle Prozess bereits zu einem frühen Stadium auf Kompatibilität zum optimierten Hilfsrahmen überprüft. Beispielsweise gehören hierzu die Schmelzmenge beim Abguss oder die Aufnahme während der Rohteilbearbeitung und im verketteten Transport. Die optimierte Kokille wurde gemäß Serienparametern aufbereitet. Hierzu gehören insbesondere Strahlen, Schlichten und Aufheizen. Hierbei konnten keine Abweichungen zum bestehenden Prozess beobachtet werden. Auf dem Rundtisch ist eine Gießmaschine mit der Kokille des Dünnwand-Hilfsrahmens bestückt worden. Alle

weiteren Gießmaschinen wurden mit der aktuellen Serienlösung bestückt. Bis zum Ende der Gießversuche konnte die Strukturierung auf den Bauteilen eindeutig erkannt werden. Ein Zusetzen der Strukturierung durch Nachschlichten konnte im Verlauf der Gießversuche nicht beobachtet werden.

Der vollständige Prozess vom Gießen bis zur mechanischen Bearbeitung wurde durchlaufen. Die Zwischenschritte Rohteilbearbeitung, Röntgen, Wärmebehandlung, Richten, Farbeindringprüfung und Sichtprüfung zeigten keine Auffälligkeiten oder unzulässigen Abweichungen gegenüber dem Serienprozess. Auch konnten die einzelnen Schritte ohne gesonderte Maßnahmen durchlaufen werden.

5.4 Bauteilerprobung

Zur Identifikation des Struktur- und Leichtbaueinflusses durch die neuartigen Oberflächen wurden die unter Serienbedingungen gefertigten Bauteile vergleichend auf einem Mehrkomponenten-Prüfstand einer Betriebslastenprüfung unter Korrosion unterzogen. Hierbei wird ein Lastsignal über Anbindungen und Anbauteile durch servohydraulische Antriebe in das Bauteil spielarm und seitenkraftfrei eingeleitet. Damit wird das Belastungsschema im Fahrzeugleben simuliert. Während der Erprobung wird der Hilfsrahmen zyklisch mit einer 5%igen NaCl-Lösung berengt. Das Bauteil wird bis zum Ausfall durch technischen Anriß erprobt.

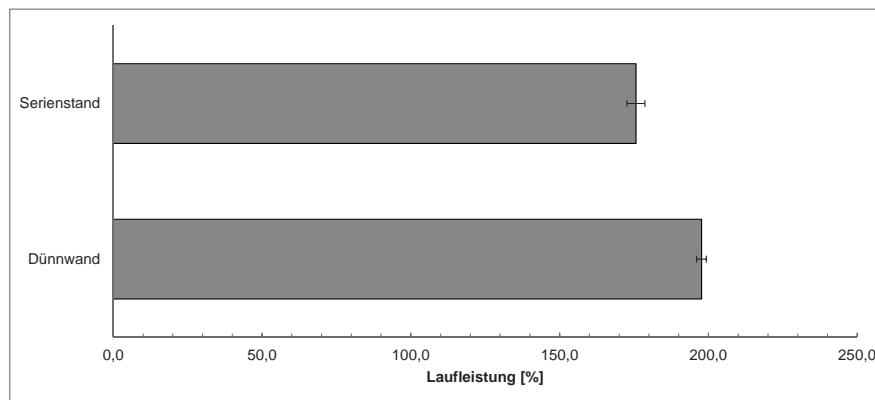


Bild 22: Vergleich der Laufleistungen am Beispiel Serienstand und Dünnewand-Derivat

Die untersuchten Hilfsrahmen erfüllen die Anforderungen deutlich. Der optimierte Dünnewand-Hilfsrahmen zeigt trotz geringeren Gewichts eine um 12 % höhere Laufleistung. Der Schadensort war bei allen Prüfteilen identisch.

Dies lässt sich durch höhere Toleranz des optimierten Hilfsrahmens gegenüber Dynamikeffekten der eingeleiteten Kräfte erklären, da dünnwandige Teilbereiche lokal geringere Steifigkeiten aufweisen. Global betrachtet verbucht der optimierte Hilfsrahmen jedoch nahezu gleiche Steifigkeiten gegenüber dem Serienstand. Dies unterstreicht das Leichtbaupotential. Die anschließende Analyse der erprobten Bauteile liefert zwei wesentliche Erkenntnisse. Einerseits wird der Ausfallort nicht durch Struktur oder Leichtbaumaßnahmen beeinflusst. Die getroffenen konstruktiven Maßnahmen und die im Vorfeld abgeleiteten Konstruktionsregeln zeigen Wirkung. Andererseits konnte durch die veränderte Oberflächenmorphologie keine Veränderung im Korrosionsverhalten identifiziert werden. Dies lässt sich durch eine ähnliche Oberflächenvergrößerung im Vergleich zum Waffelmuster gegenüber unstrukturierter Fläche begründen. Das Bauteil wird durch Umwelteinflüsse nicht stärker beeinträchtigt.

6 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund des gesetzlich vorgegebenen CO₂-Zieles, den Flottenverbrauch in Europa bis 2020 auf untern bis 95 g CO₂/km zu bringen, steigt der Leichtbaudruck. Ein Mittel dem zu begegnen ist der werkstoffliche Leichtbau durch vermehrten Einsatz von Aluminium, wie er im Fahrwerk zu beobachten ist. Ein Beispiel ist der Hilfsrahmen der MQB-Plattform, der neben einer Stahl-Lösung als Aluminium-Derivat unter anderem in Volkswagen Passat und Audi A3 zum Einsatz kommt. Aktuell ist es nicht möglich, diesen trotz Verwendung einer naheutektischen AlSiMg-Legierung, hochisolierender Schlichte und einfacher Oberflächenstrukturierung (Waffelmuster) unter Großserienbedingungen mit Wandstärken von kleiner als 5,5 mm prozesssicher herzustellen. Das Leichtbaupotential der eingesetzten Aluminiumgusswerkstoffe kann im Schwerkraftkokillenguss, aufgrund dieser Fertigungsrestriktionen nicht vollständig ausgeschöpft werden.

Ausgehend von der Fragestellung, ob eine Wandstärkenreduzierung kostengünstig und prozesssicher unter Großserienbedingungen umsetzbar ist, wurden zunächst Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt und die Ergebnisse auf einen Al-Hilfsrahmen unter Serienbedingungen übertragen.

Die gezeigten Ergebnisse im Labormaßstab verdeutlichen, dass durch Modifikation der Oberfläche, das Fließ- und Formfüllvermögen von Al-Legierungen signifikant gesteigert (Abschnitt 4.1) und dieses Potential zur Reduzierung der Wandstärke genutzt werden kann (Abschnitt 4.2).



Bild 23: Wandstärkenvergleich zwischen Standard-Hilfsrahmen (rechts) und Dünnwand-Derivat (links)

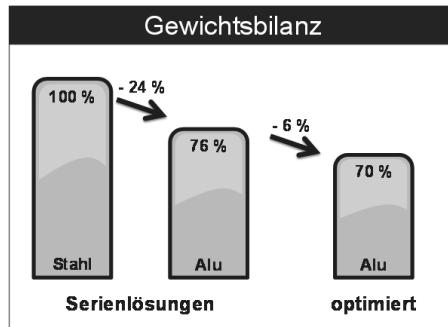


Bild 24: Gewichtsbilanz: Serienlösungen vs. Optimierung

Die Erkenntnisse wurden auf einen Al-Hilfsrahmen der Volkswagen AG übertragen. Hierfür wurden Festigkeits- und Steifigkeitsanalysen, zur Identifikation von Mindestwandstärken und Gießsimulationen, zur Definition von Strukturierungsflächen bzw. -richtungen durchgeführt. Die in der Wandstärke angepasste Kokille wurde auf der Serienanlage des Volkswagen Werks Braunschweig (Gießrundtisch) installiert, und eine Schicht lang gefahren.

Die erzeugten Gussteile entsprachen der aktuellen Serienqualität. Die nachgeschalteten Serienprüfungen (Röntgen, Sicht- und Farbeindrüngprüfung) wurden ohne Mängel durchlaufen.

Nach der Wärmebehandlung wurden zwei der Dünnwand-Derivate des Hilfsrahmens einer zyklischen Bauteilprüfung unter Korrosionsbelastung unterzogen. Die Ergebnisse zeigen keine signifikanten Unterschiede im Ausfallort bei leicht besserer Laufleistung im Vergleich zu den aktuellen Serienteilen. Somit konnte durch die Anwendung der strukturierten Oberflächen die Wandstärke partiell um 35 % (Bild 23) reduziert werden und damit eine Gewichtseinsparung von gut einem halben Kilo (Bild 24), kostenneutral gegenüber der Serie erzeugt werden, ohne die Bauteilperformance zu ändern.

7 Ausblick

Bisher wurden, sowohl im Labormaßstab, als auch in den Serienversuchen geringe Stückzahlen mit den strukturierten Oberflächen erzeugt. Die Auswirkung der Dauerbelastung durch die Schmelze, das Nachschichten während einer Schicht, und die Haltbarkeit der Strukturierung nach mehrfachem Aufbereiten des Werkzeugs sind nicht vollständig bekannt. Hierzu werden derzeit Untersuchungen an den strukturierten Modulplatten im Labormaßstab durchgeführt. Es sind weitere Serienversuche geplant, um die Auswirkungen von mehrfachem Nachschichten sowie dem Verschleißverhalten zu untersuchen. Zudem werden Reparaturlösungen erarbeitet.

Neben den Untersuchungen hinsichtlich des Verschleißverhaltens werden weitere Anwendungsbereiche für den Einsatz strukturierter Werkzeugoberflächen identifiziert, um Wandstärken zu reduzieren und Prozesse zu stabilisieren.

Diese Technologie wird gemäß dem aktuellen Planstand mit der nächsten Produktgeneration Anwendung in der Serie finden.

Literaturverzeichnis

- [1] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: "Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO2-Emmisionen von Personenkraftwagen",“ 01 04 2009. [Online]. Available: www.bmub.bund.de/N43842/. [Zugriff am 26 10 2015].
- [2] V. AG, „Konzern Nachhaltigkeitsbericht 2014,“ Volkswagen AG, 2014. [Online]. Available: http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/nachhaltigkeitsberichte/konzern-nachhaltigkeitsbericht-2014/_jcr_content/renditions/rendition.file/volkswagen_nachhaltigkeitsbericht_2014.pdf. [Zugriff am 26 10 2015].
- [3] W. M. G. S. Andreas Bührig-Polaczek, Handbuch Urformen, München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [4] H. E. Friedrich, Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer, 2013.
- [5] BDGuss, „Guss.de,“ [Online]. Available: http://www.guss.de/fileadmin/content_bdguss/BDG-Service/Infothek/Broschueren/Sand_und_Kokillenguss_aus_Aluminium.pdf. [Zugriff am 06 10 2015].
- [6] S. Hasse, Giesserei Lexikon, 18. Hrsg., Berlin: Schiele und Schön, 2008.
- [7] G. S. F. S. B. T. Knorr S., „Strukturierte Kokillenoberflächen im Schwerkraftkokillengießen - Stand der Technik,“ *Giesserei*, 12 2015.
- [8] K. R., „Neue und bewährte Methoden - Überwachung der Schmelzequalität in Leichtmetallgießereien,“ *Giesserei-Erfahrungsaustausch*, Nr. Heft 6, pp. 4-6, 2008.
- [9] U. Brandenberger, „Giess- und Anschnittstechnik nach Friedrich Nielsen,“ [Online]. Available: www.urs-brandenberger.de/downloads. [Zugriff am 21 10 2015].

Welche Komplexität treibt Gießer und Entwickler um? Was sind die Haupttreiber?

Vertreter des Programmausschusses
unter der Leitung von Dipl.-Ing. **Jean-Marc Ségaud**

STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN INTEGRATION IN DIE PROZESSKETTE

Globale technische und wirtschaftliche Betrachtung

Wettbewerb der Materialien

Wettbewerb der Prozesse

Politik, Logistik, Zoll...

Integration in den Werken der OEMs

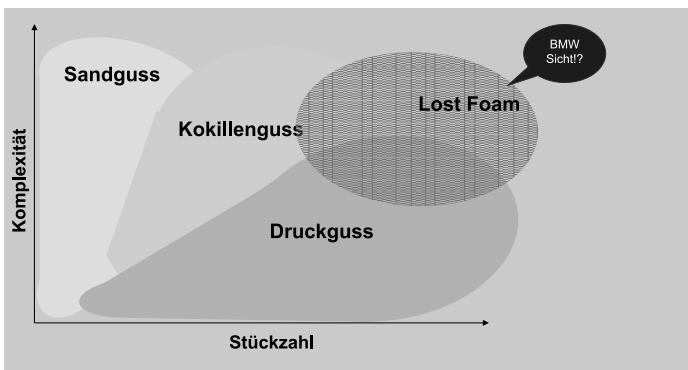
STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN GLOBALE TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG



STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN. WETTBEWERB DER MATERIALIEN.

	Stahl			Aluminium		Magnesium		CFK	
	Duktil	Hochf.	HF	Schmieden	Guss	Schmieden	Guss	Unidir.	Quasi-insul.
Spezifische Festigkeit		etwa 700MPa > Al							
Spez. Steifigkeit (Zug/Druck)									
Kerben, Torsion, Biegung									
Duktilität (Crash)	A zu über 40%	Potential TWIP - 60%	?						
Formgebung/ Integralbauweise									
Materialkosten und Verfügbarkeit								Ziel: Materialkosten - 50% Prozesskosten - 90%	
Widerstand gegen Knechen									
Karosserie	Komplexe Geometrie	Crash-relevante Teile	Säulen	Türen, Ventile	Integral Bauteile	Interieur	Interieur	Struktur	Struktur
Fahrwerk		Streben, Lenker		Supports	Knoten			Vorteile	
								Optimierbar	
								Einschränkung	

**STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN
WETTBEWERB DER PROZESSE**

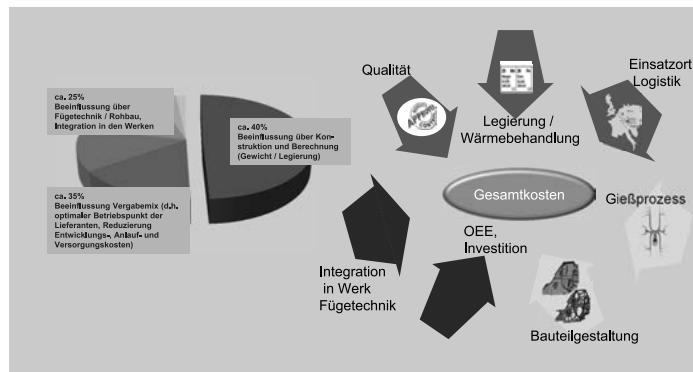


**STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN
WETTBEWERB DER STANDORE**



Beispiel schlecht stapelbares
Bauteil wie Instrumententafelträger

STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN KOSTENANALYSE



STRUKTURELLE ANWENDUNG VON GUSSKOMPONENTEN HERAUSFORDERUNGEN UND AKTUELLE FRAGESTELLUNGEN

Wie werden Kosten, Qualität, Flexibilität und Innovation gegeneinander gewichtet?
Welcher Faktor ist für die OEMs entscheidend? Ist Innovation überhaupt gefragt?

Wie nachhaltig ist der Trend der strukturellen Gussanwendung? Wo geht die Reise weiter hin? Teilweise auch wieder zurück zum Stahl (Vorteile / Kosten)? (ggf. auch welche Einheitslegierung setzt sich durch / auch Salzkerne im DG?)

Die neuen Konzepte bringen neue Herausforderungen bei Design, Fertigung, Fügetechniken und Korrosionsschutz. Wie werden die Anforderungen gestellt bzw. erfüllt? Welche neuen Anforderungen kommen auf die Gießer zu?

Die gesamte Prozesskette inklusive der Logistik muss neu überlegt werden. Ist die Nähe wichtiger als die Kosten?

Wo ist noch Forschungs- bzw. Entwicklungsbedarf am größten? Was sollten die Universitäten bzw. Fachhochschulen anbieten? Wie kann / sollte das Miteinander, d.h. der Forschungskooperation bzw. Uni und Industrie bestmöglich ausgestaltet werden?

ISBN 978-3-18-092274-4

<https://doi.org/10.51120/9783180922740> - Generiert durch IP 216.73.216.00, am 24.01.2020, 08:25:00. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in AI-Systemen, AI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.