

Gießen von Fahrwerks-und Karosseriekomponenten



VDI-Berichte 2318

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten

Esslingen, 21. und 22. Februar 2018



VDI-Berichte 2318

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

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 978-3-18-092318-5

Vorwort

1

Auswirkungen des Strukturwandels der Automobilhersteller auf die Gießereiindustrie

<i>M. Hummel,</i> <i>A. Hoffmann</i>	Innovativer Leichtbau im neuen Audi A8	3
---	--	---

Produkt- und Prozessentstehung

<i>A. Hennings,</i> <i>A. Spatzenegger</i>	Kosteneffiziente Fertigung von Strukturgussbauteilen durch optimierte Prozessplanung und Entwicklung entlang der gesamten Wertschöpfungskette	15
<i>L. Leineweber,</i> <i>H. Bramann</i>	Simulation von Gießprozessen für robuste und optimierte Gussteile mit maßgefertigten Eigenschaften	31

Werkzeugentwicklung

<i>M. Salb</i>	Aluminium Druckgussbauteile in 3-Platten Technologie	55
<i>L. Reiche,</i> <i>M. Fehlbier</i>	Intelligentes Gießwerkzeug im Dauerformguss mit Wärmerückgewinnung	71
<i>S. Seidl,</i> <i>C. Schmalhorst,</i> <i>A. Oliva,</i> <i>F. Uhlig,</i> <i>I. Thiele</i>	Numerische Grundsatzuntersuchungen der Abkühlung sowie der Verzüge bei der Spray-Kühlung einer Platten-geometrie dünner Wandstärke	79
<i>S. Heinrich</i>	Performancebasierte Thermohaushalts-Auslegung von Druckgussformen	99

Entwicklung Karosserierohbau

<i>R. Wünsche</i>	Herausforderungen in der Gehäuse- und Struktur- entwicklung von HV-Batteriesystemen	111
<i>P. Lutze</i>	Hochvoltbatteriekasten als Hybridkonstruktion aus Druckguss und Blech – Mögliche Fügeverfahren und Nahtgeometrien	115
<i>M. Senff, J.-M. Ségaud</i>	Karosserieleichtbau in Al-Stahl-Mischbauweise – Fügetechnisch optimierte Integration von Al-Guss in Roh- bauprozessen durch hybride Unterzusammenbauten	129

Werkstoffe

<i>T. Mache, K. Maier, T. Spielmann, Ç. Köroğlu</i>	Integration der lieferantenseitigen T5 Wärmebehandlung für Strukturgussteile der Legierung AlSi7MnMg (C611) in den Lacktrocknungsprozess des OEM – Optimierung der Prozesskette	143
<i>H. Koch, A. Kleine</i>	Aluminiumlegierungen für Strukturteile und deren Wärmebehandlung	157
<i>D. Schittenhelm, J.-M. Ségaud</i>	Stahlverstärkter Al-Druckguss – Integration eines Stahlkerns zur lokalen Verstärkung von Druckgussbauteilen	171

Strukturguss

<i>S. Roeren, S. von Kuepach</i>	Standardisierung als Schlüssel für Innovationen – Nische oder Volumen? Die Prozesskette Druckguss im Wandel der Reifegrade	189
--------------------------------------	--	-----

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

der nachhaltige Trend zu Digitalisierung und Industrie 4.0 führt dazu, dass OEM' s im Automotive-Sektor ihre Geschäftsmodelle modifizieren und von reinen Automobilproduzenten zukünftig immer mehr zu Mobilitätsanbietern generieren. Das hat Auswirkungen auf die Zulieferkette, d.h. OEM' s werden zukünftig weniger in Hardware investieren, der Gießer muss sich zunehmend vom reinen Gusshersteller zum Modullieferanten entwickeln, und auch die Finanzierbarkeit von Leichtbau ist begrenzt.

Der „funktionsintegrative Leicht- und Mischbau“ könnte hier eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung innovativer Fahrzeugkonzepte einnehmen und gute Chancen bieten, bestehende Marktanteile zu sichern sowie neue Marktsegmente zu erschließen – vorausgesetzt, bestehende Technologien werden neue Lösungsräume darstellen und anbieten können.

Die in diesem Kontext bereits fest etablierte Diskussionsplattform der VDI-Fachtagung „Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten“ möchte in 2018 in Esslingen durch den Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft die Themen: Strukturwandel in der Automobilindustrie und Auswirkungen auf die Gießereiindustrie, Entwicklungen im Karosseriebau und Fahrwerk sowie den Einfluss des E-Antriebs umfassend beleuchten und damit zur Beschleunigung des Technologietransfers beitragen.

Wir freuen uns auf spannende Vorträge und den Austausch mit Ihnen!

Im Namen des Programmausschusses

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, GTK - Universität Kassel und

Dipl.-Ing. Jean-Marc Ségaud, BMW AG

Goldsponsor



MARTINREA HONSEL

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

der nachhaltige Trend zu Digitalisierung und Industrie 4.0 führt dazu, dass OEM' s im Automotive-Sektor ihre Geschäftsmodelle modifizieren und von reinen Automobilproduzenten zukünftig immer mehr zu Mobilitätsanbietern generieren. Das hat Auswirkungen auf die Zulieferkette, d.h. OEM' s werden zukünftig weniger in Hardware investieren, der Gießer muss sich zunehmend vom reinen Gusshersteller zum Modullieferanten entwickeln, und auch die Finanzierbarkeit von Leichtbau ist begrenzt.

Der „funktionsintegrative Leicht- und Mischbau“ könnte hier eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung innovativer Fahrzeugkonzepte einnehmen und gute Chancen bieten, bestehende Marktanteile zu sichern sowie neue Marktsegmente zu erschließen – vorausgesetzt, bestehende Technologien werden neue Lösungsräume darstellen und anbieten können.

Die in diesem Kontext bereits fest etablierte Diskussionsplattform der VDI-Fachtagung „Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten“ möchte in 2018 in Esslingen durch den Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft die Themen: Strukturwandel in der Automobilindustrie und Auswirkungen auf die Gießereiindustrie, Entwicklungen im Karosseriebau und Fahrwerk sowie den Einfluss des E-Antriebs umfassend beleuchten und damit zur Beschleunigung des Technologietransfers beitragen.

Wir freuen uns auf spannende Vorträge und den Austausch mit Ihnen!

Im Namen des Programmausschusses

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, GTK - Universität Kassel und

Dipl.-Ing. Jean-Marc Ségaud, BMW AG

Goldsponsor



Innovativer Leichtbau im neuen Audi A8

Lightweight design innovations of the new Audi A8

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

AGENDA

» ASF® Evolution

» Material Toolbox

» Casting Technologies

» Summary and Outlook

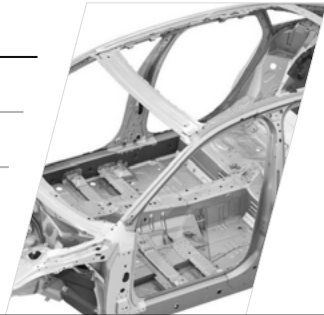
AGENDA

» **ASF® Evolution**

» **Material Toolbox**

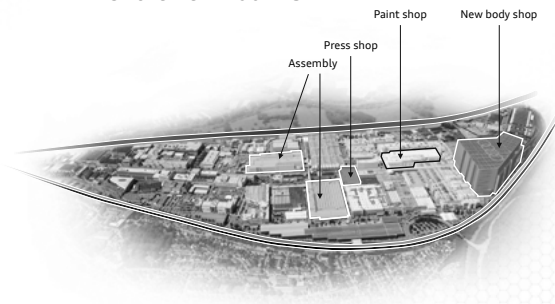
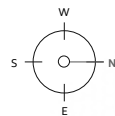
» **Casting Technologies**

» **Summary and Outlook**

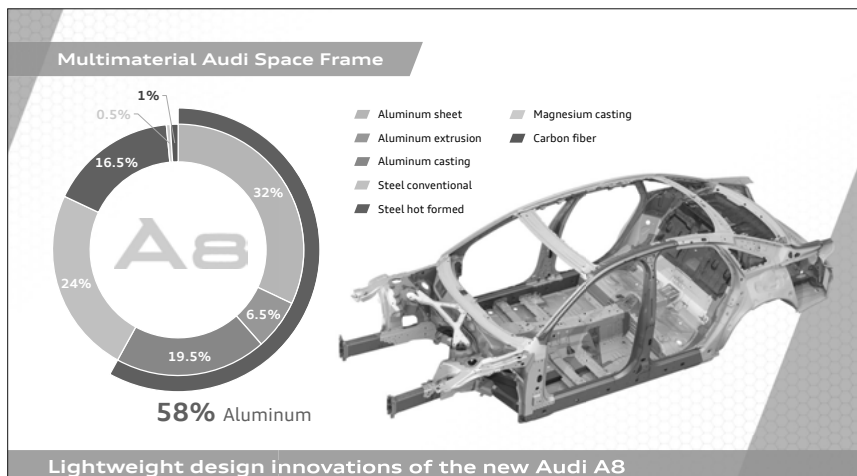
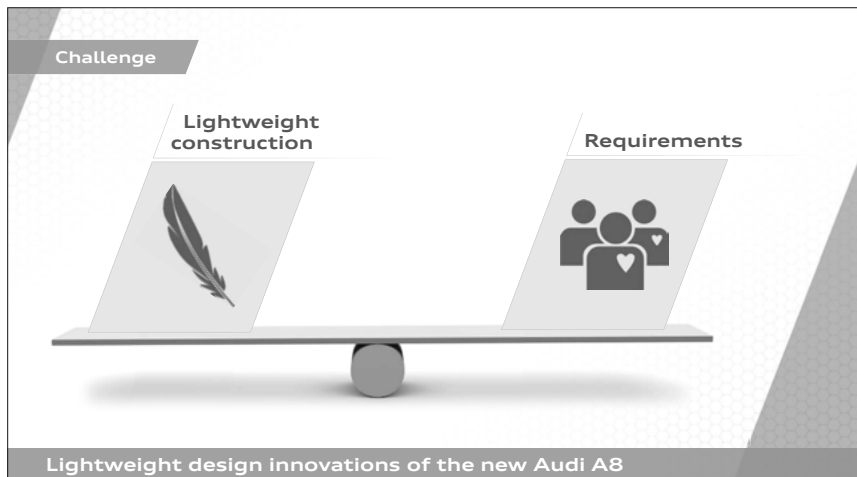


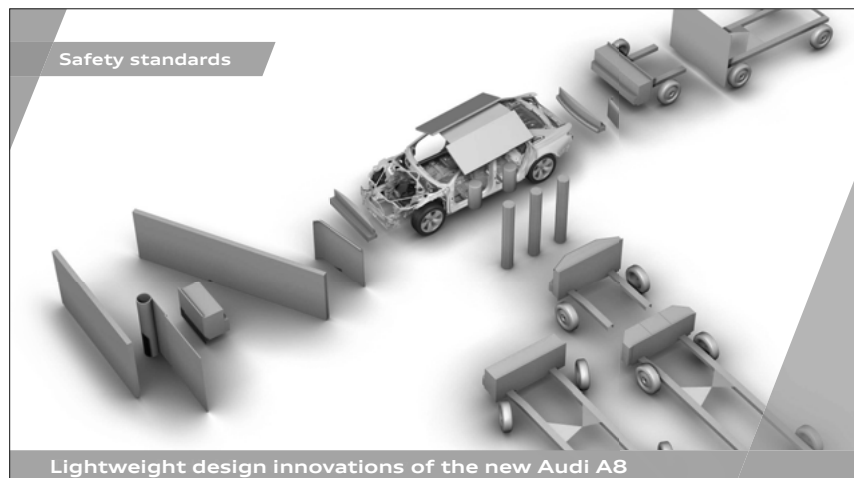
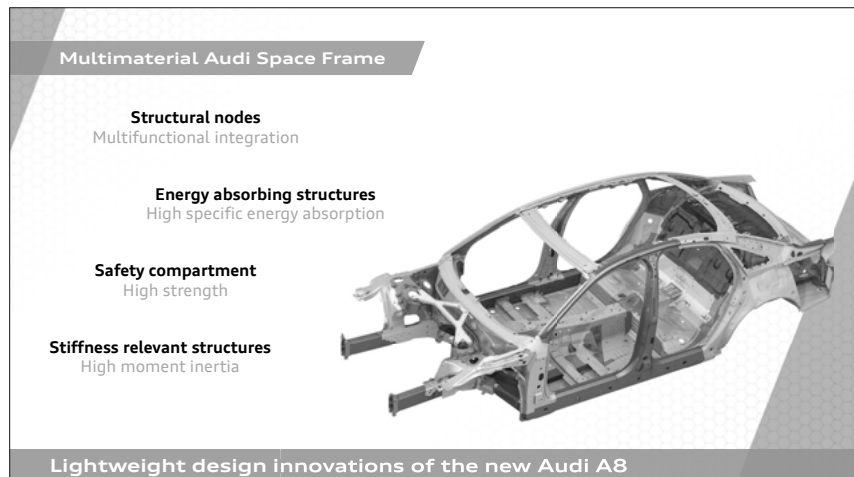
Plant Neckarsulm...

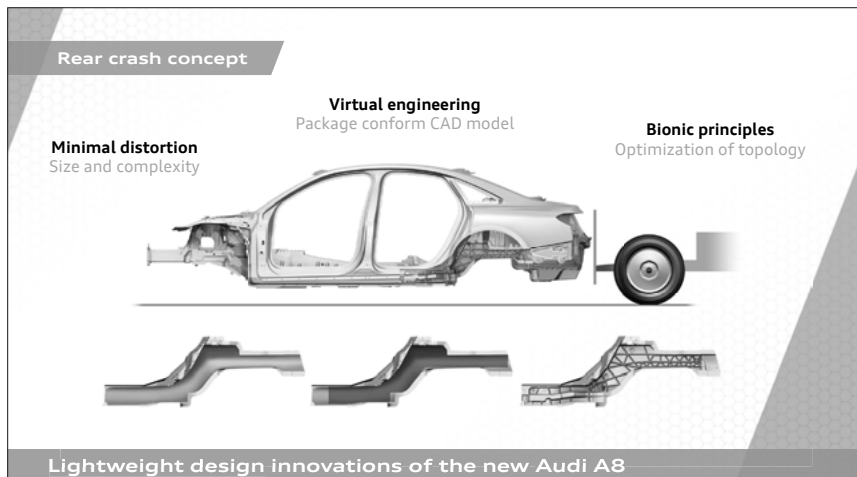
**...the production factory
of the new Audi A8**



Lightweight design innovations of the new Audi A8





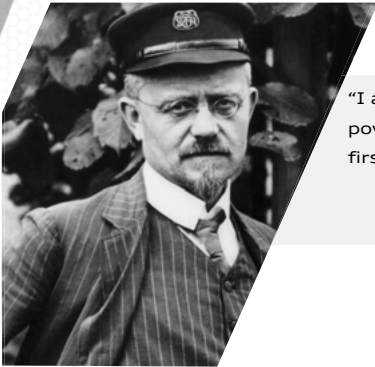


AGENDA

- » ASF® Evolution
- » Material Toolbox
- » Casting Technologies
- » Summary and Outlook



The origin of Audi

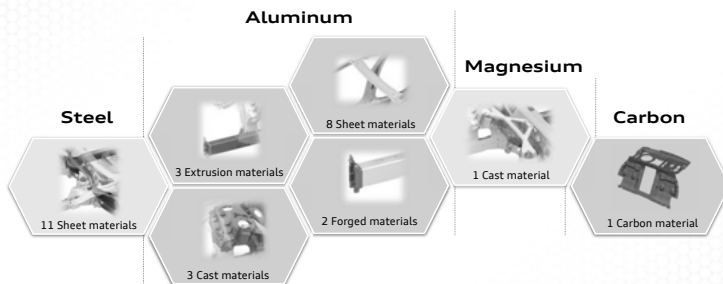


"I always endeavored to build only powerful, good cars from first-class materials."

August Horch
Automotive manufacturing pioneer and
founder of the Horch and Audi automotive companies

Lightweight design innovations of the new Audi A8

Material toolbox



29 different materials in total

Lightweight design innovations of the new Audi A8

Innovative materials and technologies

Highest-strength cast alloy

Carbon rear wall High-strength ductile sheet alloy

Highest-strength profile alloys

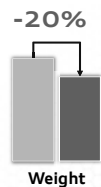
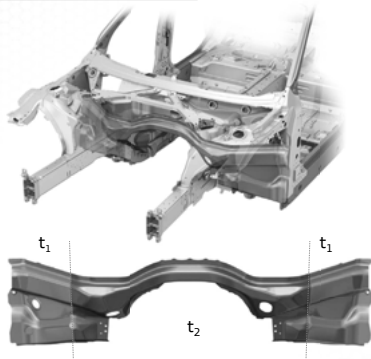
Tailor rolled blank Magnesium casting

Tailor welded blank

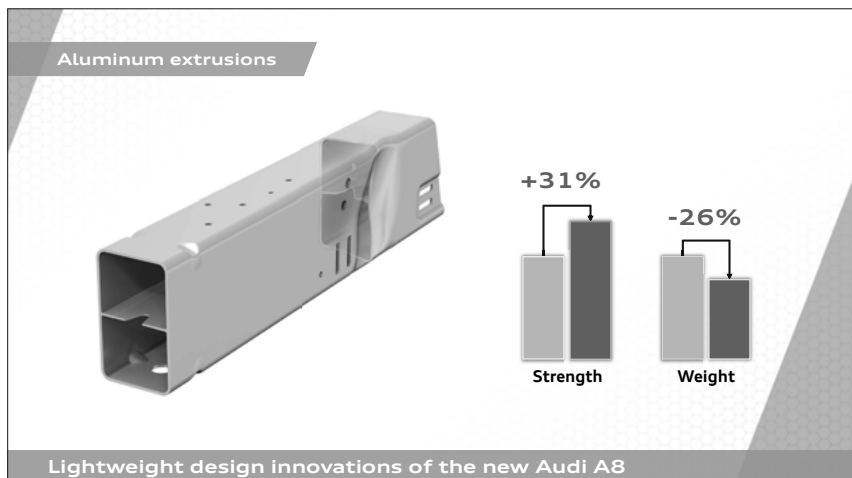
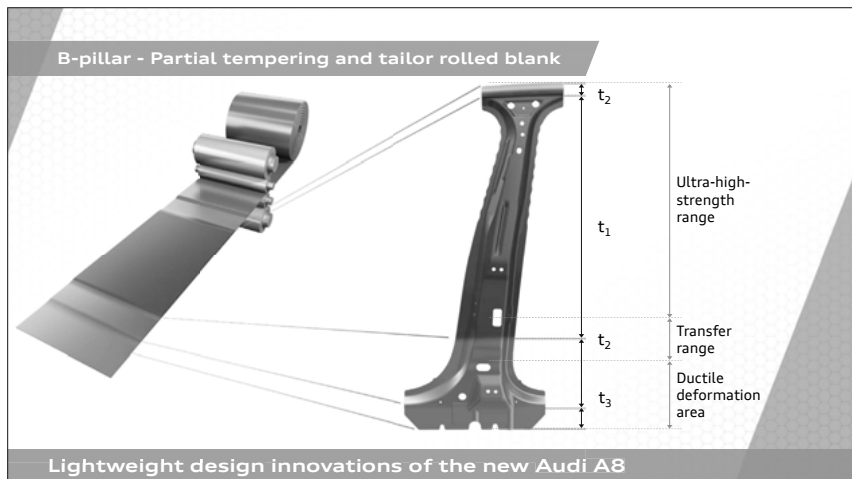


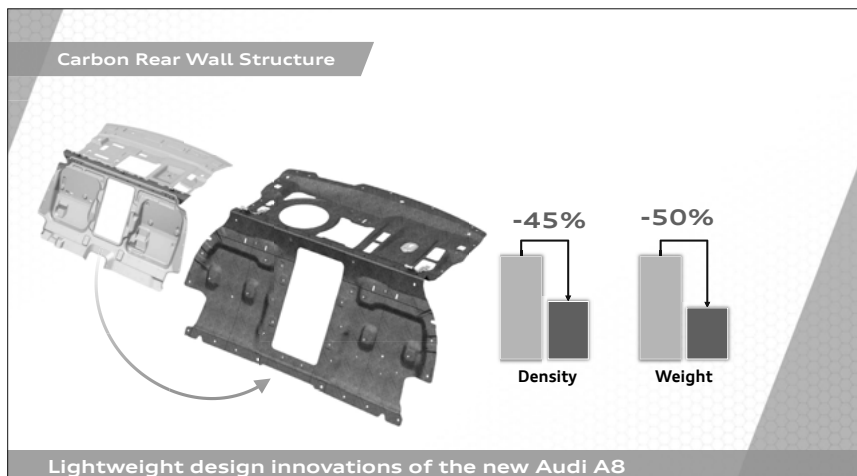
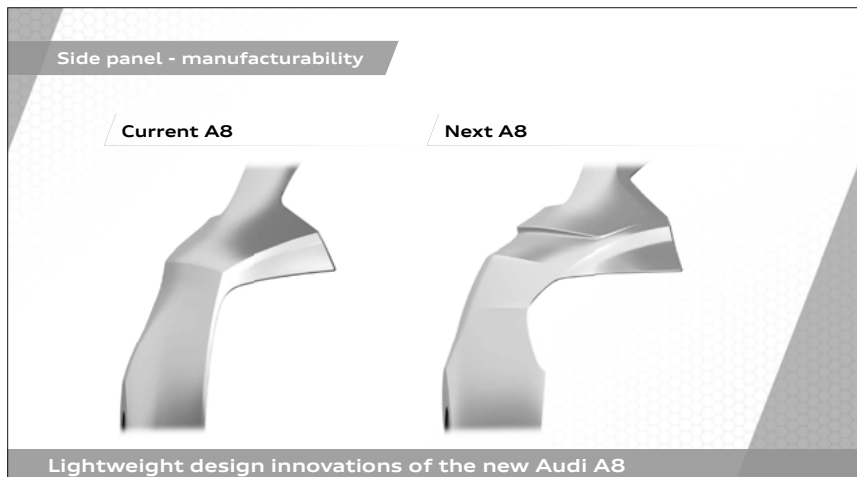
Lightweight design innovations of the new Audi A8

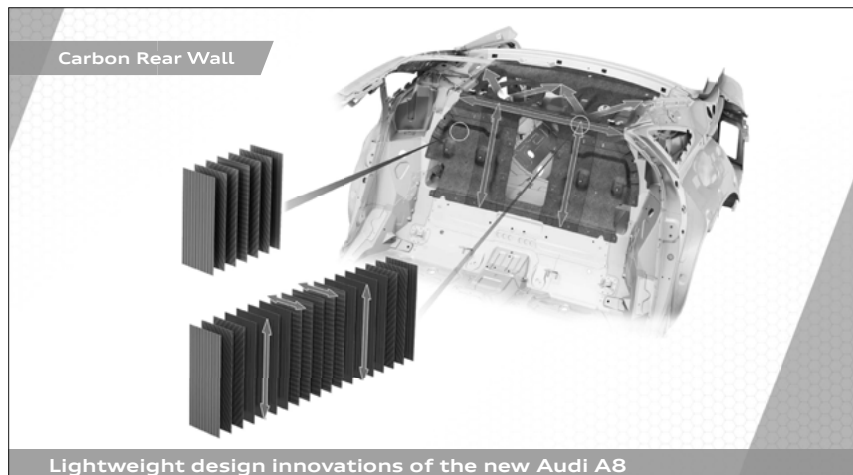
Cross member forefront



Lightweight design innovations of the new Audi A8

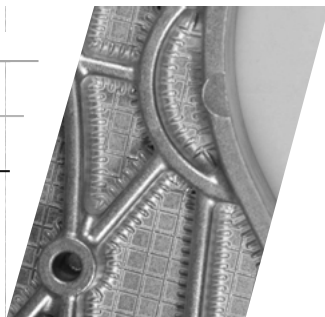




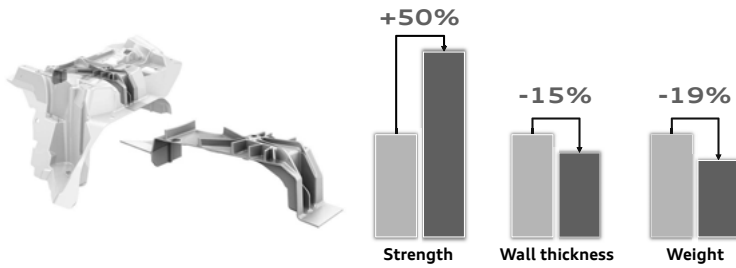


AGENDA

- » ASF® Evolution
- » Material Toolbox
- » Casting Technologies
- » Summary and Outlook

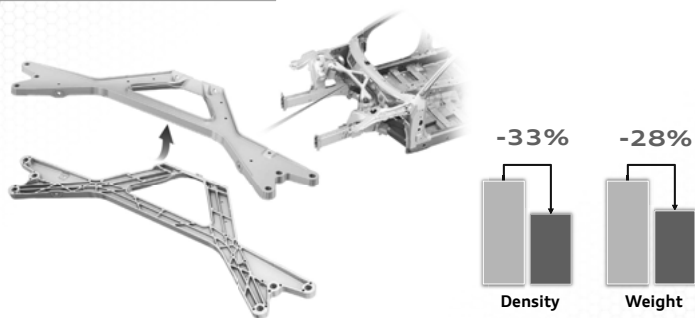


Aluminum alloy cast parts – new strength class



Lightweight design innovations of the new Audi A8

Magnesium strut brace



Lightweight design innovations of the new Audi A8

AGENDA

» ASF® Evolution

» Material Toolbox

» Casting Technologies

» Summary and Outlook



Summary: the new Audi A8

More than 1 million bodies

Audi Space Frame

4 materials for 1 body structure

Intelligent mix

New high strength materials

Light metal technologies

24% more torsional stiffness

Improved index numbers



Lightweight design innovations of the new Audi A8

Kosteneffiziente Fertigung von Strukturgussbauteilen durch optimierte Prozessplanung und Entwicklung entlang der gesamten Wertschöpfungskette

Cost efficient manufacturing on structural cast components by optimized process planning and development along the entire value stream

Dr.-Ing. **Andreas Hennings**, Dipl.-Ing. **Anton Spatzenegger**,
Nemak Europe GmbH, Frankfurt

1. Abstract

Driven by emission legislation for combustion engines and residing necessities to save on car body weight aluminum, cast components face a strong growth in „body in white“ applications. The trend for aluminum applications with structural performance characteristics is further accelerated and getting additional impulse by the need for crashworthiness proof battery housings for plug in hybrids or tray systems for future full electric vehicles. These cast components are facing direct competition on concepts, performance and cost with aluminum or steel stamping / extrusion based solutions. However, cast solutions can convince by a higher level of functional integration as well as particularly a better system accuracy in entire raw body structures.

In the manufacturing process it is crucial to have a well-balanced and controlled process chain starting from alloy selection, casting and heat treatment to possibly needed straightening tasks to fulfil load case depended requirements on mechanical properties and tight dimensional tolerances at competitive cost level. Low value creating activities such as straightening are in focus to be eliminated or at least reduced.

First important decision with significant impact on process and cost depends on the alloy selection. Based on this result it is decided whether a component needs heat treatment (HT) or the required mechanical properties can already be reached by as cast condition. In the past alloys without HT and superior properties for car body applications were either very expensive or wearing out tools rapidly. Novel alloys open up potentials to fulfill future mechanical property requirements right on specific component design without cost intensive HT.

The casting process has significant impact on mech. properties and additionally on dimensional stability. Optimized global and local temperature control systems in tooling as well as casting machine cycle effects can optimize raw part deformation and displacement in process design. With higher experience and yet higher risk to some extent also the dimensional pre-set up of tooling can pro-active balance distortion on the cast components. Simulation tools are able to identify critical areas and define counter actions.

On parts with heat treatment a high impact on dimensional stability is given by furnace parameters such as time, temperature and air flow directions / velocity as well as the quality and design of the heat treatment racks. Part growth and shrinkage with temperature curve as well as creep have to be taken into account. At Nemak in early project planning phase already simulation tools for this processes are applied to predict problematic areas and achieve better results in fulfilling required tolerances on the part.

Straightening of deformed parts is not value creating, but „quality cost“ as corrective matter. It is cost intense and furthermore it requires high project specific investment. With an adapted process design in casting and heat treatment the straightening efforts can be minimized and in best case even be eliminated. If straightening is necessary the challenge is based on an early phase decision making process regarding a straightening concept. Sometimes the equipment manufacturing lead time requires concept release even before gaining first practical experience on the part. The level of automation for concept decision is triggered by part complexity and program volume.

This paper presents best practice examples in operation along our value chain at Nemak and how the competitiveness of the lightweight solution can be further enhanced.

1. Leichtbaulösungen aus Aluminium für Fahrzeugstruktur und Elektro-Mobilität

Nemak als Entwickler und Lieferant für Leichtbaulösungen in Aluminium

Als Tier 1 Lieferant von innovativen Al-Leichtbaulösungen ist Nemak weltweit ein wichtiger Entwicklungspartner und Zulieferer vor allem im klassischen Powertrain Bereich, speziell für Zylinderköpfe, Motorblöcke und Getriebegehäuse. Jüngere wichtige Wachstumsbereiche für Nemak sind „Vehicle Structures“ mit dem Fokus auf Aluminium Strukturgussbauteile und „E-Mobility Components“ mit Bauteilen wie E-Wandlergehäusen, Batteriegehäusen und Batterie-trägerstrukturen sowie weiteren Komponenten in der Elektromobilität (**Bild 1**).

Nemak entwickelt und fertigt komplexe Aluminium Bauteile in allen gängigen Gussverfahren wie Druckguss, Niederdruck- und Kokillenguss, Kernpaketverfahren und Sandguss und zeichnet sich durch ein hohes Maß an Legierungs- und Wärmebehandlungskompetenz sowie in den nachfolgenden Bearbeitungsprozessen aus. Um von kurzen Logistik- und Qualitätsketten zu profitieren investiert das Unternehmen dabei strategisch in den Ländern, in welchen die OEM-Kunden Fahrzeuge bauen. Seit 1979 wuchs das mexikanische Unternehmen kontinuierlich zum weltweit größten Lieferanten für Aluminiumguss mit heute mehr als 23.000 Mitarbeitern. Nemak ist in 16 Ländern mit 38 Fertigungswerken präsent (**Bild 2**). Angetrieben durch starkes Wachstum bei Strukturgusskomponenten wurden seit 2015 vor allem der Standort Bielsko-Biala, Polen erweitert und neue Druckguss-Werke in Monterrey, Mexiko und Ziar nad Hronom, Slowakei sowie ein Standort für Gussnachbearbeitungsprozesse in Pilsting, Deutschland errichtet und in Betrieb genommen.

Wandel im Markt für Strukturguss und Batterieanwendungen sowie neue Anforderungen an die Bauteillieferanten

Aluminium Strukturgussbauteile erfahren im Karosseriebau durch die Emissionsgesetzgebung für Verbrennungsmotoren und die damit verbundenen Ziele zur Gewichtsoptimierung derzeit ein starkes Wachstum. Bei Bauteilen wie Federbeinaufnahmen bieten sich direkte Kostenvorteile gegenüber geschweißten Blechlösungen. Beschleunigung und zusätzliche Impulse in der Anzahl an Anwendungen erhält Aluminiumguss mit strukturellen Funktionsmerkmalen durch crashrelevante Batteriegehäuse für Plug-In Hybride oder den Bedarf an Trägersystemen für zukünftig vermehrt vollelektrische Fahrzeuge. Dabei stehen die Gussbauteile im direkten Kosten- und Eigenschaftswettbewerb mit geschweißten Blech- / Profillösungen aus Aluminium oder Stahl, überzeugen aber auch vor allem durch höhere Funktionsintegration im Bauteil und teilweise verbesserte Systemmaßgenauigkeit im Karosseriebau. Vermehrt wird auch ein frühzeitiges Mitentwickeln der Bauteile durch den Gusspezialisten durch Kunden vor allem im nordamerikanischen Markt gewünscht. Mit zunehmendem Mischbau (Multi-Material-Design) und Fahrzeug-Modellvarianten steigt ebenfalls die Nachfrage der OEM nach extern vormontierten Baugruppen (Modulen), mit welchen Tier 1 Lieferanten örtlich und zeitlich (JIS Logistik) nah die Fahrzeugwerke beliefern sollen. Bei Modulen oder gebauten Batterieträgersystemen ist eine intensive Beschäftigung mit den notwendigen Fügeverfahren und Anbauteilen (Modul-Montagekompetenz) notwendig. Batteriesysteme fordern den strukturgusserfahrenen Gießer bezüglich weiterer sicherheitsrelevanter Bauteilspezifikationen die aus Thermomanagement, Druckdichtigkeitsanforderungen und Elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) heraus.

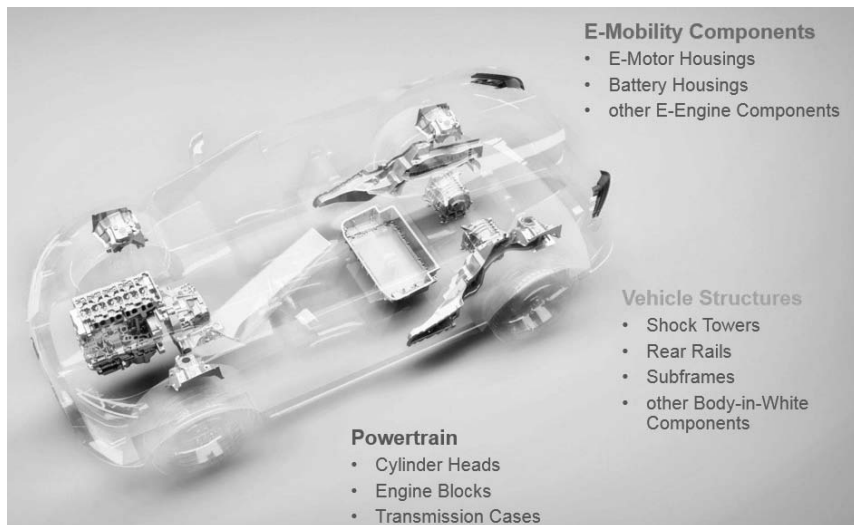


Bild 1: Nemak entwickelt innovative Leichtbaulösungen für Powertrain, E-Mobilität und Karosserie-Strukturen.



Bild 2: Nemak produziert global in 16 Ländern an 38 Fertigungsstandorten.

2. Vorteile von Al-Guss in der Struktur von Leichtbau-Lösungen

In den letzten Jahren haben sich Automobilkonzepte stark bezüglich ihrer Materialanwendungen gewandelt. Ausgehend von reinem Stahl- oder Aluminiumbau über Composite oder hybride Lösungen etabliert sich in modernen Leichtbaukonzepten stärker eine wirtschaftlich optimierte Multi-Material-Design (MMD) Herangehensweise. MMD beschreibt die Anwendung des optimalen Werkstoffs im Fahrzeug-Bauteil entsprechend der dynamischen Lastpfade und Funktionen in der Fahrzeugstruktur. Nach einem hohen Wachstum von Aluminium-Leichtbaulösungen im Antriebsstrang erfährt der Werkstoff Aluminium starkes Wachstum in strukturellen Anwendungen.

Fünf Hauptaspekte, deren erste vier konstruktiver Natur, bestimmen wo optimale Anwendungsbedingungen für Aluminium Gussbauteile im Fahrzeug vorliegen:

- Automobilkonzept z. B. Aluminium intensives Leichtbaukonzept, MMD Konzept
- Fahrzeugbereich und Anwendung: a) Fahrzeugstrukturteile (BiW) wie Federbeinaufnahme, Längsträger, u. a. oder Batterieträger /-gehäuse b) Chassis Komponenten wie Hilfsrahmen oder c) Antriebskomponenten wie Motorblock, Zylinderkopf
- Lokal wirkende Lasten in der Komponente und Funktion, wie z. B. statischer, dynamischer und Ermüdungsfestigkeit, Steifigkeit und Crash Verhalten
- Funktionelle Integration: mehr Funktion im Teil, weniger Bauteile und Fügepunkte
- Fahrzeugsegment (aktuell Premium bis Mittelklasse) und Volumeneffekte (Plattformstrategie und Jahresbedarfe)

In einer konstruktiven Betrachtung haben Aluminium und Stahl *dichtenormiert* ähnliche spezifische statische Festigkeitswerte (d. h. gleichwertig sofern Bauraum vorhanden). Die *spezifische* Steifigkeit von Stahl ist in vergleichbarer Dimension wie Aluminium.

Die Stärke von Aluminium kommt durch eine deutlich höhere spezifische Energie Absorption im Crash Fall zu tragen, was den Werkstoff in Zonen gezielter Verformung zum Insassenschutz oder in Knotenpunkten der Karosseriestruktur bevorteilt. Gegenüber Carbon Faserverstärktem Kunststoff (CFK) besitzt Aluminium neben besserer Kostenbasis eine deutlich bessere strukturelle multiaxiale Integrität aufgrund isotroper Eigenschaften im frei wählbaren Aufbau des Laminates (**Bild 3**).



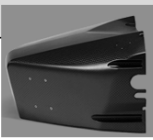
Material properties	Steel	Aluminum	CFK
	 <ul style="list-style-type: none"> ➔ Energy absorption due to local buckling ➔ Structural integrity at the same time 	 <ul style="list-style-type: none"> ➔ Energy absorption due to local buckling ➔ Structural integrity at the same time 	 <ul style="list-style-type: none"> ➔ Energy absorption due to progressive crushing ➔ Structural integrity or Energy absorption
Costs [€/Kg]	1	3	25
Density [kg/dm ³]	7,8	2,7	1,5
Spec. energy absorption [kJ/kg]	33	50	Crushing 250
Static strength [N/mm ²]	350 - 1650	200 - 500	500 - 1700
Stiffness [N/mm ²]	210000	72000	125000

Bild 3: Materialeigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe, Quellen der Internet-Fotos: ThyssenKrupp (Hoch-Mn Stahl), AUDI AG (Aluminium), KTM (CFK Monocoque)

Nemak Front Car Body Concept Highly Innovative Components & Technologies



- Multi-Process Solution
- Multi-Material
 - Aluminum, Steel, Magnesium, Plastics
- CAD & CAE Design
 - Static strength, Stiffness & Crashworthiness
- Manufacturing Technologies
 - Casting, Sheet Metal Forming, Extrusion
- Assembly & Joining Technologies
 - Thermal & Non-thermal joining technologies
- Testing & Validation
 - Material, Coupon and System testing

Bild 4: Nemak Konzeptstudie einer Vorderwagenstruktur basierend auf einem realen Fahrzeug und innovativem AI-Guss intensiven Hybrid- und MMD Design inklusive einer Lastfall Auslegung gemäß gängiger Sicherheitsanforderungen

Nemak als globaler Partner der Automobilhersteller im Bereich Gießen von Aluminium erweitert sukzessive die Kompetenzfelder ausgehend von der Prozesskompetenz weiter in Richtung Leichtbau, welcher sich bei Nemak auf drei wesentliche Säulen gründet um die gesamte Produktentwicklungskette als Tier 1 für innovative Leichtbaulösungen für die OEM-Kunden abbilden zu können:

- Materialleichtbau unter Berücksichtigung von Multimaterial- & Hybridansätzen sowie deren Materialentwicklung nicht nur für Aluminium
- Konstruktiver Leichtbau unter Berücksichtigung der gängigen Werkzeuge zur Erstellung innovativer Konzepte, Konstruktionen und Berechnungen unter Verwendung von CAD und CAE Ressourcen.
- neben der aktuellen Kernkompetenz des Gießens von Aluminium erfolgt auch die Integration von Fertigungskomponenten aus Blechumformung und Extrusionsverfahren inklusive der Aufgabe eines Zusammenbaus welche das Toleranzmanagement und die Fügetechnologien beinhalten.

Auf Basis dieses Leichtbauansatzes wurde ein Vorderwagen zur Erstellung eines ersten Demonstrators ausgewählt (**Bild 4**), welcher als Ziel optimierter Lösungen hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Anforderungen darstellen soll. Diese Leichtbaustudie zeigt das Potential in den gängigen Kompetenzfeldern Werkstoff, Konstruktion und Fertigung welche die von der Werkstoffkombination abhängigen Fügeverfahren inkludiert.

Ausgehend von einer reinen Stahllösung wurden zwei verschiedene Konzeptlösungen mit Fokus auf die A-Säule für einen Vorderwagen entwickelt. Bei der Materialauswahl wurde eine Multimaterial- und Hybridbetrachtung herangezogen, welche das richtige Material an der richtigen Stelle unter Berücksichtigung der Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen für die unterschiedlichen Teilbereiche des Vorderwagens festlegt. Unter Berücksichtigung der aktuell standardisierten Sicherheitsanforderungen wie Steifigkeit und Energieabsorptionsfähigkeit, wurde die Konstruktionen und Berechnung des Vorderwagens durch Einbindung in das Gesamtfahrzeug durchgeführt. Durch das gezielte Anwenden unserer Gießkompetenz gelingt es an diversen Stellen die für die optimale Fügeverfahren, z.B. durch Eingießen von Metallstreifen, notwendige Schnittstellen herzustellen.

Zum einen erzielten die konsequente Anwendung des Leichtbauansatzes eine Gewichtsreduktion zum Referenzvorderwagens aus Stahl von 22% und steigert gleichzeitig die Crashperformance insbesondere für den kritischen „small overlap“ Lastfall.

3. Kosteneffiziente Fertigung von Strukturgussbauteilen durch optimierte Prozessplanung und Entwicklung entlang der Wertschöpfungskette

Ist eine Entscheidung für den Werkstoff Aluminium und Guss getroffen, stellt die vorgeschaltete Legierungswahl eine erste Weichenstellung für Prozess und Bauteil-Kosten dar. Typische heutige Bauteilanforderungen deutscher OEM sind für crashrelevante Anforderungen: Zugfestigkeit >180 MPa, Streckgrenze 110-160 MPa, >10% Gleichmaßdehnung bzw. Erfüllung von Fügbarkeit im Stanznieten. Für festigkeitsrelevante Al-Gussbauteile liegen Anforderungen bei $R_m > 215 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} 150 - 180 \text{ MPa}$ und $A_5 > 7\%$. Wunsch der Konstrukteure wäre es, mit Al-Guss-Legierungen prozesssicher deutlich verbesserte mechanische Kennwerte zu erzielen ähnlich der von Al-Knetlegierungen oder Al-Extrusionsprofilen. Dies würde Al-Guss in der Wettbewerbsfähigkeit gegen Stahl deutlich stärken. Bei der Validierung neuer Gusslegierungen haben die Gießeigenschaften wie Fließvermögen, Wanddickenabhängigkeit, Klebneigung Formverschleiß, Möglichkeit des kalten (Kleben) oder heißen Fügens (Schweißen) Einfluss auf Bewertung eines möglichen Einsatzes in der Praxis.

Über die Auswahl der am Markt verfügbaren Aluminium-Gusslegierung lässt sich steuern, ob eine Wärmebehandlung (WBH) erforderlich wird oder die mechanischen Zieleigenschaften schon im Gusszustand erreicht werden können. In der Vergangenheit waren „Legierungen ohne WBH“ für Karosserieanwendungen mit guten mechanischen Eigenschaften entweder sehr teuer oder Werkzeug strapazierend. Hier gibt es neue Legierungsentwicklungen, die das ggf. Potenzial haben, ohne die kostenintensive WBH die spezifischen Zielerfordernisse zu erfüllen. Die Legierungen müssen aber noch umfassend in der Praxis validiert werden, bevor sie sich etablieren können.

In der Bauteilfertigung kommt einer gut kontrollierten und aufeinander abgestimmten Prozesskette von Legierungsauswahl, Gießen, Wärmebehandlung und ggf. notwendiger Richtprozesse zentrale Bedeutung zu, um aus dem Lastfall geforderte Werkstoffkennwerte und maßlich enge Toleranzen im Bauteil für den Verbau bei verträglichen Kosten zu realisieren. Wenig wertschöpfende Prozessschritte, wie das Richten der Gusskomponenten gilt es zu eliminieren oder wenigstens zu minimieren.

Als Beispiel auf Prozesskette und Kosten sei im Folgenden das Erreichen der Maßgenauigkeit der Bauteile gemäß Bauteilanforderung und das Ziel einer Minimierung vom Bauteilverzug und notwendigem Richten exemplarisch angeführt. Nemak unternimmt zu diesem Themenkomplex intensive Untersuchungen in Entwicklungsprojekten und im Rahmen der Prozessplanung in Kundenprojekten.

Der Gießprozess hat bereits großen Einfluss auf die Maßtreue der Bauteile über Temperierung in Gussteil und Form, Gießzyklus und Formauslegung. Bauteilverzug kann gezielt über eine gesteuerte lokale Temperaturführung entgegen gewirkt werden. Hier kann sich eine etwas spätere Ausformzeit positiv gegen den Verzug auswirken und später minimierten Richtaufwand bewirken. Weiterhin ist eine verbesserte Maßhaltigkeit über eine vorab-Kompensation durch angepasste Werkzeugmaße denkbar, allerdings mit größeren Risiken behaftet. Hierbei müssen Ausformschrägen und Schrumpfmaß genau verstanden sein, weshalb sich dies nur in Ausnahmefällen und eher bei Folgewerkzeugen (mit dann ebenfalls notwendiger Anpassung des Richtprozess) empfiehlt. Untersuchungen von Nemak zeigen das bei normal touchierten Stanz- und Entgratwerkzeugen die Auswirkung des Stanzentgratens auf das maßliche Bauteilverhalten recht neutral ist, solange dabei keinen Eigenspannungen frei werden. Hier wäre bei rechtzeitiger Erkenntnis über das Bauteilverhalten nach Ausformen aber über eine clevere Auslegung des Stanzwerkzeugs ein lokales Vorrichten ggf. möglich. Simulationswerkzeuge bieten hier Unterstützung um kritische Bereiche zu identifizieren und Abhilfemaßnahmen bereits im Vorfeld zu definieren.

(Bild 5) zeigt exemplarisch anhand von 3D-optisch gescannten Bauteilen eines Längsträgers die Einflüsse der Prozessschritte von Guss auf die Bauteildeformation, über Stanzen und Lösungsglügen und Abschrecken und nach dem automatischen Richten anhand eines Längsträgers. Die Ergebnisse decken sich lokal qualitativ recht gut mit Simulationsergebnissen für Guss und Wärmebehandlung wie sie z. B. mit Magmasoft **(Bild 6)**.

Bei Bauteilen mit folgender Wärmebehandlung lässt sich durch eine gezielte Einstellung der Ofenparameter wie Zeit, Temperatur und Luftführung sowie über die Qualität und das Design der Wärmebehandlungsgestelle ein erheblicher Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Bauteile nehmen. Bauteilwachstum und Schrumpfen mit der Temperatur und Kriechvorgängen.

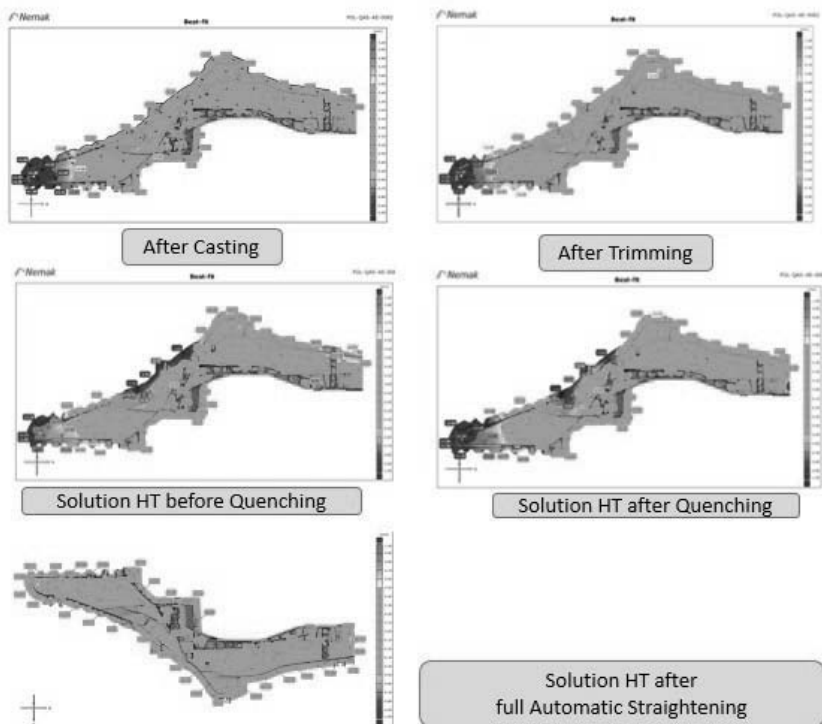


Bild 5: Einfluss unterschiedlicher Prozessschritte auf die Maßhaltigkeit anhand des Beispiels einen Längsträgers. Ein gewisser Grundverzug resultiert aus dem Guss, die Stanzentgratung ist weitgehend neutral, während das Lösungsglühen einen starken, das Luft-Abschrecken einen untergeordneten Einfluss auf das Bauteilverhalten hat. Nach dem vollautomatischen Richten ist der Längsträger innerhalb der Toleranz der Bauteilanforderung.

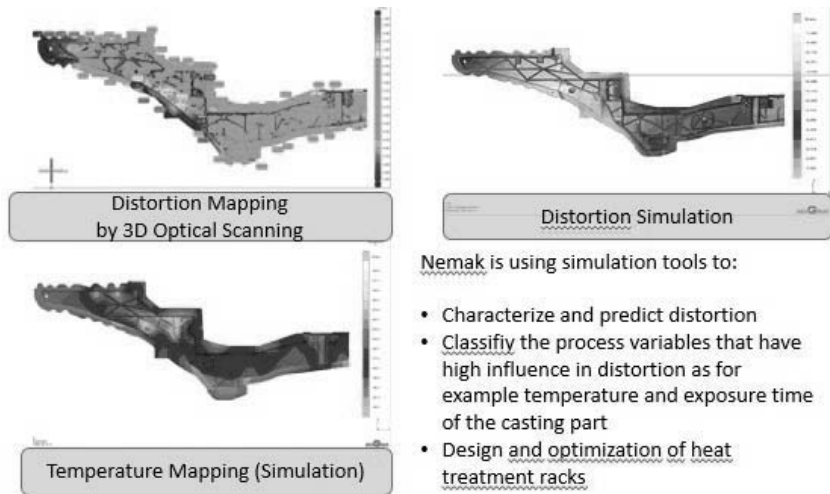


Bild 6: Numerische Simulation ermöglicht eine Verkürzung und frühzeitige Prozessplanung. Der Abgleich zwischen Simulationsergebnis und Validierungen am realen Bauteil korreliert im Allgemeinen mit gewissen quantitativen Einschränkungen qualitativ sehr gut.

muss Rechnung getragen werden. Auch hier trägt bei Nemak eine frühzeitige Prozesssimulation in der Prozessplanungsphase erheblich dazu bei, um ein besseres Endergebnis zur Erfüllung der geforderten Toleranzen im Bauteil zu erzielen

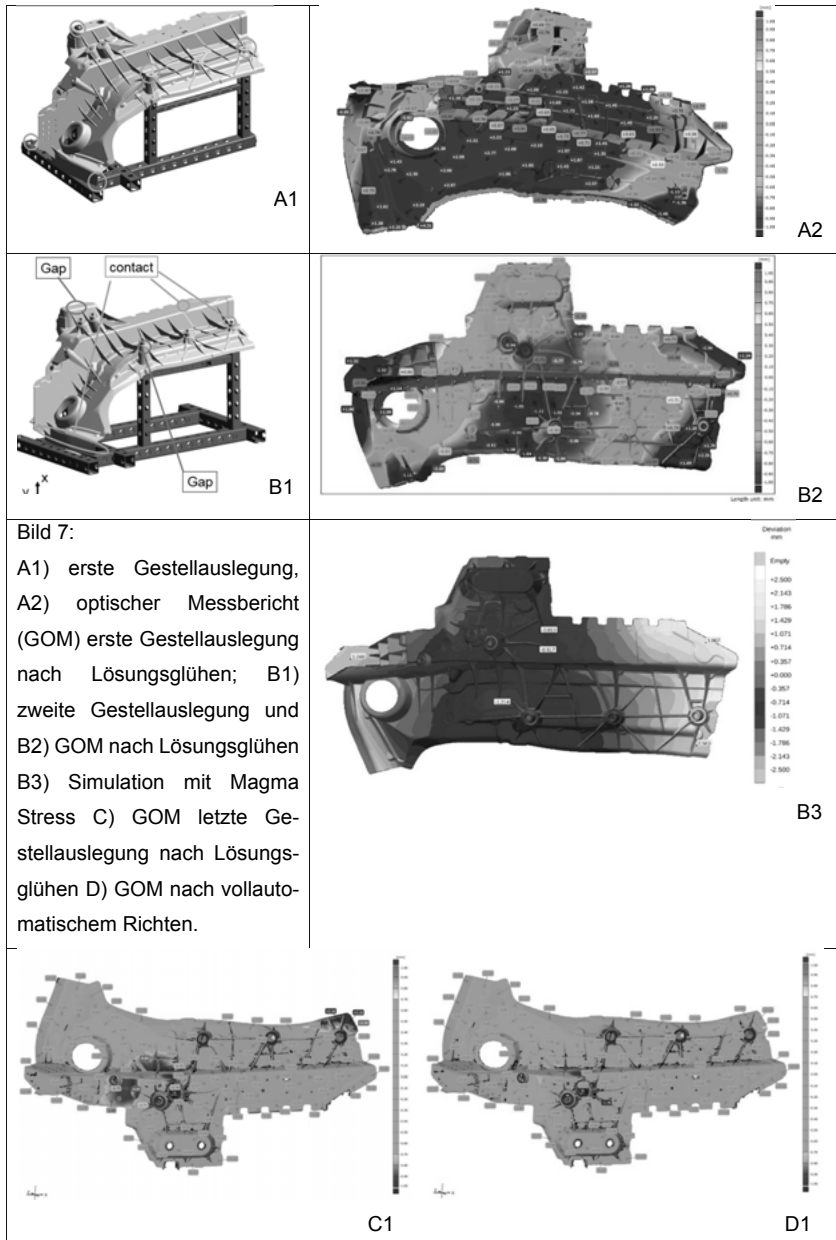
Für die Prozessentwicklung im Rahmen der Produktionsbefähigung einer Gehängeaufnahme für eine SUV Plattform PL73 (AUDI Q7 Basis) der Volkswagen Gruppe setzte Nemak erstmalig intensiv das Modul Magma Stress von Magmasoft ein. Ziel war es um zum einen zu prüfen, in wie weit sich die Software eignet um die Verformungen des Bauteils im Wärmebehandlungsprozess qualitativ und in Größenordnung quantitativ abzubilden. Durch die Simulationen können die Anzahl und benötigte Zeit der sonst händischen Optimierungsversuche zur Auslegung der Wärmebehandlungsgestelle deutlich reduziert werden.

Bild 7 zeigt exemplarisch den Fortschritt über drei Entwicklungsstufen eines Wärmebehandlungsgestells für die PL73 Gehängaufnahme ausgehend von einem ursprünglichen Gestellentwurf basierend auf Erfahrungswerten. Für die Gestellauslegung wurde berücksichtigt, dass das Bauteil im Lösungsglühen vor allem bei Temperaturen jenseits von 430°C verstärkt Kriechprozessen ausgesetzt ist die zum weichen „Durchhängen“ von Bauteilbereichen führen und das Bauteil mit dem Temperaturwechsel im Lösungsglühen und Abschrecken einem Wachsen und Schrumpfen von mehreren Millimetern unterworfen ist. Durch eine starke Verrippung im Mittelbereich der Gehängaufnahme kommt es im Bauteil lokal mittig quer zu starker Verformung („Ziehen der Rippen“) während der WBH. Zusätzlich sollte in WBH und Richten dem Wunsch des Fahrzeugwerkes nach einer lokalen Toleranzeinschränkung für einen spezifischen Flanschbereich auf $0 + <0,3$ mm Rechnung getragen werden um eine gute Anlage für das Fügen mit einem hochfesten Stahlbauteil zu gewährleisten.

Durch zwei Simulationsschleifen unterstützt konnte das Gestell im Vorserienstand bereits zügig von einem ersten Gestellkonzept (A) zielgerichtet zu einem akzeptablen Bauteilzustand vor Richten nach Lösungsglühen (B) hin weiter entwickelt werden. Simulationsergebnisse eignen sich hier qualitativ gut zur Verzugsvorhersage und sparen Zeit und Kosten für Versuche mit Mustergestellen in aufwändigen Messreihen ein. Eine bessere quantitative Übereinstimmung mit realen Versuchsteilen setzt aber einiges an Erfahrung im Setzen der Simulationsrandbedingungen voraus. Letzte Optimierungen im Versuch durch Hinzufügen weniger weiterer lokaler Stützpunkte führte zu einem Bauteilzustand nach Lösungsglühen, der im automatischen Richtprozess effizient in einem Zustand mit sehr geringen maßlichen Bauteilswankungen innerhalb Kundenvorgabe resultiert.

Richtarbeiten bei maßlich abweichenden Bauteilen sind nicht wertschöpfend sondern korrigierende „Qualitätskosten“. Richten ist kostenintensiv und teilweise auch mit hohen Investitionen verbunden. Bei guter Prozessführung in Guss und Wärmebehandlung kann das Richten jedoch auf ein Minimum reduziert oder im Idealfall sogar ggf. vermieden werden.

Sind Richtanwendungen notwendig, so muss frühzeitig im Projekt, teilweise vor ersten praktischen Erfahrungswerten am Bauteil, über das Richtkonzept und den Automatisierungsgrad in Abhängigkeit von Bauteilkomplexität und Stückzahl entschieden werden. Diese notwendige praktische Lernkurve macht es sehr schwierig aufgrund der langen Fertigungszeiten der automatischen Richt-Anlagen diese vor Serienanlauf in befähigt verfügbar zu haben



Halbautomatische Anlagen (händisches Richten / automatisiertes Vermessen) können dann als Brücke im Einzelfall einen Kompromiss im Serienhochlauf und eine spätere zusätzliche Kapazitäts-Absicherung darstellen. Bei Nemak werden komplexe torsionssteife Bauteile wie Längsträger bei hohen Stückzahlen vollautomatisch ohne zusätzliches manuelles Richten korrigiert. Einfachere Bauteile wie Federbeinaufnahmen hingegen werden zumeist händisch gerichtet und zu 100% in der Linie vor der folgenden Bearbeitung maßlich kontrolliert und dokumentiert.

Typische Toleranzanforderungen der OEM sind für funktionsrelevante Bauteilflächen wie Fügeflansche generell zwischen $\pm 0,7$ mm und $\pm 0,5$ mm definiert. Guss läßt sich aufgrund der Verrippungen im Verbau beim OEM im Vergleich zu Blech wenig „zurechtbiegen“ weshalb Guss helfen kann die Maßgenauigkeit von Baugruppen im Karosseriebau gegenüber Lösungen ohne Guss zu stabilisieren. Dafür ist aber eine konstante prozesssichere Beherrschung der Toleranzen Bedingung. Vereinzelt werden aus den Fahrzeugwerken Wünsche nach lokal oder generell weiter eingeschränkten Maßtoleranzen für Guss laut. Ursache der Forderung sind hier meist Toleranzkettenabschätzungen insbesondere bei Verbau mit größeren Extrusionsprofilen, die sich beim Herstellprozess bereits erheblich verziehen (recht weite Toleranzen gem. DIN-ISO) und schwer oder nicht zu richten sind oder durch schwer formbare hoch feste Stähle als Fügepartner an die sich Gussflansche möglichst prozesssicher annähern müssen. Letztendlich muss hier eine Abstimmung zwischen Guss, Profil und Fügeverfahren gefunden werden, bei der die allgemein gültigen DIN Toleranzen für alle einschränkt werden um zu tragfähigen Gesamtlösungen für den Zusammenbau zu kommen. Hier müssen Gusslieferant und Entwicklung und Karosserie Rohbau des OEM Kunden frühzeitig im Produktentstehungsprozess eng zusammen arbeiten.

Toleranzeinschränkungen gehen dann einher mit deutlich erhöhtem manuellen Aufwand im Richten des Gusses, bis an Grenzen dessen was technisch reproduzierbar ist. Werden Toleranzen von z. B. $\pm 0,3$ mm dem Bauteil abgefordert, hat dies zur Folge, dass die Richtprozesstechnik Toleranzen von $\pm 0,15$ mm statistisch absichern muss, was Fragen der Messmittelfähigkeit in der Produktion aufwirft bzw. hohe Kosten verursacht. Lokal wo solche Toleranzeinschränkungen zum Beispiel durch eine Fügeverbindung zwischen einem Al-Gussteil mit einem hoch festen Stahl verständlicher Wunsch sind, wurden Sonderlösungen jedoch auch bei Nemak schon umgesetzt.

5. Fazit

Aluminium Strukturgussbauteile erfahren im Karosseriebau durch die Emissionsgesetzgebung für Verbrennungsmotoren und die damit verbundenen Ziele zur Gewichtsoptimierung weiterhin ein starkes Wachstum. Beschleunigung und zusätzliche Impulse in der Anzahl an Anwendungen erhält Aluminiumguss mit strukturellen Funktionsmerkmalen durch crashrelevante Batteriegehäuse für Plug-In Hybride oder den Bedarf an Trägersystemen für zukünftig vermehrt vollelektrische Fahrzeuge. Dabei stehen die Gussbauteile im direkten Kosten- und Eigenschaftswettbewerb mit geschweißten Blech- / Profillösungen aus Aluminium oder Stahl, überzeugen aber auch vor allem durch höhere Funktionsintegration im Bauteil und teilweise verbesserte Systemmaßgenauigkeit im Karosseriebau. Ein Al-Guss intensiver Mischbau fordert dem Gießer zukünftig verstärkt eine Beschäftigung und Kompetenzaufbau bezüglich anderer umgeformter oder extrudierter Materialien sowie Fügetechnik ab, um die Gussteile erfolgreich in den Markt zu bringen.

Um zukünftig eigenschaftsoptimierte und kosteneffektive innovative Leichtbau-Systemlösungen für Fahrzeug Struktur und Elektro-Mobilität mitgestalten und anbieten zu können, stärkt Nemak den Bereich in der Leichtbaukompetenz und Produktentwicklung um partnerschaftlich mit den Kunden neue Konzepte zu entwickeln und sie zu befähigen.

Nemak setzt in der Prozess-Entwicklung von Aluminium Strukturgussteilen konsequent frühzeitig und vorausschauend Simulationswerkzeuge ein und beschleunigt damit einen effizienten Entwicklungsprozess. In Kombination mit gut geplanten Validierungsversuchen in der Entwicklungsphase können Zusammenhänge und Interaktionen zwischen Prozessschritten so transparent und verständlich ermittelt werden. Prozessfenster können dann frühzeitig stabilisiert werden und damit die Risiken bei der Serienanlauf verringert werden und des Weiteren eine robuste Bauteilqualität in der Serie garantiert werden.

Simulation von Gießprozessen für robuste und optimierte Gussteile mit maßgefertigten Eigenschaften

Casting Process Simulation for Robust and Optimized Castings with Tailored Properties

Laura Leineweber, M.Sc., Dr.-Ing. Horst Bramann,
MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Abstract

Innovative product development methodologies like manufacturing process simulation are key technologies for innovative, functional and efficient designs in various fields of application.

Local properties of cast components, such as microstructures and resulting mechanical properties, are influenced by multiple process and design-inherent variations of metal flow, solidification, cooling conditions and chemical composition. This results in discrepancies between the desired component properties and those obtained by the later series castings. The virtual evaluation of design changes and production variations enables the designer and casting user to assess local casting properties such as residual stresses, microstructure, defect locations and severity and also dimensional accuracy of the casting component during production.

In this regard, the use of systematic casting process simulation is a logical extension of the virtual product and process development chain. It allows the part designer to assess and evaluate critical process-driven design issues before cost-intensive development steps such as tool manufacturing are initiated. The methodology of virtual DoE and Autonomous Engineering of cast components and processes enables the developer to establish robust designs in terms of functional and manufacturing performance prior to the start of production without the need to wait for costly experimental trials.

This results in early-stage secured decisions for the optimal product design and the ideal production process in terms of quality, costs and repeatability. In particular the evaluation of robustness requires extensive product and process knowledge at the very beginning of the development phase.

This presentation describes a methodological engineering approach using casting process simulation in order to achieve robust cast components and manufacturing routes. For the work, a fictitious automotive structural chassis component is inversely analyzed with regard to the usability and benefits of casting process simulation at different stages of the product development phase, beginning from the final product design back to the first functional draft model.

1. Einleitung

Die Entwicklung eines optimalen Fertigungsprozesses im Druckguss, hinsichtlich der Eigenschaften des Gussbauteils, der Wirtschaftlichkeit und der Robustheit, erfordert ein verlässliches Produkt- und Prozesswissen in frühen Phasen, insbesondere im Hinblick auf die erheblichen Investitionen in Fertigungsanlagen und in Werkzeuge.

Die Gießprozesssimulation bietet die Möglichkeit eines robusten Bauteil- und Prozessdesigns bei gleichzeitiger Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, z.B. durch die Reduzierung von Rücklaufmaterial. Ursachen von Produktionsproblemen können identifiziert und zielgerichtete Optimierungen eingeleitet werden. Sowohl Kunden als auch Qualitätsmanagement verlangen zunehmend eine frühzeitige Berücksichtigung von Kosten, Qualität und Ertrag [1]. Je früher die Simulation im Produktentwicklungsprozess eingesetzt wird, desto weniger Änderungen treten in späten Projektphasen auf. Dies vermeidet hohe Aufwände und Kosten für Änderungen und verkürzt die Entwicklungszeit.

2. Produktentwicklung

Die Konzeptphase eines Produktes hat den größten Einfluss auf die Kosten und die Qualität der Lösung. In kürzester Zeit müssen viele Informationen verarbeitet und in gesicherte Entscheidungen umgewandelt werden. Aus diesem Grund sind die Planungskosten dort sehr hoch, während gleichzeitig der Raum für Änderungen oder Alternativen noch am größten ist. In dieser Phase kommt das Frontloading ins Spiel. Frontloading beinhaltet eine frühere Verwendung verbesserter Methoden, Prozesse und IT-Lösungen in der Produktionsentwicklung, gerade in der Phase, in der die größten Auswirkungen auf die Produktkosten erzielt werden [3].

Dies erweitert das Produktwissen und führt zu folgenden Vorteilen [2]:

- Frühzeitige Bereitstellung von Fachwissen
- Generierung von Wissen und Entscheidungshilfe durch Simulation
- Feedback aus dem Produktlebenszyklus

3. LEAN Entwicklung und digitaler Zwilling

Dem LEAN-Gedanken liegt die Vermeidung von Verschwendung und Ineffizienz bei der Fertigung durch Identifikation der Ursachen von Ausschuss und Risiken und deren Beseitigung zu Grunde. Die LEAN-Methodik definiert acht allgemeine Arten der Verschwendung. Neben Transport, Inventar, Bewegung und Warten gibt es:

1. Überproduktion - mehr Material als nötig verwenden

2. Überarbeitung - engere Toleranzen oder höherwertige Materialien als notwendig
3. Mängel - Nachbesserung, Ausschuss, falsche Dokumentation
4. Leistung - Unterausnutzungsmöglichkeiten oder Eigenschaften

Diese letzten vier Verschwendungsarten können direkt vom Layout und Design der Komponente angesprochen werden. [5]

Hinsichtlich der Identifizierung von Ursachen ist die Mustererkennung aus Prozessdaten der Schlüssel zum Verständnis des Prozesses, um die richtigen Schlussfolgerungen ziehen zu können. In der realen Prozesswelt sind hierzu große Datenmengen erforderlich, die üblicherweise durch teure Messtechnologien und intelligente Datenverarbeitung erzeugt werden, um den sogenannten digitalen Schatten zu erzeugen – ein "ausreichend genaues" Abbild des Prozesses, um Korrelationen zu erkennen und den Prozess in seiner Gesamtheit zu verstehen. Dieser Prozess kostet Zeit, Geld und Ressourcen.

Um dieses Problem zu überwinden, kann das Konzept des *Digital Twin*, ein "hinreichend genaues" virtuelles Modell des realen Prozesses und seine Parameterinteraktionen, wie die systematische Gießprozesssimulation, verwendet werden. Die Grundgenauigkeit numerischer und mathematischer Beziehungen der Gießprozess-Simulation erzeugt keine natürliche Streuung wie ein realer Prozess. Die Wiederholbarkeit erzeugt zuverlässige Korrelationen zwischen Parametern und Qualitätsgrößen mit einer signifikant reduzierten Anzahl von Versuchen und einfacher Statistik. Dieses Konzept entspricht dem Leitgedanken von LEAN, der Verschwendung, Fehler und unnötige Kosten vermeidet und bestmögliche Qualität anstrebt, während das Konzept des *Digital Shadow* eher geeignet ist, Verschwendung zu reduzieren.

Beim Bestreben nach dem optimalen Design sollte eine Kombination beider Konzepte verwendet werden: *Digital Twin* in sehr frühen Stadien und der *Digital Shadow* während der Produktion – unter dem Begriff "Frontloading" subsumiert.

4. Entwicklung eines Strukturbauteils einer Karosserie

Das gewählte Gussteil für diese Arbeit ist ein Leichtmetall-Strukturbauteil einer fiktiven Karosserie. Das Teil befindet sich in der Karosserie zwischen Unterboden und dem Vorderwagen. Eine der Hauptaufgaben besteht darin, sicherzustellen, dass der Lastpfad während eines Frontalaufpralls nicht unterbrochen wird. Daher muss das Gussteil die Kräfte bei einem Aufprall in den Tunnelbereich weiterleiten. Basierend auf standardisierten Materialeigenschaften wurden FEM-Simulationen durchgeführt, um die Festigkeit und das Funktionsverhalten der endgültigen Gusskomponentengeometrie während eines Frontalaufpralls zu überprüfen. Die Ergebnisse sind in **Bild 1** gezeigt. [4]



Bild 1: Links: Darstellung des einzelnen Gussteils und in isometrischer Ansicht in die Karosserie eingebautes Gussteil (Verbindung zu den Längsträgern und dem Tunnel). Rechts: Spannungsverteilung während eines Frontalaufpralls für die Baugruppe und das Gussteil.

In dem nächsten Schritt wurde der Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Gussteileigenschaften aufgrund von Fehlern, Schwächen und Inhomogenitäten mittels Gießprozesssimulation mit MAGMASOFT® analysiert. Um möglichst realistische Simulationsergebnisse zu erhalten, wurden folgende Prozessdefinitionen für die erste Simulation erstellt, die die erste Version für die folgenden inversen Vereinfachungsschritte ist:

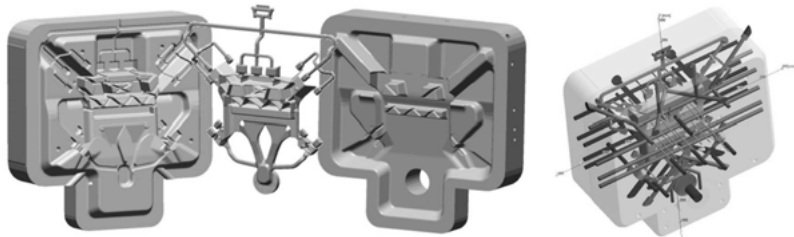


Bild 2: Darstellung des Gussteils und des vollständig definierten Werkzeugs

Das CAD-Modell besteht aus der endgültigen Gusskomponentengeometrie, die mit den relevanten Teilen des Gussstücks (Pressrest, Gießsystem, Überlauf und Vakuumentlüftungskanal - braun gekennzeichnet) sowie Werkzeugkomponenten (Matrizeneinsätze beweglicher und fester Formeinsätze - hellblau) und die internen Kühlkanäle für die Temperaturregelung. Um realistische Prozessbedingungen für die Formfüllung und Erstarrung zu erhalten, wurden im Simulationsaufbau mehrere Heizzyklen berücksichtigt. Die Temperatur des Werkzeugs wurde über die Temperaturkontrollkanäle eingestellt. Diese sind in **Bild 2** in blau, violett und türkis markiert. Die Werkzeugvorbereitung, die sowohl das Sprühen als auch das Abblasen der Form umfasst, wurde ebenfalls berücksichtigt. Weiterhin wurde ein aktives Entlüftungssystem mit Waschbrettventilen mit einem Vakuum von 200 mbar während des Füllprozesses berücksichtigt. Dieser Simulationsaufbau stellt einen sehr detaillierten "Digital Twin" und ein ausreichend genaues virtuelles Modell des realen Prozesses und seiner Parameter dar. [4]

5. Virtuelle Gießversuche als Basis für robustes Komponentendesign

Moderne Gießprozesssimulation kann prozessinhärente Interaktionen quantifizieren, indem mehr als nur ein definierter "Arbeitspunkt" gerechnet wird sondern ein Prozessfenster. Dies ermöglicht Einblicke in die Ursache möglicher Risiken und Probleme. Im Allgemeinen sind mehrere Iterationsschleifen von Konstruktionsänderungen oder unterschiedlichen Prozessparametern erforderlich, um die technischen Qualitätsanforderungen der Gusskomponente zu erreichen und die Gießbarkeit zu sichern.

Der iterative Aufbau einzelner Simulationen zeigt jedoch weder die Robustheit eines Designs, noch zeigt er auf, ob er unter den gegebenen Bedingungen das Optimum darstellt. Um dieses Wissen zu generieren, müssen systematische Variationen der Prozessbedingungen mit statistischen Methoden der virtuellen Testplanung wie einem sogenannten Design of Experiments (DoE) berechnet werden.

MAGMASOFT® unterstützt diese Methodik durch automatische Variationen von Parametern und CAD-Geometrien kombiniert mit integrierten Werkzeugen für die statistische Auswertung von virtuellen DoE-Ergebnissen. Darüber hinaus ist es möglich, spezielle Bereiche von Interesse zu definieren, die sogenannte Auswertebereiche für eine gezieltere Bewertung kritischer Qualitätskriterien definieren.

In dieser Arbeit wurde eine DoE mit wechselnder Kolbengeschwindigkeit, Gießtemperatur und verschiedenen initialen Werkzeugtemperaturen durchgeführt. Die verschiedenen Gestaltungsvariablen und ihre Freiheitsgrade sind in **Tabelle 1** dargestellt. Insgesamt wurden 125 virtuelle Experimente (Simulationsläufe) durchgeführt, um das Prozessfenster zu analysieren und zu überprüfen, welcher der definierten Parameter einen großen Einfluss auf die Gussqualität hat. Bei dieser Analyse ändert sich beispielsweise die Kolbengeschwindigkeit zwischen 3 m/s und 7 m/s in Schritten von 1 m/s.

Tabelle 1: Drei verschiedene Parameter des Gießprozesses

Variablen	Lower Limit	Upper Limit	Step
Anfangsgießtemperatur [°C]	640	700	15
Anfangswerkzeugtemperatur [°C]	150	250	25
Kolbengeschwindigkeit zweite Phase [m/s]	3.0	7.0	1.0

Bild 3 zeigt beispielhafte Ergebnisse der virtuellen DoE, die die Abhängigkeiten zwischen der Füllgeschwindigkeit der zweiten Phase und verschiedenen Qualitätskriterien angeben. Jeder Punkt im Diagramm stellt ein virtuelles Experiment und damit eine individuelle Simulation dar. Zum Beispiel zeigt das linke Diagramm die minimale Schmelztemperatur in den Auswertebereichen basierend auf der Kolbengeschwindigkeit der zweiten Phase. Es besteht eine deutliche Tendenz: Mit zunehmender Kolbengeschwindigkeit von links nach rechts erhöht sich die Prozessstabilität in Bezug auf Kaltlauf. Auf diese Weise wird der Prozess gegenüber Kaltlauf robuster. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht für das Qualitätskriterium "AirContact": Mit zunehmenden Geschwindigkeiten wird die Zeit "AirContact" reduziert. Die Zeit "WallContact" als Indikator für Schmelzverunreinigung zeigt eine ähnliche Tendenz. Das Qualitätskriterium "AirPressure" als Indikator für mögliche Gasporosität zeigt dagegen das Risiko von Lufteinschlüssen. Dieses Risiko steigt mit höheren Kolbengeschwindigkeiten.

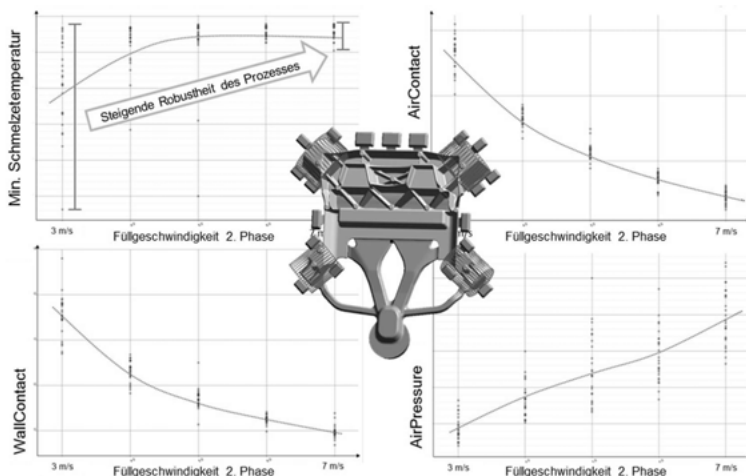


Bild 3: Einige beispielhafte Ergebnisse der virtuellen DoE zeigen Korrelationen zwischen der Füllgeschwindigkeit der zweiten Phase und verschiedenen Qualitätskriterien

Bild 4 zeigt exemplarisch eine so genannte Korrelationsmatrix einer DoE für die folgenden Prozessparameter: Dosiervarianz, Intensivierungsdruck, Schmelzeanfangstemperatur und Intensität einer kritischen Punktkühlung. Diese zusammengefasste Visualisierung virtuell erzeugter Haupteffekte ist eine Grundlage für ein verbessertes Prozessverständnis und gesicherte Prozesseinstellungen, z.B. durch Stichproben. Auf einen Blick können Sie kritische Prozessparameter identifizieren, die den höchsten Einfluss auf Ihre relevanten Qualitätskriterien haben. In diesem Fall wird die Wichtigkeit eines genauen Dosierverfahrens deutlich hervorgehoben.

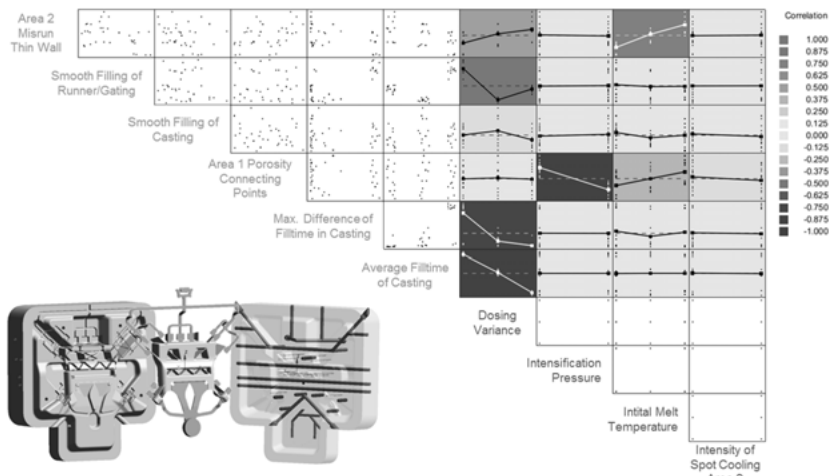


Bild 4: MAGMASOFT® Korrelationsmatrix - Zusammengefasste Visualisierung virtuell generierter Haupteffekte, Abhängigkeiten von Prozessvariationen zu Qualitätskriterien als Basis für Prozessimplementierung.


























Die systematische virtuelle Bewertung von Prozessfenstern generiert bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Gießentwicklung detaillierte Informationen über den Prozess und bereitet den Weg für innovative Gussprodukte und robuste Fertigungsprozesse vor [4].

6. Vereinfachung des Simulationsmodells

Um die Nutzbarkeit und die Vorteile der Gießprozesssimulation in verschiedenen Phasen der Produktentwicklung zu evaluieren, wurde eine systematische Vereinfachung des Simulationsmodells durchgeführt. Die Vereinfachung berücksichtigt die Konstruktionsschritte des Bauteils

sowie das verfügbare Prozesswissen in jeder Entwicklungsphase. **Tabelle 2** zeigt einen Überblick über die Vereinfachungsschritte. Die Vereinfachung erfolgt in zwei Phasen. Die erste Phase beschreibt das verfügbare Prozesswissen und besteht in der Vereinfachung der Werkzeug- und Prozessparameter. Es gibt acht Simulationsmodelle mit einem vollständig definierten Gussteil und einer schrittweisen Vereinfachung des Werkzeugs. Die zweite Phase widmet sich der Vereinfachung der Designphasen von der endgültigen Produktkonstruktion bis zum ersten funktionalen Konzeptstand. Für jeden Konstruktionsvereinfachungsschritt des Gussteils werden Simulationen mit den letzten drei Simulationseinstellungen des Werkzeugs durchgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der Vereinfachungsschritte des Werkzeugs und des Gussteils. Es gibt acht Simulationsmodelle mit ausdetailliertem Gussteil. Mit jedem Vereinfachungsschritt des Gussteils gibt es je drei Simulationsmodelle.

Name	Gussteil	Simulationsmodelle mit entsprechender Werkzeugausprägung							
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Ausgangsversion									
a. Ohne Auswerferdome									
b. Ohne Ver-rundungen									
c. Ohne Schrägen									
d. Altes Konzept									

Mit diesen verschiedenen Versionen werden Simulationen durchgeführt und dann die Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen der ersten Ausgangsversion als Referenz verglichen. Auf diese Weise werden Abweichungen von der realistischen Simulation ausgewertet und die Mindestanforderungen an das Werkzeug ermittelt, um noch präzisere Simulationsergebnisse zu erzielen.

Tabelle 3: Beschreibung der zwei verschiedenen Vereinfachungsschritte des Prozesses und des Gussteils

Vereinfachungsschritte des Prozesses (Gussteilgeometrie ändert sich nicht)	Vereinfachungsschritte des Gussteils (nur die Gussteilgeometrie ändert sich)
V1: Werkzeug komplett ("Digital Twin") V2: Entfall der Aufheizzyklen und Temperierung V3: Entfall des Vakuumsystems V4: Entfall der getrennten Werkzeughälften V5: Entfall des Entlüftungssystems V6: Entfall der Werkzeugvorbereitung V7: Entfall des Gießlaufs V8: Entfall der Füllungsergebnisse	a. Auswerferdome entfernen b. Verrundungen entfernen c. Entformungsschrägen entfernen

Die Ausgangsversion ist das vollständig definierte Gussteil, das speziell für den Druckguss entwickelt wurde. Dies bedeutet, dass keine scharfen Kanten außer an der Formtrennlinie vorhanden sind. Um ein Auswerfen des Gussteils aus der beweglichen Werkzeughälfte zu ermöglichen, sind Auswerferdome auf der Seite des Gussteils angebracht, aus der das Gussteil ausgestoßen wird. Darüber hinaus werden an allen Rippen Entformungsschrägen angebracht, um das Auswerfen des Gussteils zu erleichtern.

Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die Vereinfachungsschritte. Im letzten Vereinfachungsschritt werden die Entformungsschrägen der Rippen entfernt. Durch diese Vereinfachung entspricht das Modell einem konzeptionellen funktionalen 2D-Oberflächenmodell, das um eine Nennmaterialdicke erweitert ist.

7. Ergebnisse

Zunächst werden die Füllergebnisse für die verschiedenen Vereinfachungsschritte untersucht. In **Bild 5** ist beispielhaft eine Verlaufskurve dargestellt, die die Ergebnisse des Kaltlauftrisikos (links) gegenüber den Vereinfachungsschritten zeigen. Die Y-Achse zeigt die jeweiligen Werte der Ergebnisse an, während die Vereinfachungsschritte auf der X-Achse aufgetragen sind. Die Werkzeugvereinfachungen von V1 bis V6 sowie die Vereinfachungsschritte von V6a nach V6c, hervorgehoben durch die grüne Box, werden gezeigt. Dies entspricht den Versionen mit ausführlichem Gießlauf.

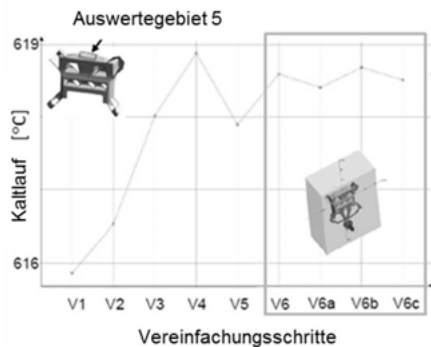


Bild 5: Links: Verlaufsdigramm mit dem minimalen Temperaturergebnis am Ende der Füllung im Auswertebereich 5. Vereinfachungsschritte des Werkzeugs von V1 nach V6 und des Gussteils mit den Modellen V6a, V6b und V6c.

Zwischen den einzelnen Versionen besteht kein signifikanter Temperaturunterschied (616 °C bis 619 °C). Mit zunehmender Vereinfachung steigt die Temperatur nur um 3 °C an. Aus diesem Grund sollte besonders darauf geachtet werden, dass sich mit zunehmender Detaillierung sowohl des Bauteils als auch des Prozesses das Risiko für Kaltlauffehler erhöht.

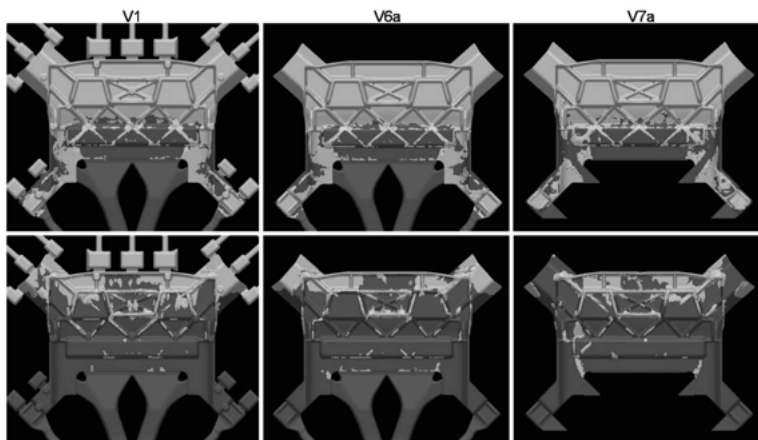


Bild 6: Inverse Formfüllung bei verschiedenen Zeitpunkten der Füllung für die Anfangsversion und die erste Gussvereinfachung mit unterschiedlichen Werten der Werkzeugdaten V6a und V7a.

Bild 6 zeigt das inverse Füllverhalten der Gussteile über die Werkzeug-, Prozess- und Bau- teilkonstruktionsvereinfachungen in zwei verschiedenen Stufen der Formfüllung. Transparente Bereiche sind bereits mit flüssiger Schmelze gefüllt, während graue Bereiche leere Hohlraum- abschnitte darstellen.

In den oberen Bildern, die einen frühen Punkt des Füllprozesses zeigen, ist eine gleichmäßige Gießfront zu erkennen, bei der die Schmelze bis zur horizontalen Rippenstruktur vorgedrungen ist. Die unteren drei Bilder zeigen die Schmelzfront kurz vor dem Ende der Füllung. Diese kritischen Bereiche der letzten Füllstufe sind für die verschiedenen Vereinfachungsschritte sehr ähnlich. Infolgedessen treten Lufteinschlüsse an den Einschubbereichen sowie im oberen Teil der vorderen Rippenstruktur auf. Die Kombination der inversen Füllung und der Beurteilung der Luftdruckverteilung gibt einen guten Hinweis darauf, wo Gasporositätsdefekte auftreten können.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der schrumpfungsbasierten Porosität für die anfängliche Version "Digital Twin" im Vergleich zu den drei verschiedenen Konstruktionsvereinfachungen des Gussteils.

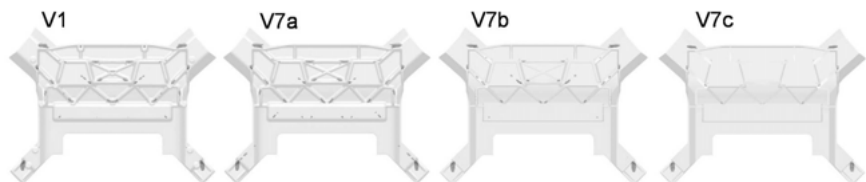


Bild 7: Porositätsverteilung für die Ausgangsversion V1 und die Gussteilvereinfachungen mit den Simulationsmodellen mit vereinfachten Anschnitten

Es ist zu erkennen, dass die Vereinfachungen des Gussteils und damit die Beseitigung von Materialanhäufungen, wie die Auswerferdome, die Verrundungen und die Entformungswinkel, zu weniger Porositäten im Gussteil führen. Das linke Diagramm von **Bild 8** veranschaulicht diesen Effekt, da der Porositätswert bei den Werkzeugvereinfachungen relativ konstant bei 2,25 % bleibt. Der Porositätswert fällt nur aufgrund der Vereinfachung des Gussteils auf 1,0 %. Es ist zu beachten, dass die Vereinfachungen des Gussteils einen erheblichen Einfluss auf die Porositätslage und -größe haben. Analog zum Fehlerbild Kaltlauf ist auch für das Fehlerbild

Schwindungsporosität mit zunehmender Detaillierung der Geometriedaten eine tendenzielle Verstärkung des Defektrisikos zu erwarten.

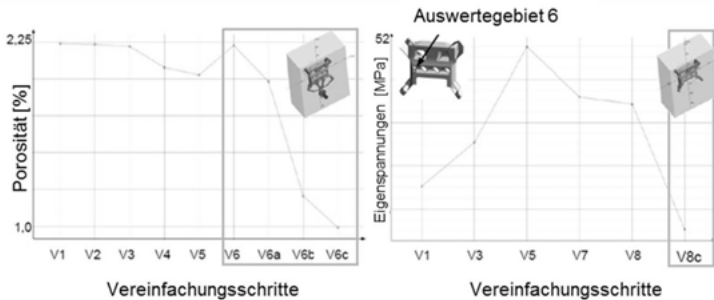


Bild 8: Links: Auswirkung auf das Ergebnis "Porosität" über die Vereinfachungsschritte des Werkzeugs und des Gussteils. Rechts: Mittlere Eigenspannungen im Auswertebereich 6 des Gussteils über die Vereinfachungsschritte.

Im rechten Diagramm von **Bild 8** sind die, während des Gießvorgangs im Auswertebereich 6 erzeugten, mittleren Eigenspannungen im Zuge der Vereinfachungen dargestellt. Die Ausgangsversionen V1 und V3 zeigen im kritischen Bereich niedrige durchschnittliche Spannungswerte. Durch den Wegfall der Werkzeughälften in V5 wird die mittlere Spannung auf 51 MPa erhöht. Durch die Entfernung des Gieß- und Anschnittsystems zur maximalen Vereinfachung sinkt der Wert der mittleren Restspannungen im maximal vereinfachten Modell auf 34 MPa. Somit ist hier zu beachten, dass durch eine gießgerechte Ausführung des Gussteils das Risikopotenzial erhöht wird [4].

Integration von Simulationsergebnissen in die FEM-Analyse

Der Guss-Längsträger muss im Falle eines Frontalaufpralls die Lasten fehlerfrei an den Tunnel übertragen. Eine vereinfachte FEM-Analyse wurde durchgeführt, um das Verhalten des Gussteils bei einem Frontalzusammenbruch im Sinne der europäischen Vorschriften zu untersuchen (Frontalaufprall 40 % Überlappung der linken Fahrzeugseite auf eine verformbare Barriere).

MAGMASOFT® erlaubt eine Übertragung der Ergebnisse von der Gießprozesssimulation auf beliebige FEM-Shell-Modelle. Im Detail wurde die lokale Verteilung der prozessbedingten von Mises Spannungen und effektiven plastischen Dehnungen aus MAGMAstress exportiert und als zusätzlicher oder erster Lastfall für die Crashesimulation auf die Eingabedatei von ABAQUS

abgebildet. **Bild 9** visualisiert den Arbeitsablauf der Simulation von Mapping-Simulationen zur Analyse der funktionalen Simulation.

Im unteren linken Teil von **Bild 9** ist ein detaillierter Teil des Gussstücks dargestellt, welche die Spannungsverteilung in diesem Bereich veranschaulicht. Die Skalen reichen von -150 bis 0 MPa. Im Crashfall werden erhöhte Druckspannungen an der Wand zur unteren Rippe aufgebracht. Diese Bereiche sind dunkelblau dargestellt. Die verbleibenden Bereiche, die grau eingefärbt sind, haben wesentlich geringere bis fast keine Druckspannungen. Die bei der Fertigung entstehenden Druckspannungen sind gering, haben aber einen lokalen Einfluss auf die Spannungsverteilung während eines Crashes. Zum Beispiel wirken sich die Spannungen am Übergang von der Rippe zur Wand positiv auf die Druckspannungen aus, da der dunkelblaue Bereich, der erhöhte Druckspannungen anzeigt, durch die Kompensation dieser Spannungen reduziert wird. Die Spannungsüberlappung wirkt sich daher im Crashfall sowohl positiv als auch negativ auf die Funktion und Robustheit der Druckgusskomponente aus.

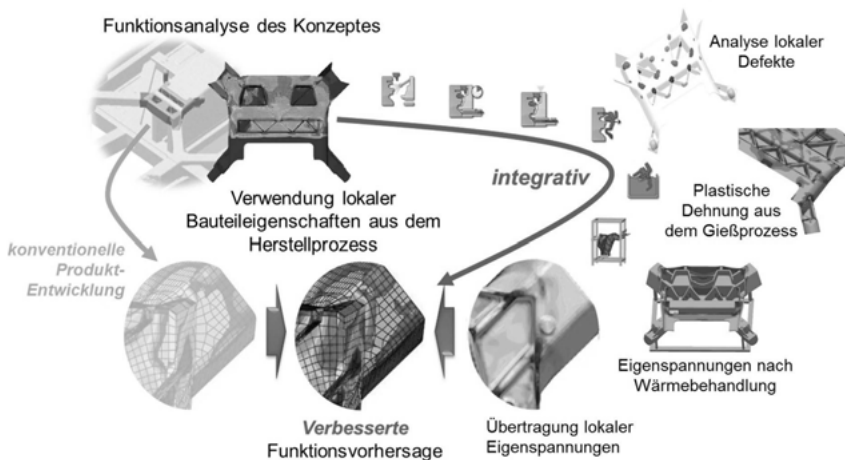


Bild 9: f.l.n.r.: Überblick über die Karosseriestruktur; Lastverteilung im Crashfall; Spannungen und effektive plastische Dehnungen aus dem Fertigungsprozess; Detailsansicht der Spannungsverteilung im Bereich der Verbindung der Längsträger mit Berücksichtigung der Eigenspannungen aus dem Gießprozess.

Bild 10 zeigt die Spannungsverteilung nach einem Frontalcrash ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen, für das Gussteildesign der Version V1 ("Digital Twin") (oben links) und für

die vereinfachte Teilegeometrie der Version V8c (oben rechts). Entsprechend zeigen die beiden unteren Bilder beide Versionen einschließlich ihrer Prozess-, Werkzeug- und Geometrievereinfachung unter Berücksichtigung der Eigenspannungen. Die Skala reicht von 0 bis 150 MPa, wobei letztere die Fließgrenze der betrachteten Magnesiumlegierung ist.

Es ist zu erkennen, dass die Spannungen der unteren Anzeige der Version V1, welche die lokalen Eigenspannungen aus dem Gießprozess berücksichtigt, signifikant niedriger sind als die Simulation ohne deren Berücksichtigung. Bei der vereinfachten Version V8c rechts unten unterscheiden sich die Spannungsverteilungen nur geringfügig, mit oder ohne Berücksichtigung von prozessbedingten lokalen Eigenspannungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die beim Gießprozess entstehenden Eigenspannungen von V8c sehr gering sind und somit die Spannungsverteilung im Druckgussbauteil nicht wesentlich beeinflussen.

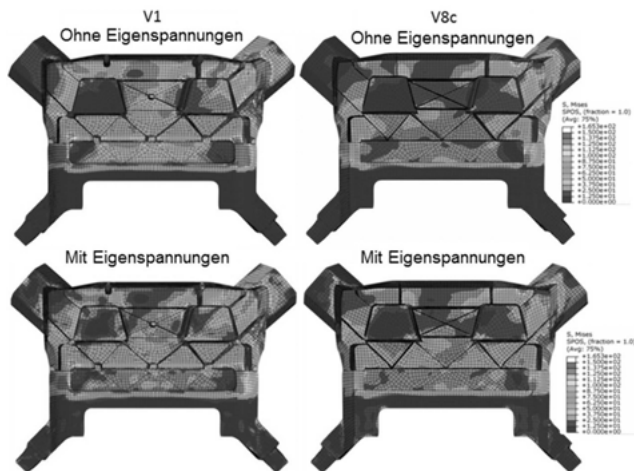


Bild 10: Vergleich der Ergebnisse aus der FEM-Berechnung, von der Ausgangsversion bis zur Konzeptebene; sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen.

Zusammenfassend haben die Eigenspannungen aus der Produktion einen großen Einfluss auf die Spannungsverteilung während eines Frontalaufpralls. Die Integration von prozessbedingten lokalen Spannungsverteilungen unterstützt die frühzeitige Erkennung von kritischen Bereichen, die bei einem Frontalaufprall schneller ausfallen würden. Zusätzlich kann anhand eines sehr vereinfachten Modells analysiert werden, wie sich die Eigenspannungen aus der Produktion auf das Lastverhalten des Gussteils auswirken.

Auswirkungen unterschiedlicher Formöffnungszeiten auf das Gussteil

Um die Robustheit des Prozesses zu überprüfen wurden im Rahmen einer virtuellen DoE unterschiedliche Formöffnungszeiten und deren Auswirkungen auf den Verzug und die Eigenspannungen im Gussteil untersucht. Dazu wurden zwei Auswertebereiche im Bereich der oberen Anbindungspunkte in das Simulationsmodell implementiert, um den relativen Verzug der Punkte zueinander zu messen (siehe **Bild 11**).

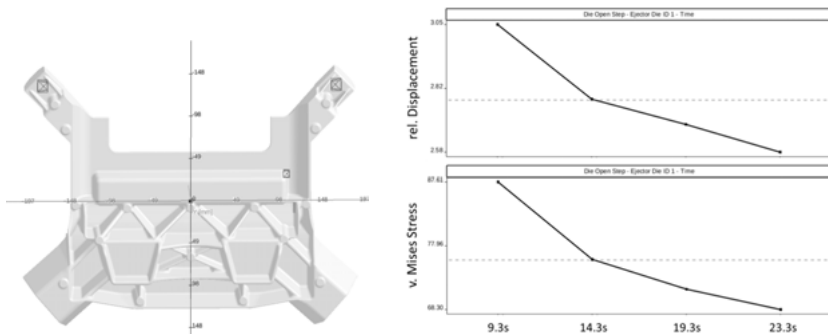


Bild 11: Links:Gussteil mit definierten Auswertebereiche; Haupteffektdiagramm Verzug und Eigenspannungen über den Formöffnungszeiten aufgetragen

Das Haupteffektdiagramm des virtuellen Versuchsplans zeigt die Korrelation zwischen der Formöffnungszeit und dem relativen Verzug der Anbindungspunkte und den Eigenspannungen über das gesamte Bauteil. Umso länger das Gussteil in der Form bleibt, desto geringer wird der Verzug im Gussteil. Die gleiche Tendenz ist für die Eigenspannungen zu erkennen.

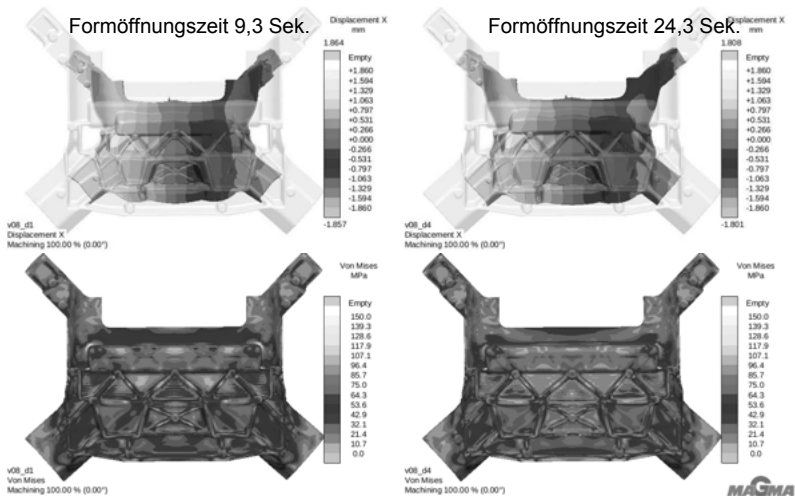


Bild 12: Auswertung der unterschiedlichen Formöffnungszeiten

In **Bild 12** sind der Verzug und die Eigenspannungen für die kürzeste und längste Formöffnungszeit dargestellt. Die oberen Bilder zeigen die Verschiebung in x-Richtung. Für beide, die kurze und die lange Formöffnungszeit, biegen sich die Anbindungspunkte nach innen. Für die längere Zeit ist die relative Bewegung zwischen den beiden Anbindungspunkten ungefähr 0,5 mm kleiner. Die Bilder unten zeigen die Rest-von-Mises-Spannung (am Ende des Gießvorgangs). In der Ecke nehmen die Eigenspannungen mit zunehmender Formöffnungszeit ab. Eine spätere Formöffnung führt zu höheren Spannungen und Belastungen innerhalb der Form wodurch die Gefahr für Spannungsrisse erhöht wird. Eine längere Zuhaltezeit der Form erhöht das Risiko für Entformungsprobleme aufgrund von Schrumpfkraften auf die Form.

Berücksichtigung der Wärmebehandlung als Teil der Prozesskette

Gussteile, mit hohen Materialanforderungen, beispielsweise für sicherheitsrelevante Bauteile im Fahrzeug, werden häufig wärmebehandelt, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern, z.B. um eine höhere Dehnung oder höhere Zugfestigkeit zu erreichen.

Das herkömmliche Wärmebehandlungsverfahren für dünnwandige Leichtmetallkomponenten besteht aus einer kontrollierten Erwärmungs-, Lösungsbehandlung, Abschreck- und künstlichen Alterungsphase, die in **Bild 13** gezeigt wird. Sie wird üblicherweise in der Gießerei oder bei einem externen Wärmebehandler durchgeführt. Um optimale Gussteileigenschaften zu er-

zielen ist Auslegung des Wärmebehandlungsprozesses frühzeitig zu berücksichtigen. Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die Gestaltung des Wärmebehandlungsgestells mit sinnvoll platzierten Anschlägen und Stützen. Aufgrund von Materialerweichungs- und Kriecheffekten bei erhöhten Temperaturen wird sich das Gussteil unter der Schwerkraft verbiegen und somit zu inakzeptablen Verformungen und Verschiebungen führen.

MAGMASOFT® unterstützt die detaillierte Analyse eines Wärmebehandlungsprozesses als Teil der Prozesskette. CAD-Eingabedaten für die Wärmebehandlungssimulation bestehen entweder in der nominellen CAD-Konstruktion oder in einer exportierten verzerrten Geometrie unter Berücksichtigung der plastischen Verformung aufgrund von lokalen Eigenspannungen und effektiven Belastungen aus dem Druckgießverfahren, z.B. Füllen, Erstarren, Auswerfen, Entgraten, etc..

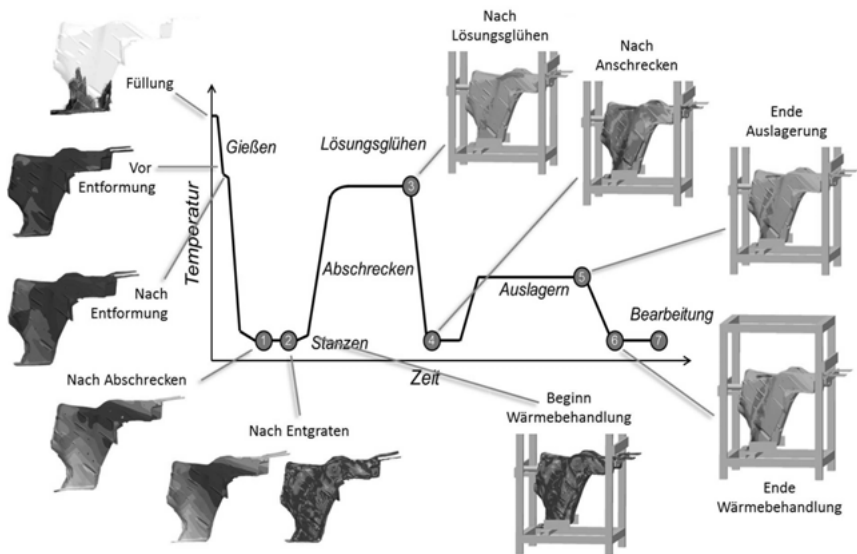


Bild 13: Schematische Prozesskette mit Berücksichtigung des Wärmebehandlungsverfahrens für dünnwandige Leichtmetallbauteile mit kontrollierter Aufheizung, Lösungsbehandlung, Abschrecken und künstlicher Alterungsphase.

Im weiteren Schritt wurde eine Wärmebehandlung des Gussteils ausgelegt. **Bild 14** (links) zeigt die Verformung der Geometrie des Gussteils auf einem Wärmebehandlungsgestell wäh-

rend des Wärmebehandlungsprozesses aufgrund der Materialerweichung bei erhöhten Temperaturen. Die Gestaltung des Gestells hat einen großen Einfluss auf den Verzug des Gusstücks. In diesem Fall führt die Wärmebehandlung zu einer Gesamtverschiebung von maximal 1,5 mm in y-Richtung (Schwerkraftrichtung) bei Umgebungstemperatur.

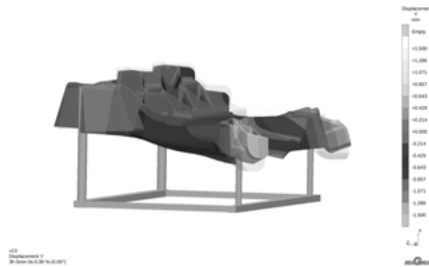


Bild 14: Gesamtverzug bei Umgebungstemperatur nach dem Wärmebehandlungsprozess

Da die Durchbiegung des Gussteils sehr groß ist, wurde in einem nächsten Schritt das Gestell verändert. **Bild 15** zeigt die Variation. Zunächst wurden (wie links dargestellt) zwei Stützen mittig unterhalb des Gussteils angebracht. Damit wurde die Durchbiegung auf 0,2 mm reduziert. Nach einer weiteren Untersuchung wurde eine der mittleren Stützen entfernt. Dieses Gestell ist somit einfacher in der Herstellung und liefert für den Verzug sehr ähnliche Ergebnisse.

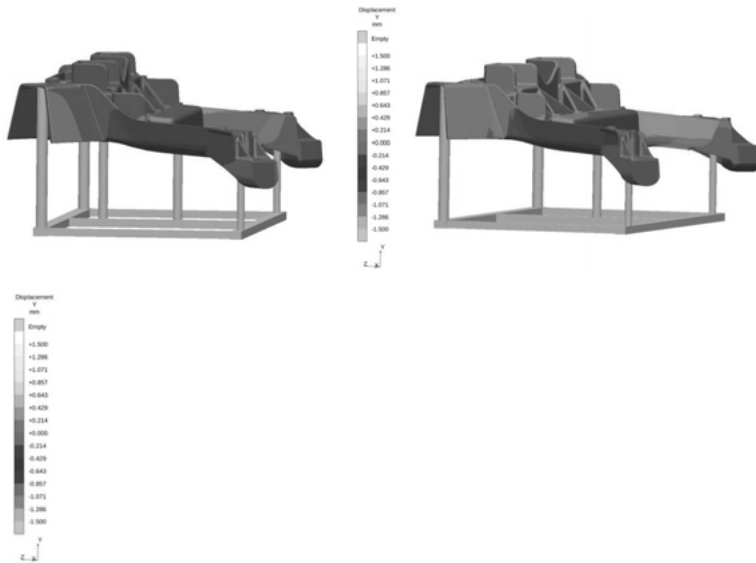


Bild 15: Zwei unterschiedliche Wärmebehandlungsgestelle; links mit zwei Stützen mittig unterhalb des Gussteils, rechts reduziert auf eine Stütze

Die waagerechte Lagerung der Bauteile im Ofen für die Wärmebehandlung ist auf diese Weise nicht sehr wirtschaftlich, weil diese Lagerung sehr viel Platz braucht, wurde eine weitere Variante untersucht. Dazu wurde das Gussteil senkrecht auf ein Gestell gelegt. Mit dieser Anordnung können mehrere Gussteile zur Wärmebehandlung im Ofen angeordnet werden. Der Verzug im Gussteil liefert ebenfalls vergleichbare Ergebnisse mit einem maximalen Verzug in Z-Richtung von 0,2 mm.

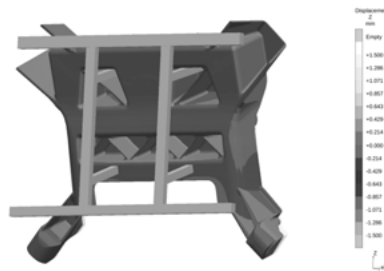


Bild 16: Verzug des senkrecht gelagerten Gussteils

Damit der Verzug des Bauteils besser verglichen werden kann, wurden diese in ein Streudiagramm übertragen. **Bild 17** zeigt den maximalen Verzug der Bauteile über die einzelnen Wärmebehandlungsgestelle.

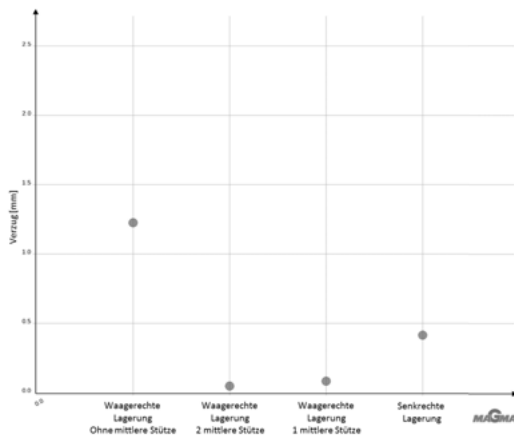


Bild 17: Verzug des Bauteils mit unterschiedlichen Wärmebehandlungsgestellen

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Verzug durch die Weiterentwicklung der waagerechten Gestelle minimiert werden konnte. Auch die senkrechte Auslegung liefert bessere Verzugsergebnisse als die ursprüngliche Gestellauslegung.

Die Berücksichtigung der lokalen mechanischen Eigenschaften und der Eigenspannungen des Gussteils, die durch den Wärmebehandlungsprozess erzeugt werden, verbessert eine zuverlässige Voraussage von Sicherheitsfaktoren im Frühstadium. Für Designer und Entwickler, die

nach einer optimalen Ausnutzung von Materialpotenzialen und einem sicheren Entscheidungsprozess in frühen Phasen streben, ermöglicht diese Methode die Erstellung robusterer Gusskomponenten.

Nicht nur das Wärmebehandlungsgestell hat einen großen Einfluss auf den Bauteilverzug, sondern auch die Einstellparameter des Wärmebehandlungsprozesses wie beispielsweise die eingestellte Temperatur und die Haltezeit des Prozessschrittes Lösungsglühen. Um den bestmöglichen Arbeitspunkt zu finden, wurde ein virtueller Versuchsplan einer Wärmebehandlung aufgestellt. Die virtuelle Analyse der Wärmebehandlung ermöglicht quantitative Verzugsvorhersagen bevor das erste reale Experiment durchgeführt wurde.

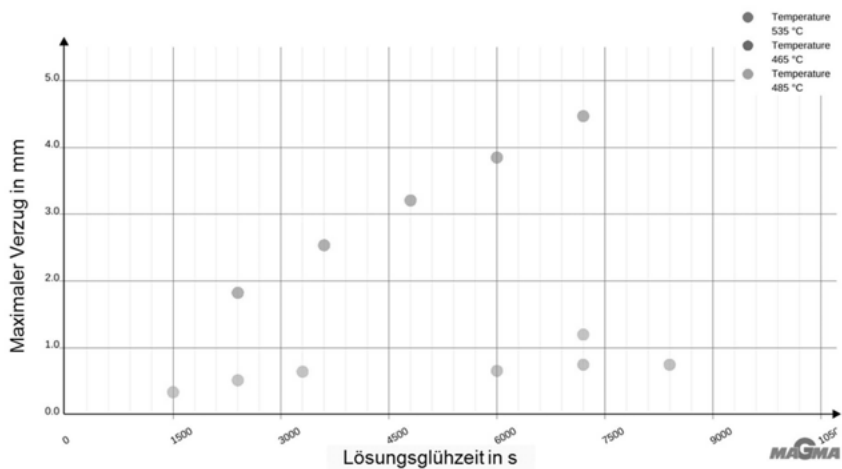


Bild 18: Verzugsanalyse für Wärmebehandlungstemperaturen und -zeiten

Der Ausgangsprozess mit 2 Std. Lösungsglühen bei 485 °C wurde in einem virtuellen Versuchsplan in Temperatur und Haltezeit im Lösungsglühen variiert. Gemessen wurde der max. Verzug in Schwerkraftrichtung. Der Verzug über den Lösungsglühzeiten des Versuchsplans ist in **Bild 18** dargestellt. Die unterschiedlichen Farben der Punkte stehen für unterschiedliche Temperaturen (rot 535 °C, blau 465 °C, grün 485 °C).

Es ist zu erkennen, dass bei einer höheren Temperatur der Einfluss auf den Verzug größer ist. Das liegt daran, dass umso länger das Bauteil in dem Temperaturbereich bleibt, desto länger ist es auch der Schwerkraft ausgesetzt und gibt dieser Kraft nach. Die systematische virtuelle

Analyse des Wärmebehandlungsprozesses unterstützt bei der gezielten Vorhersage oder Einstellung des Bauteilverzuges. Das generierte Prozesswissen erlaubt darüber hinaus eine sinnvolle Optimierung der Prozessparameter im Hinblick auf Qualität, Robustheit und Kosten.

8. Zusammenfassung

Die Entwicklung eines optimalen Bauteils bezogen auf Eigenschaften, Wirtschaftlichkeit und Robustheit in Funktion und Fertigung erfordert ein verlässliches Produkt- und Prozesswissen in der frühen Entwicklungsphase. Dies gilt in besonderem Maße für den Druckgießprozess mit seinen hohen Investitionen in Fertigungsanlagen und Werkzeuge.

Frontloading, der systematische Transfer von Prozesswissen über Abhängigkeiten zwischen Qualität, Funktion und auftretende Variationen der Herstellungsbedingungen, befähigt die Entwicklung robuster Produkte und Prozesse durch frühzeitig abgesicherte Entscheidungen.

Eine konventionelle Anwendung von Gießprozesssimulation schafft Prozesstransparenz und Einblicke in die Ursachen von Problemen. Der iterative Aufbau einzelner Simulationen zeigt jedoch weder die Robustheit eines Designs noch die Aussage, ob es unter den gegebenen Bedingungen das Optimum darstellt. Dieses zusätzliche Wissen kann mit Hilfe systematischer virtueller Variationen der Prozessbedingungen erzeugt werden.

Eine methodische Evaluierung von Konstruktionsänderungen und Produktionsvariationen ermöglicht Konstrukteuren und Gießern die Auswirkungen auf lokale Guss-Eigenschaften, Eigenspannungen, Mikrostruktur, potentielle Defektstellen oder die Maßgenauigkeit des Bauteils in jeder Phase des Herstellungsprozesses frühzeitig zu beurteilen.

Die methodische Integration der Gießprozesssimulation in die CAE-Prozesskette ist dabei eine logische Erweiterung der virtuellen Fertigungs- und Prozessentwicklungskonzepte.

Bauteildesigner und Hersteller können kritische prozessgetriebene Konstruktionsprobleme bewerten, bevor kostenintensive Entwicklungsschritte, wie z.B. die Werkzeugherstellung, begonnen haben. Auf diese Weise können Konstruktionsänderungen, die sich aus Optimierungen des Prozesses ergeben, vermieden werden. Dies führt zu erheblichen Kostenvorteilen, Zeitgewinn sowie robusteren Produkten und Produktionsprozessen.

9. Quellen

- [1] Bramann, H.; Pavlak, L.: Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozess-Simulation , In: GIESSEREI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2015, ISSN: 00169765, S.: 2839
- [2] Ehrlenspiegel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U., Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 7. Auflage, SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2014, ISBN 9783642419584, S.: 7ff., 11 ff.
- [3] Szegho, K.; Bercsey, T.: Kosten und Risikomanagement in der frühen Phase der Produktentwicklung, 18. Symposium „Design for X“, Neukirchen, 2007
- [4] Leineweber, L.: Untersuchung der Einsetzbarkeit von MAGMASOFT® in der frühen Konzeptphase der Karosseriebauteilentwicklung, Masterarbeit, 2015
- [5] Töpfer, A.: Lean Six Sigma: Erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma, SpringerVerlag, 2009, ISBN 978-3540850595, S.130 ff.

Aluminium Druckgussbauteile in 3-Platten Technologie

Aluminum die cast components in 3-plate technology

Dipl.-Ing. (FH) **Marco Salb**, Daimler AG, Stuttgart

Einleitung

Im Werkteil Esslingen-Mettingen des Werkes Untertürkheim befindet sich die Gießerei der Daimler AG. Die Gießerei ist dabei in drei Bereiche gegliedert:

- Niederdruck-Stahlguss
- Leichtmetall-Schwerkraftguss
- Leichtmetall-Druckguss

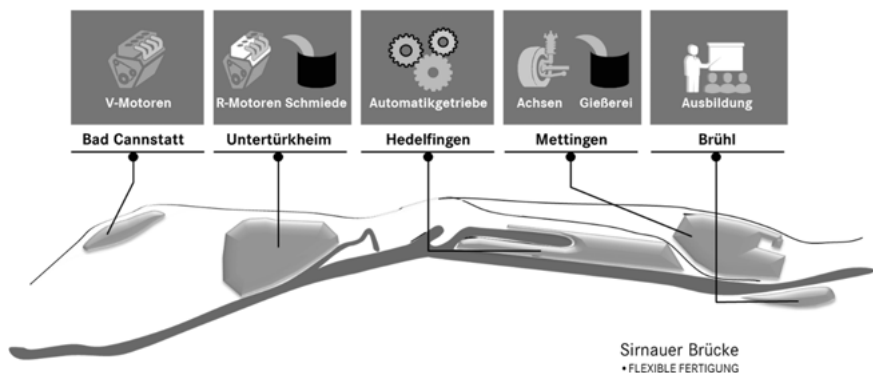


Bild 1: Werkteile Untertürkheim

Im Bereich Leichtmetall-Druckguss werden auf insgesamt 30 Druckgusszellen mit einer Schließkraft von 1250t bis 4100t verschiedenste Bauteile für Aggregate und Karosserien gefertigt. Das Teilespektrum umfasst verschiedene Kurbelgehäuse mit 4, 6 und 8 Zylindern in Reihe oder V-Anordnung, Getriebegehäuse für Schalt- und Automatikgetriebe in Aluminium- und Magnesiumguss, Aluminium-Strukturbauteile und Dachteile für die Leichtbau-Variodächer der Roadster.



Bild 2: Auszug Teilespektrum Leichtmetall-Druckguss

Für die aktuelle S-Klasse und C-Klasse werden die Dämpfer- bzw. Federbeindome mittels eines Dreiplatten-Druckgusswerkzeuges produziert. Dabei findet der komplette Fertigungsprozess der neben dem Gießen der Bauteile auch das Entgraten, die Wärmebehandlung, das Richten, sowie die Bearbeitung und das Verputzen der Teile beinhaltet im Haus statt, lediglich die Oberflächenbehandlung wird bei einem externen Partner durchgeführt.

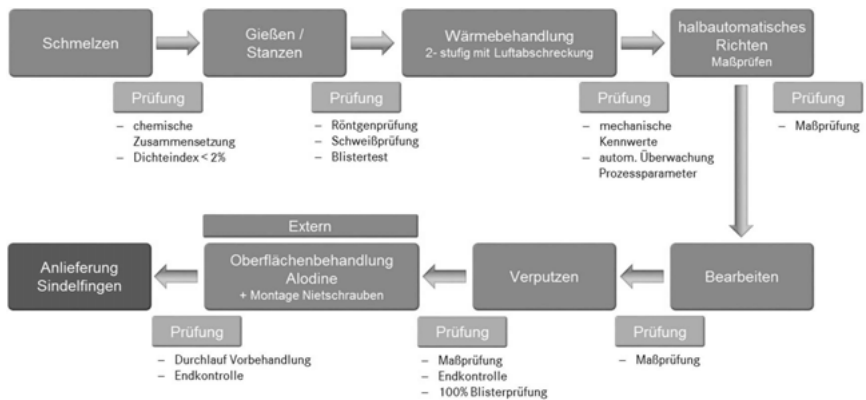


Bild 3: Fertigungsprozess Konsole Dämpferbein S-Klasse

Der nachfolgende Bericht erläutert die Auswahlkriterien für das Angusskonzept und die Werkzeugtechnologie und beschreibt die Vorteile, sowie auch die Herausforderungen dieses Werkzeugkonzeptes und gibt einen Einblick in den Aufbau der Werkzeuge, sowie den Fertigungsprozess.

1. Auswahlkriterien Angusskonzept

Zu Beginn des Projektes wurden zwei Angussvarianten in der Simulation bewertet, ein zentraler Anguss über die Bauteilmitte und ein seitlicher Anguss. Die Vergleiche wurden dabei auf Basis der Dämpferbeindome der S-Klasse durchgeführt, die Ergebnisse sind aber grundsätzlich auf andere vergleichbare Bauteile übertragbar.

Anguss seitlich

DG-Maschine 4100to

Sprengfläche gesamt ca. 6300cm²

max. Nachdruck: 570 bar

ohne Sicherheit, Überlauf- und Vakuumsystem

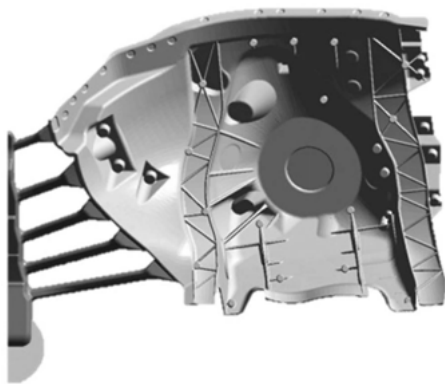


Bild 4: Anguss seitlich

Anguss zentral

DG-Maschine 4100to

Sprengfläche gesamt ca. 5350cm²

max. Nachdruck: 660 bar

ohne Sicherheit, Überlauf- und Vakuumsystem

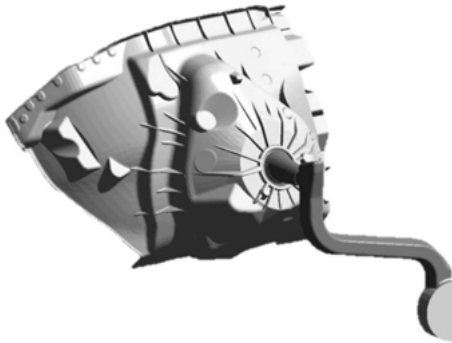


Bild 5: Anguss zentral

Hierbei wurden die Temperaturverläufe bei der Formfüllung, die Erstarrung und die im Bauteil verbleibenden Lunker und Porositäten als Kriterien herangezogen.

Bild 6 zeigt die Temperaturen im Bauteil am Formfüllende. Hier ist gut zu erkennen, dass durch die beim Zentralanguss kürzeren Fließwege höhere Temperaturen erreicht werden und somit die Gefahr von Kaltlaufstellen reduziert wird:

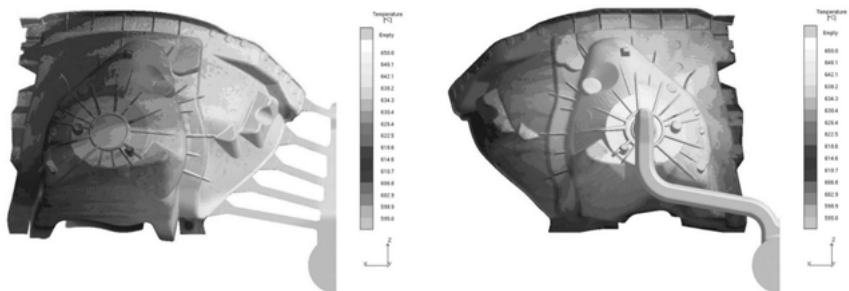


Bild 6: Temperaturen im Bauteil bei Formfüllende

Die im Bauteil verbleibenden Fehlstellen sind in nachfolgendem Bild 7 zu erkennen. Bedingt durch den deutlich höheren maximalen Nachdruck aufgrund der geringeren Sprengfläche beim zentralen Anguss ist in nahezu allen Bereichen eine höhere Bauteilqualität zu erwarten.

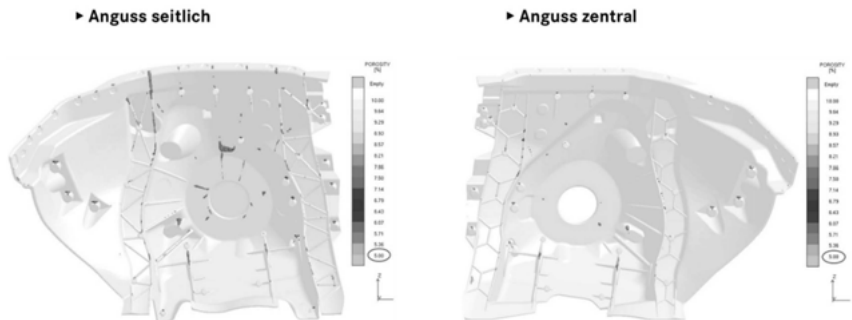


Bild 7: Innere Fehlstellen

2. Formkonzept und Ablauf

Die Dreiplattenwerkzeuge bestehen aus der Auswerferseite, der festen Eingießeite, sowie der beweglichen dritten Platte (siehe Bild 8). Der Gießlauf befindet sich dabei in der festen Seite, kann bei Bedarf aber auch teilweise in die bewegliche Formplatte übergehen. In den beiden Druckgussformen sind jeweils über 3100 Einzelteile verbaut. Der Aufbau, sowie die Abmessungen der Gießformen inkl. Anbauteile (ohne Gießkammer) und die Gewichte sind nachfolgend ersichtlich:

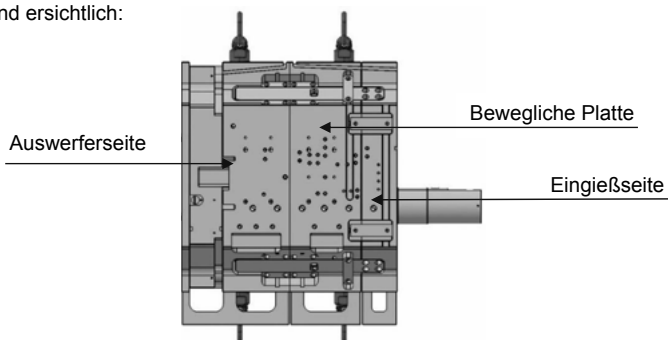
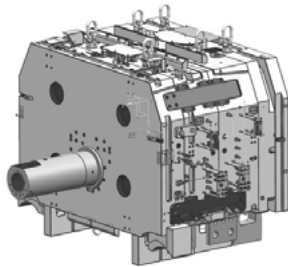


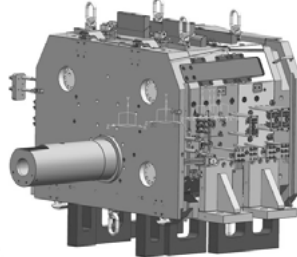
Bild 8: Druckgussform für Konsole Dämpferbein S-Klasse

Druckgussform Konsole Dämpferbein



Höhe: 2110mm
 Breite: 2958mm
 Tiefe: 1660mm
 Gewicht: 51t

Druckgussform Federbeindom



2110mm
 2680mm
 1475mm
 34t

Bild 9: Abmessungen und Gewichte

Nach Erstarren des Bauteils in der Form fährt die Auswerferseite gemeinsam mit der beweglichen Platte zurück und der Gießlauf wird von den beiden Angusskegeln abgerissen (Bild 10 und 11). Die bewegliche Platte wird dabei mittels vier Abdrückzylindern bis zu ihrer Endposition bewegt. Die Gestaltung des Hinterschnittbereiches in der festen Formseite ist dabei ausschlaggebend für ein prozesssicheres Abreißen.

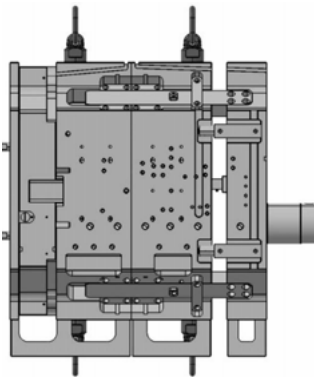


Bild 10: Bewegliche Platte geöffnet

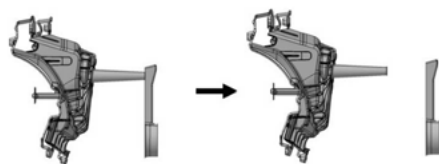


Bild 11: Anguss nach Abreißen

Die Bauteile weisen dabei eine Tendenz zu Verzügen in der Auflagefläche für die Federbeindome auf. Die Bauteilverzüge werden vor allem durch nachfolgende Faktoren beeinflusst.

- Aufschumpfen der Bauteile auf der Auswerferseite
- Entformung des Angusskegels aus der Eingießseite
- Werkzeugtemperierung des Angussbereiches
- Werkstoff der Verschleißsätze im Angussbereich
- Sprühen der Form
- Beschichtung der Verschleißsätze

Um die Verzüge beim Ausstoßen der Bauteile aus der Auswerferseite zu reduzieren wurden bei den Konsolen der S-Klasse im Angussbereich zusätzliche Auswerfer integriert:

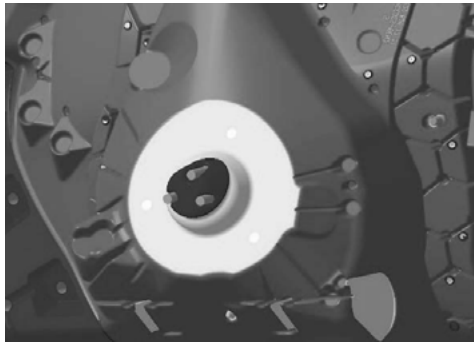


Bild 12: Auswerfer im Angussbereich

Nachdem die bewegliche Platte ihre Endposition erreicht hat öffnet die Auswerferseite vollständig und das Bauteil wird ausgestoßen. Weiterhin wird der Gießlauf am Pressrest durch den Gießkammerkolben aus der festen Platte ausgestoßen und fällt auf ein Förderband im Maschinenbett. Danach werden die beiden Bauteile durch einen Roboter am Angusskegel gegriffen, aus der Form entnommen und nach Abkühlen in einem Tauchbecken in das Entgratwerkzeug eingelegt.

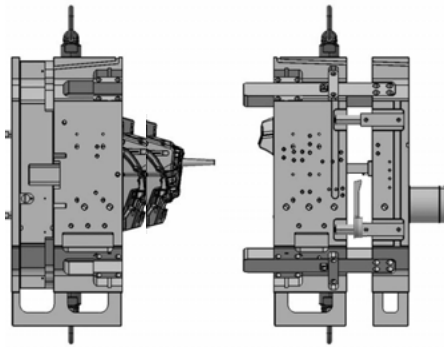


Bild 13: Form geöffnet mit ausgestoßenem Bauteil und Gießlauf

3. Werkzeugaufbau

Zur Erhöhung der Formlebensdauer sind in den Bereichen mit erhöhtem Verschleiß Teileinsätze eingebracht welche bei Bedarf gewechselt werden können. Im Einzelnen sind dies Angusseinsätze in der Auswerferseite (Bild 14) und in der beweglichen Formhälfte (Bild 15), sowie Einsätze in der festen Formplatte im Bereich des Gießlauf-Abrisspunktes (Bild 16). Die Verschleißeinsätze in der festen Platte sind so ausgeführt dass ein Wechsel auf der Druckgussmaschine in kurzer Zeit möglich ist ohne die Form abzurüsten.

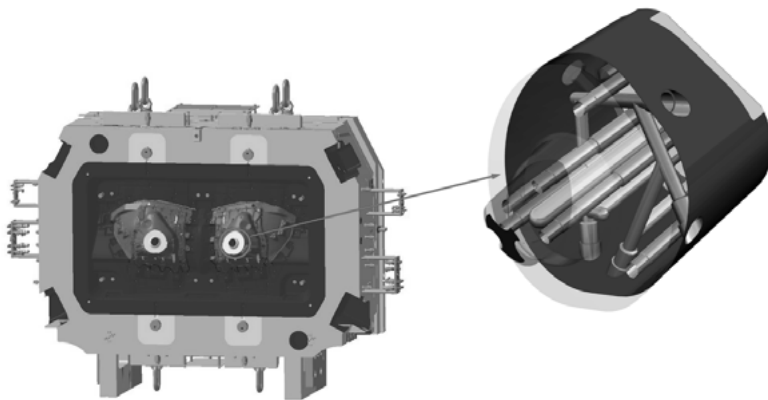


Bild 14: Verschleißeinsätze Auswerferseite

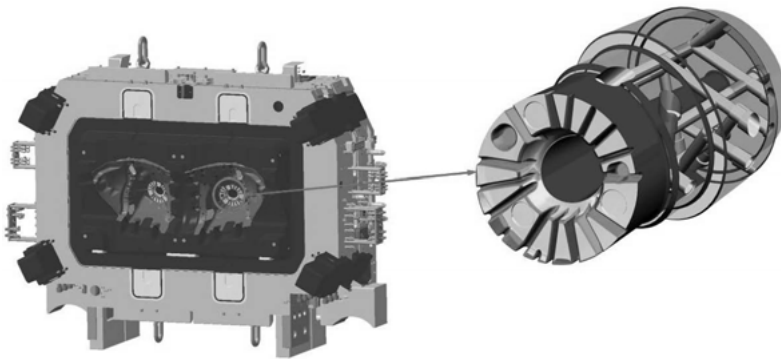


Bild 15: Verschleißeinsätze bewegliche Formhälfte

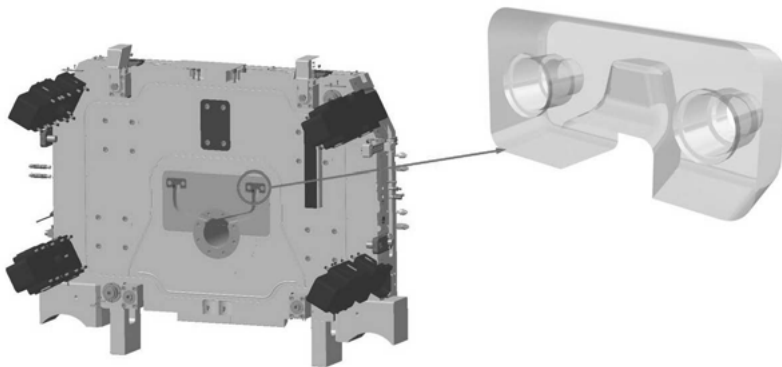


Bild 16: Verschleißeinsätze am Abrisspunkt 3. Platte

Durch die Integration dieser Verschleißsätze konnte die Standzeit der Kontureinsätze v.a. beim Federbein der C-Klasse deutlich erhöht werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die durchschnittlichen Standzeiten der einzelnen Bereiche:

Bauteil	Konsole Dämpferbein	Konsole Federbein
Kontureinsätze	122.000	180.000
Wechseleinsatz AS	18.000	42.000
Wechseleinsatz ES	30.000	36.000
Wechseleinsatz 3.Platte	22.000	22.000

Tabelle 1: Standzeiten der Werkzeugeinsätze

4. Entfernen des Angusskegels

Das Entfernen der Angusskegel erfolgt bei den Bauteilen der S- und C-Klasse auf unterschiedliche Art und Weise und ist abhängig vom maximal möglichen Durchmesser des Flansches, an dem die Bauteile angegossen werden. Ist der Durchmesser groß genug kann der Anschnitt des Gießlaufes auf die Innenseite des Flansches gelegt werden und es wird trotzdem noch eine ausreichende Querschnittsfläche im Angussbereich erreicht. Ein zu kleiner Flanschdurchmesser hätte erhöhte Metallgeschwindigkeiten zur Folge, daher muss der Angusskegel in diesem Fall auf den Flansch aufgesetzt werden um den Querschnitt zu erhöhen. Bild 17 und 18 zeigen die unterschiedlichen Konzepte. Wenn der Anschnitt auf der Innenseite des Flansches liegt kann der Angusskegel im Entgratwerkzeug einfach ausgedrückt werden, der Bruchbereich wird dann anschließend im Werkzeug noch durch den Ausdrückstempel geräumt. Im Falle eines aufgesetzten Angusskegels wird dieser nach dem Entnehmen aus dem Entgratwerkzeug in einer separaten Sägestation abgesägt.

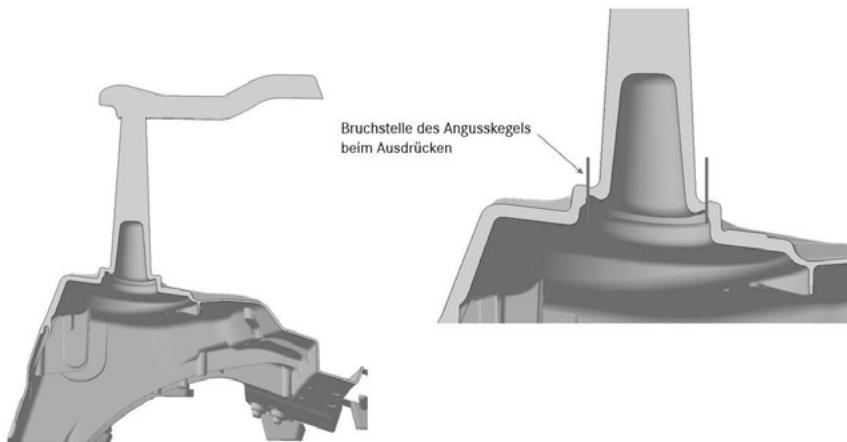


Bild 17: Innenliegender Angusskegel Federbeindom C-Klasse

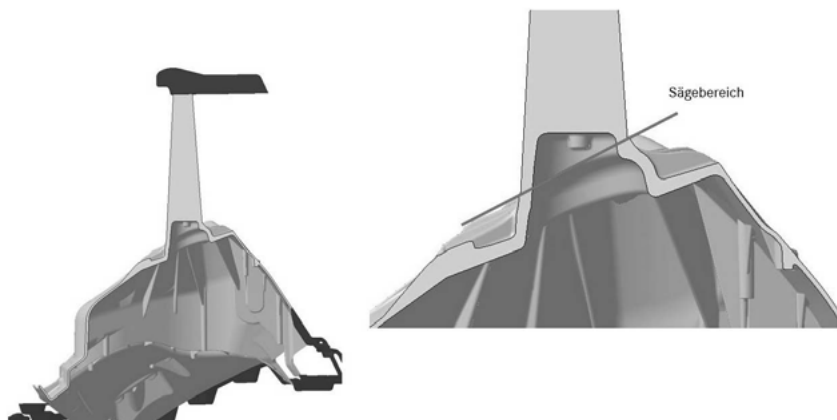


Bild 18: Aufgesetzter Angusskegel Konsole Dämpferbein S-Klasse

5. Folgeprozesse

Nach der Entnahme der entgrateten Bauteile aus der Druckgusszelle werden diese in den Ofenladungsträger abgelegt und dann mittels eines selbstfahrenden Transportsystems in das Entkopplungsmodul transportiert. Von dort werden die Ladungsträger in die Wärmebehandlungsöfen befördert wo die Bauteile einer zweistufigen Wärmebehandlung mit Luftabschreckung unterzogen werden.

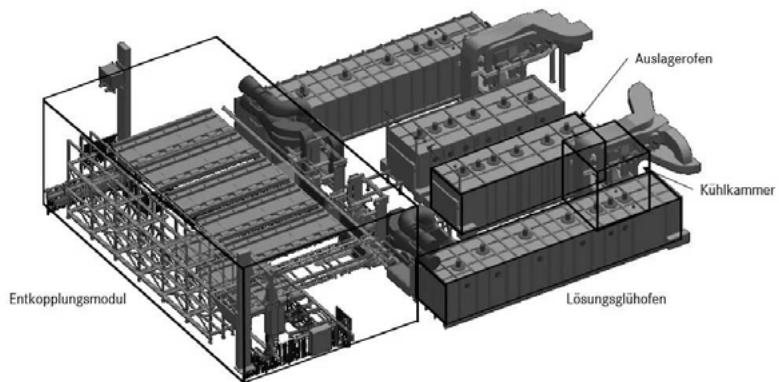


Bild 19: 3D-Darstellung Wärmebehandlung

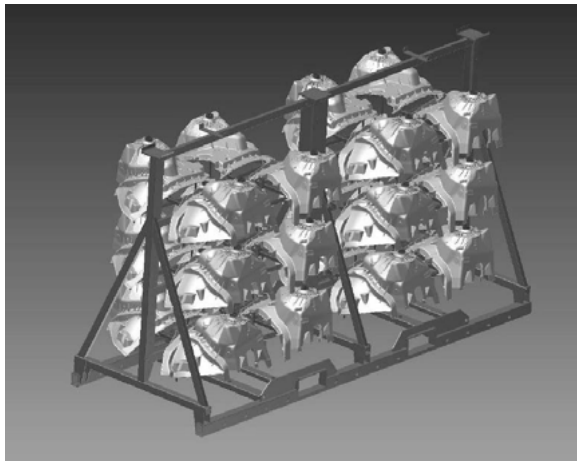


Bild 20: Ofenladungsträger Konsole Dämpferbein

Nach der Wärmebehandlung folgt das Richten der Bauteile. Die Dämpferbeinkonsolen werden in einer halbautomatischen Richtanlage gerichtet, das Richten der Federbeindome erfolgt in einer vollautomatischen Zelle. Anschließend werden die Bauteile noch fertig bearbeitet und verputzt. Zwischen den einzelnen Prozessschritten wird die Qualität anhand verschiedener Prüfmänge kontinuierlich überwacht.

Die Oberflächenbehandlung und das Setzen der Nietschrauben bei der Konsole Dämpferbein erfolgen dann bei externen Partnern bevor die Bauteile in das Zielwerk abgeliefert werden.

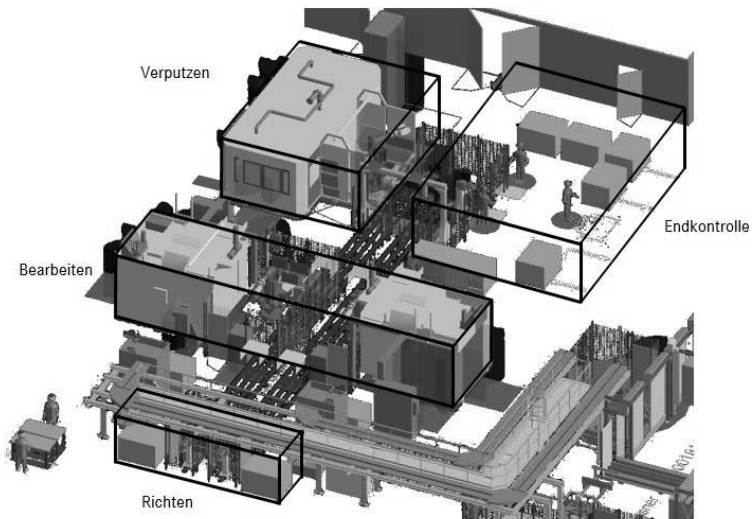


Bild 20: 3D-Darstellung Fertigungslinie Konsole Dämpferbein

6. Zusammenfassung

Die Dreiplatten-Werkzeugtechnologie hat sich in der Praxis für das Gießen der Federbeindome gut bewährt und wird daher auch bei anderen vergleichbaren Bauteilen für die Daimler AG eingesetzt. Dabei kommen sowohl Einfach- als auch Doppelgießformen zum Einsatz. Die folgende Übersicht zeigt die Baureihen, bei denen die Werkzeugtechnologie eingesetzt wird:

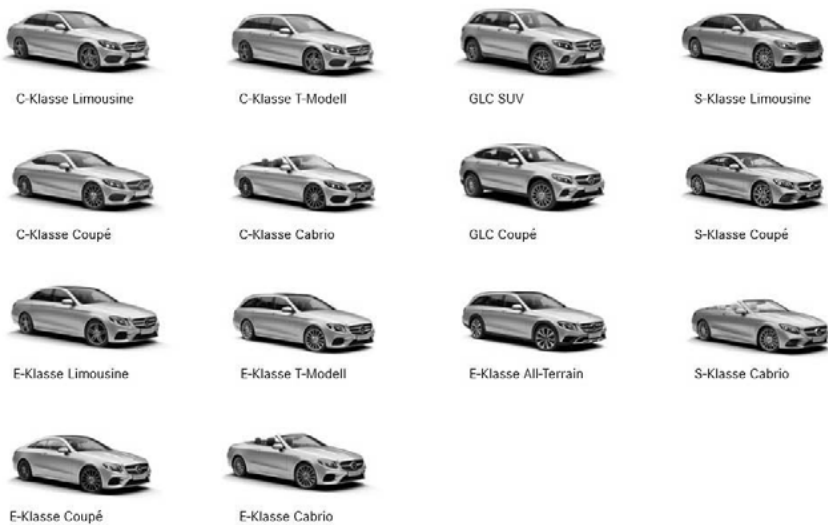


Bild 21: Mercedes-Benz Baureihen mit Federbeindomen in 3-Platten-Technologie

Mittlerweile hat sich gezeigt, dass der Fertigungsprozess des Federbeindomes für die C-Klasse insgesamt stabiler läuft als der Prozess bei der Produktion der Konsole Dämpferbein. Dies ist vor allem begründet in der unterschiedlichen Geometrie der Bauteile. Die Dämpferbeinkonsolen der S-Klasse neigen im Bereich des Zentralangusses zum Aufschrumphen auf die Auswerferseite was sich in erhöhter Verzugsneigung, sowie vermehrten Auswerferbrüchen widerspiegelt. Das Prozessfenster ist hier relativ klein, d.h. eine Veränderung der Randbedingungen oder Gießparameter hat auf die Entformung der Bauteile einen großen Einfluss bis hin zum Hängenbleiben der Bauteile auf der Eingießseite.

Das Verzugsverhalten der Bauteile unterliegt dabei über einen längeren Zeitraum betrachtet deutlichen Schwankungen, auch abhängig davon mit welcher Druckgussform die Bauteile produziert werden. Eine eindeutige Reproduzierbarkeit des Entformungsverhaltens ist bislang nicht gegeben.

Daher muss bei der Gestaltung der Bauteile bereits darauf geachtet werden dass die Entform-schrägen ausreichend bemessen sind und auch genügend Auswerfer in diesem Bereich gesetzt werden können.

Zur Reduzierung der Sprengfläche bietet dieses Verfahren aber auch großes Potential bei Fertigung anderer großflächiger Bauteile wie zum Beispiel Gehäuse für elektrische Antriebe oder Batteriewannen und wird daher in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen.

Intelligentes Gießwerkzeug im Dauerformguss mit Wärmerückgewinnung

Intelligent permanent mold with heat recovery

Dipl.-Ing. **Lionel Reiche**,
Volkswagen AG Kassel / ehem. GTK Uni Kassel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Martin Fehlbier**,
Fachgebiet Gießereitechnik GTK, Universität Kassel

Abstract

This paper presents exclusive results of a collaborative research project in cooperation with the industrial promotion circle "Innovative Casting Lightweight Construction" and Volkswagen AG Kassel. Within this project, a new smart and self-adjusting cooling concept for permanent molds named "Cool-Spray" has been developed. The aim of the concept is the reduction of cycle time, enhancement of the casting quality, reduction of thermal stresses (thermal-shock) for increasing die life, heat recovery and to establish a self-regulating system ready for the industry 4.0. The research results show a significant reduction of porosity for the permanent mold casting and a smaller but notable influence on the quality for the high-pressure-die casting (HPDC) process. However, due to the effective internal cooling a reduction of the cycle time of more than 20 % has been reached and an external cooling was no longer necessary.

1. Einleitung und Motivation

Die Gießereindustrie wird mit einer Vielzahl von Herausforderungen, wie der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, der Verbesserung der Gussteilqualität und der Einsparung von Energie und Ressourcen konfrontiert, [1]. Auch die Einführung der Industrie 4.0 zwingt zum Umdenken bestehender Fertigungskonzepte und zum Beschreiten neuer Wege in Bezug auf bestehende Maschinenteknik und der intelligenten Vernetzung von Anlagen. Das Konzept Cool-Spray soll dazu beitragen, die beschriebenen Herausforderungen zu bewältigen und durch intelligent vernetzte und autarke Formkühlkonzepte einen wichtigen Schritt Richtung Industrie 4.0 in der Gießereindustrie gehen [2].

2. Konzept Cool-Spray und Stand der Technik

Am GTK der Universität Kassel wurde in Kooperation mit dem Industrie-Förderkreis „Innovativer Gussleichtbau“ sowie der Volkswagen AG Kassel ein neuartiges, auf einer Formmaske basierendes Werkzeugkonzept entwickelt. Formmasken nutzen die Vorteile einer großen Oberfläche gepaart mit einer konturnahen Kühlung und sind Stand der Technik [2-4]. Die Form wird dabei, soweit es die Festigkeit und Einbausituation zulässt, von der Rückseite „ausgehöhlt“ (vgl. Bild 1) und das Bauteil so konturnah wie möglich wiedergegeben.

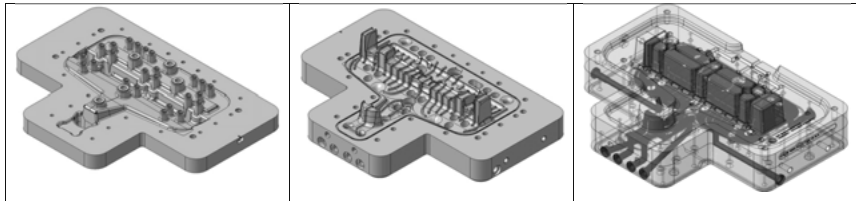


Bild 1: Beispiel einer Maskenkühlung anhand von zwei Werkzeughälften. Unterseite der Maske (links), Grundkörper (Mitte) und transparente Ansicht des gesamten Formeinbausatzes mit dargestellter Kühlung in blau (rechts), [2].

Das am GTK patentierte Konzept ist in Bild 2 dargestellt. Es nimmt den Grundgedanken der Maskenkühlung auf und entwickelt sie weiter. Das Formkonzept ist hierbei nur von einer Seite aufgezeigt und die andere Formhälfte (4) lediglich angedeutet. Die von oben oder unten in den Formhohlraum (5) eingefüllte Schmelze erstarrt innerhalb des Werkzeugs und gibt Energie in Form von Wärme an die Formhälften (4, 6) ab. In den Formhälften sind Temperatursensoren verbaut, die die einzelnen Formbereiche kontinuierlich überwachen. Wird eine spezifische, frei wählbare Temperatur überschritten, wird ein Kühlsignal an die Ventile (13) weitergegeben, die den Sprühprozess über die Düsen (10) einleiten. Dabei ist eine Unterteilung der Form in verschiedene individuell kühlbare Formsegmente möglich, die eine beliebige Temperaturverteilung innerhalb der Form zulässt. Der Kühlprozess besteht dabei aus einer intermittierenden (gepulsten) Sprühkühlung. Das Kühlmedium (z.B. Wasser) verdampft an der Rückseite der Form und entzieht ihr damit hohe Mengen an Energie in sehr kurzer Zeit. Der Wasserdampf steigt innerhalb des Temperierraums (25) auf und kondensiert an einem Wärmeübertrager (27). Die durch das kondensierende Wasser in den Sekundärkreislauf übertragene Energie wird über eine Pumpe gefördert und einer weiteren Verwendung (29), z.B. dem Heizen oder der Stromerzeugung, zugeführt. Das auskondensierte Wasser wird in einem Behälter (17) aufgefangen, abgekühlt (22) und gelangt über eine Pumpe wieder zum Sprühkreis (19).

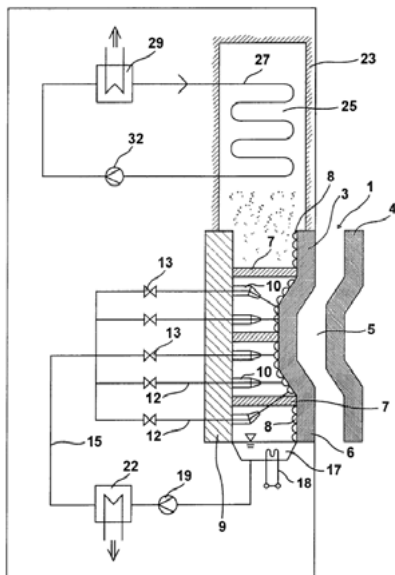


Bild 2: Prinzipskizze des am GTK entwickelten Kühlkonzepts nach [5].

2. Ziele und Vorteile des Konzepts

Das Kühlkonzept Cool-Spray beeinflusst zwei wesentliche Parameter der Wärmeübertragung: die Oberfläche und den Wärmeübergangskoeffizienten, (vgl. Gl. 1). Durch die Maskenbauweise der Form wird die Übertragungsfläche A deutlich größer als bei konventionellen Kühlmethoden wie Temperierbohrungen, Jet-Cooling, Impulstemperierung oder CO₂-Kühlung, welche bei der Wärmeübertragung auf die Bohrungsmantelflächen beschränkt sind. Außerdem stellt die Verdampfung eine hocheffiziente Form der Wärmeübertragung dar, bei dem bis zu zehnfach höhere Wärmeübergangskoeffizienten α (auch Heat Transfer Coefficient, HTC) als bei einphasige Wärmeübertragung erreicht werden, [6-8].

$$\dot{Q}_{kon} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

Die Erhöhung der Oberfläche und die Verbesserung des HTC's führen zu einer sehr effizienten Wärmeabfuhr und damit zu geringen Abkühl- und damit auch Taktzeiten, was die Wirtschaftlichkeit des Prozesses erhöht. Durch die gezielte Temperierung verschiedener Bereiche der

Form, z.B. von Hot-Spots, und der Möglichkeit die Erstarrungsrichtung gezielt zu beeinflussen, kann außerdem die Qualität des Bauteils gesteigert werden. Weitere Vorteile des Kühlkonzepts sind die teilweise Rückgewinnung der durch Schmelze zugeführten Energie, der Wegfall konventioneller Kühlgeräte sowie der autarken Regelung der Kühlung, die ein externes Eingreifen durch den Maschinenbediener überflüssig macht und damit mögliche Bedienfehler ausschließt. Darüber hinaus wird auch eine verlängerte Lebensdauer der Formwerkzeuge infolge reduzierter Thermospannungen während der Kühlphase angestrebt.

3. Umsetzung Cool-Spray in der Kokille

Das entwickelte Kühlkonzept kann sowohl im Schwerkraftkokillenguss als auch im Druckguss umgesetzt werden. Beide Verfahren bringen dabei individuelle Anforderungen mit sich. Eine wesentliche Herausforderung der Maskenbauweise ist die Festigkeit und der mögliche Verzug der Form, die eine präzise Voraussage der Belastungen unerlässlich macht. Um die Konstruktion der Kokille simulativ abzusichern, werden Festigkeitsberechnung durchgeführt, die den Verzug und die mechanische Beanspruchung der Kokille voraussehen. Die Konstruktion wird anhand der Simulationsergebnisse iterativ angepasst, um das Risiko eines Versagens so gering wie möglich zu halten. Neben Festigkeitssimulationen sind Gießsimulationen erforderlich, um das Kühlkonzept möglichst präzise vorhersagen zu können. Hierzu wird das Kühlkonzept in die Gießsimulation MAGMA® integriert. Um das Kühlverhalten, welches in der Gießsimulation in dieser Form nicht vorhanden ist möglichst exakt abbilden zu können, werden die benötigten Parameter (Abkühlverhalten, HTC's) mithilfe von separaten Grundlagenversuchen ermittelt.

Die entwickelte Kokille stellt eine Testform da, die anhand von drei Probengeometrien verschiedene Herausforderungen beim Schwerkraftguss abbildet. Ziel der Versuche ist die Reduzierung der Porosität in den nachspeisungsproblematischen Bereichen des Gussteils durch eine gezielte Erstarrung. In Bild 3 ist exemplarisch das Ergebnis einer Versuchsreihe dargestellt. Alle dargestellten Schliiff- und Simulationsbilder sind hierbei in der Mitte der Platte geschnitten. Die Probenplatte (Bild 3 links), angelehnt an einen realen Fall, weist einen starken Wandstärkenunterschied (Wandstärke im oberen und unteren Bereich knapp 4-fach so groß wie im mittlerer Bereich) und erschwert so die Nachspeisung des unteren Bereichs (rot umrandet). Die Simulation (Mitte links) zeigt bei konventioneller Kühlung erwartungsgemäß eine starke Porosität in diesem Bereich, der auch bei Proben mit konventioneller Kühlung auftritt (Mitte rechts). Mit dem neuen Kühlkonzept kann ein Temperaturgradient innerhalb der Kühlung und damit auch der Form eingestellt werden, der die Erstarrungsrichtung beeinflusst. Durch

eine gezielte und effiziente Kühlung des unteren Bereichs und einer minimalen Kühlung des dünnen, mittleren Bereichs kann die Nachspeisung aufrechterhalten und die Porosität drastisch reduziert werden (Bild 3 rechts).

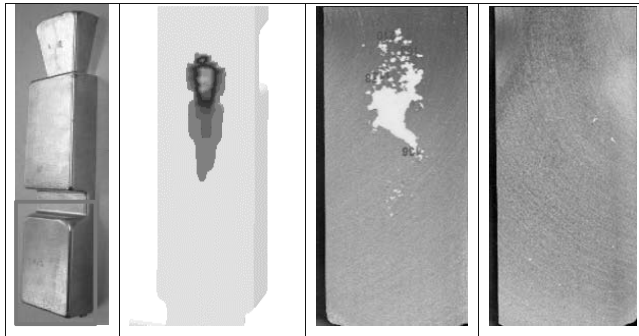


Bild 3: Geteilte Probenplatte mit Nachspeisungsproblematik durch großen Wandstärkenwechsel (links), Simulationsbild (Mitte links) und Schliiffbild mit konventioneller Kühlung (Mitte rechts) des markierten Bereichs weisen hohe Porosität auf. Gezielte Temperierung durch das Kühlkonzept reduziert die Porosität deutlich (rechts).

4. Umsetzung Cool Spray im Druckguss

Die Herausforderungen an die Formkonstruktion im Druckguss sind deutlich höher als bei der Kokille. Um das technische Risiko zu reduzieren, wird eine Testform entwickelt, die dazu dient, Erfahrungen für die Umsetzung in der Serienform zu sammeln. Aufgrund der höheren Kräfte im Druckguss ist eine präzise und zuverlässige Festigkeitssimulation unumgänglich, deren Durchführung deutlich komplexer ausfällt als die der Kokille. Für die sichere Auslegung der Form im Druckguss ist der Verzicht auf zusätzliche abstützende Strukturen nicht möglich, außerdem müssen die Abdichtungen der zahlreichen Auswerfer berücksichtigt werden. Grundlage der Festigkeitssimulation stellt immer die Dauerfestigkeit des Formwerkstoffs dar, der deutlich unter der Streckgrenze liegt.

Durch die deutlich schnellere Erstarrungsgeschwindigkeit beim Druckguss erweist sich die Umsetzung der gezielten Erstarrung als schwieriger. Trotzdem kann über eine gezielte Temperierung auch im Druckguss direkt Einfluss auf die Bauteilqualität genommen werden. In Bild 4 sind exemplarisch Bauteilausschnitte eines im Druckguss hergestellten Serienbauteils dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen anschnittfernen Bereich, der bei verschiedenen Tem-

perierungsvarianten deutliche Unterschiede im Bauteilbereich aufweist. Im linken Bild ist deutlicher Kaltfluss zu erkennen, im mittleren ist dieser stark reduziert und im rechten Bild tritt kein Kaltfluss mehr auf.

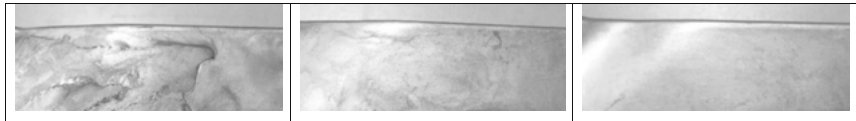


Bild 4: Angussferne Bauteilausschnitte eines Druckguss-Serienbauteils bei verschiedenen Temperierungsvarianten. Die gezielt einstellbare Temperierung mit dem neuen Kühlkonzept hat auch im Druckguss direkten Einfluss auf die Bauteilqualität.

Neben der gezielten Beeinflussung der Qualität, kann im Druckguss auch eindrucksvoll der wirtschaftliche Vorteil des Cool-Spray Konzepts nachgewiesen werden. Die effizientere Kühlung ermöglichte die Reduzierung des Sprühens auf reines Mikrosprühen und die Reduzierung der Taktzeit um mehr als 20%. Außerdem wurde die angestrebte Wärmerückgewinnung der durch die Schmelze in die Form eingebrachten Energie erreicht.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das in diesem Beitrag beschriebene Projekt hatte das Ziel, ein autarkes und intelligentes Kühlkonzept zu entwickeln und dieses im Schwerkraftguss sowie im Druckguss umzusetzen. Dabei sollte sowohl die Wirtschaftlichkeit gesteigert, die Qualität verbessert und ein Teil der Energie zurückgewonnen werden. Der Nachweis des Erreichens der Ziele anhand von wissenschaftlichen Analysen ist in diesem Projekt gelungen. Die Umsetzung der Formkühlung setzt dabei aber sowohl ein zusätzliches Know-how in Bezug auf die Auslegung des Maskenwerkzeugs, als auch zusätzliche Investitionen zur Fertigung der Formmaske voraus. Bei der gießtechnischen und konstruktiven Auslegung kann auf dem gesammelten Wissen aufgebaut werden, eine individuelle Betrachtung jeder neuen Form ist aufgrund der großen Vielfalt an Geometrien allerdings unumgänglich. Diese zusätzlichen Investitionen stehen einem hohen Potenzial in Wirtschaftlichkeits- und Qualitätssteigerung gegenüber, die sich bei den eindrucksvollen Taktzeitreduzierungen von über 20% gerade im Druckguss schnell amortisieren. Das Cool-Spray Konzept bietet außerdem die Möglichkeit, intelligent vernetzte Systeme in der Gießerei zu integrieren und damit einen wichtigen Schritt in Richtung Industrie 4.0 zu gehen. Darüber hinaus kann die Wärmerückgewinnung gerade bei der sehr energieintensiven Gießereiindustrie einen wichtigen Teil zur Minimierung des Ressourcen- und Energieeinsatzes beitragen.

Literaturverzeichnis

- [1] Fehlbier, M.: Herstellung, Charakterisierung und Verarbeitung teilflüssiger metallischer Werkstoffe am Beispiel verschiedener Aluminium- und Magnesiumlegierungen. RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2003
- [2] Fehlbier, M.; Reiche, L.: Trends und Herausforderungen für die deutsche Gießerei-Industrie aus Sicht der akademischen Forschung - Werkzeugtemperierung in der Industrie 4.0. Gießerei-Special 1 (2016) S.30-37
- [2] Findeisen, S.: Zykluszeitreduzierung beim Druckgießen. TU Freiberg Diss. 2015
- [3] Findeisen, S.; Schulze Niehoff, H.: Optimierung von Druckgießwerkzeugen. Giesserei 5 (2014) S. 64–71
- [4] DE102005030678A1
- [5] DE 10 2014 001 563 B4
- [6] Chen, R.-H.; Chow, L. C.; Navedo, J. E.: Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling. International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 19 S. 4033–4043
- [7] Ebadian, M. A.; Lin, C. X.: A Review of High-Heat-Flux Heat Removal Technologies. Journal of Heat Transfer 133 (2011) 11 S. 110801-1-110801-11
- [8] Smakulski, P.; Pietrowicz, S.: A review of the capabilities of high heat flux removal by porous materials, microchannels and spray cooling techniques. Applied Thermal Engineering 104 (2016) S. 636–646

Numerische Grundsatzuntersuchungen der Abkühlung sowie der Verzüge bei der Spray-Kühlung einer Platten-geometrie dünner Wandstärke

Evaluierung des Einflusses verschiedener Materialien sowie unterschiedlicher Injektoren auf das thermische Verhalten

Numerical Investigation of the cooling behavior and distortions during the Spray Cooling of a low-thickness plate geometry

Evaluating the influence of different materials and injectors with different characteristics onto the thermal behavior

Dr.-Ing. **Sascha Seidl**, Dr.-Ing. **Carsten Schmalhorst**,
Dipl.-Ing. **Alexander Oliva**, AVL Deutschland GmbH, München;
Dipl.-Ing. **Fabian Uhlig**, AVL Schrick GmbH, München;
Dipl.-Ing. **Ingolf Thiele**, AVL Deutschland GmbH, Wolfsburg

Kurzfassung

Eine Optimierung der Temperierung von Druckgusswerkzeugen gilt heutzutage als unabdingbare Voraussetzung für einen erfolgreichen Fertigungsprozess. Dabei steht neben erfolgreicher und verlustfreier Durchführung des eigentlichen Gießprozesses vor allem auch ein schonender Umgang mit dem Gießwerkzeug im Fokus. Mit Hilfe einer Spraykühlung induziert durch mehrere, angemessen positionierte Injektoren soll versucht werden, eine bedarfsgerechtere und bauteiloptimierte Kühlung zu erreichen. Die Kühlung ist dabei so zu gestalten, dass eine gezieltere Erstarrung sowie verbesserte Nachspeisung durch Minimierung der Anzahl von Kaltfließstellen ermöglicht und gleichzeitig die Werkzeuglebensdauer signifikant erhöht wird. Im Rahmen dieses Beitrages soll dazu aufbauend auf einer einfachen aber repräsentativen Geometrie eine Methodik zur numerischen Simulation von Spray-induzierter Kühlung vorgestellt werden. Die Simulation beschreibt damit den eigentlichen, durch Auftreffen der Spray-Wolke auf das Bauteil, bewirkten Abkühlprozess und die damit verbundene Verzugsanalyse

des Testobjektes. Die Gesamtsimulation teilt sich somit in zwei wesentliche Schritte: der erste Teilschritt umfasst die dreidimensional aufgelöste Abkühlsimulation der Testgeometrie. Die sich daraus resultierenden Temperaturfelder im Bauteil dienen als Eingabegrößen für den zweiten Simulationsschritt, der die Berechnung der Verzüge nachstellt. Wesentlicher Bestandteil des Beitrages stellt weiter eine Parametervariation und deren numerische Betrachtung dar: So wird der Einfluss unterschiedlicher Feststoffe des zugrundeliegenden Bauteils auf dessen Abkühlverhalten sowie die sich einstellenden Verzüge behandelt. Ferner sollen verschiedene Injektoren mit unterschiedlichen Spray-Charakteristika studiert werden und deren Einfluss auf die thermische Behandlung der Geometrie aufgezeigt werden. Eine kurze Zusammenfassung der erzielten Resultate schließt diesen Beitrag ab.

Abstract

An optimized tempering of pressure die casting tools is nowadays an indispensable prerequisite for a successful manufacturing process. The focus lies therefore not only on an effective and nondissipative casting process but also on a gentle acquaintance with the cast tool. With the aid of spray cooling induced by several adequate positioned injectors, a cooling should be realized which is suitable and perfectly fitted to the geometrical situation. Therefore, on the one hand side a more selective solidification as well as improved feeding by a minimized number of creep regions shall be enabled. On the other hand, the tool life span shall be increased significantly. In the framework of this contribution a methodology for the numerical simulation of spray-induced cooling shall be presented based on a simple but representative geometry. The simulation describes the actual cooling process, induced by the impacting spray cloud onto the hot component surface and furthermore the jointed distortions of the test object! The entire simulation is thus segregated into two main simulation steps: The first sub-step comprises the three-dimensional cooling simulation of the test object. The achieved temperature field inside the geometry is then utilized as input data for the second simulation sub-step, which deals with the distortion analysis. An essential element of this contribution depicts a great variation of different parameters and their numerical contemplation. Therefore, the influence of different material data for the underlying test object on its cooling behavior and furthermore based on that the resulting distortions shall be discussed. In addition, different injectors with varied spray characteristics shall be studied upon their influence onto the thermal treatment of the geometry. A short summary concerning the obtained results shall end this contribution.

1. Motivation

Die Automobilindustrie steht vor neuen großen Herausforderungen. Die zunehmende Verschärfung in der Emissionsgesetzgebung, die Notwendigkeit zur Senkung des CO₂ Ausstoßes und die damit einhergehende Elektrifizierung von Fahrzeugen erfordern neue innovative Lösungen von Herstellern und Zulieferern. Bild 1 zeigt den Auszug aus einer Studie über die Trends und Entwicklungen in den kommenden Jahren.

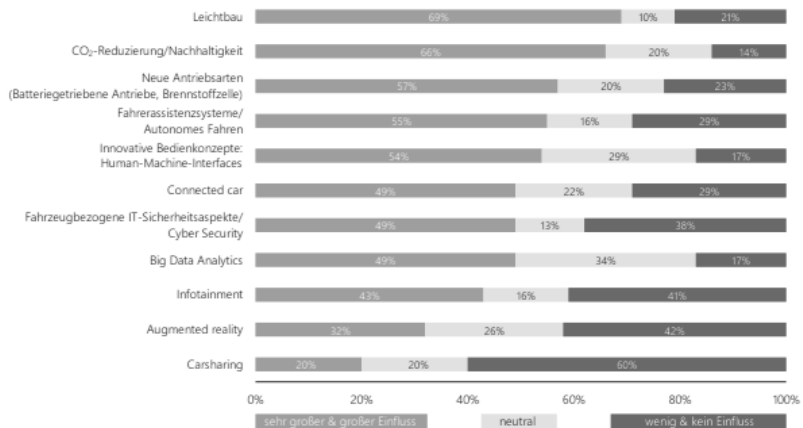


Bild 1: Trends und Entwicklungen in der Automobilindustrie [1]

Die drei wichtigsten Trends betreffen indirekt auch die Giessereiindustrie. Neben direkten Maßnahmen zur Verbesserung und Optimierung des Fahrzeugantriebs spielt Leichtbau für die Reduzierung des Fahrzeuggewichts eine sehr wichtige Rolle. Aluminium wird daher aufgrund seines geringen Gewichts zunehmend auch bei Motor- und Getriebekomponenten verwendet. Die aktuelle Entwicklung in der Automobilindustrie birgt jedoch auch einige Unwägbarkeiten für die Giessereiindustrie. So geht die Zahl der verkauften Dieselfahrzeuge zurück. In der Karosserieentwicklung treten neue Werkstoffe wie CFK ins Rampenlicht. Im Zuge dessen wurde beispielsweise auf der letzten Konferenz „Gießen von Fahrwerks- und Karosserie-komponenten“ 2016 in Kassel eine Hybridkarosserie bestehend aus Aluminium und CFK vorgestellt.

Andererseits bieten sich für die Giessereiindustrie auch neue Chancen. Typische Bauteile aus Aluminium sind Gehäuse für Elektromotoren und Hybridgetriebe sowie gekühlte Batteriekästen, die letztendlich gegenüber anderen Werkstoffen bezüglich der Crashesicherheit erhebliche Vorteile bieten. Durch die Herstellung dieser neuen Bauteile und dem zu erwartenden Anstieg

der Mobilität in den kommenden 10 Jahren ergeben sich letztendlich mehr Chancen als Risiken.

Allerdings muss der Produktionsprozess für Druckgussbauteile verbessert und deutlich effizienter gestaltet werden. Die Kühlung von Druckgusswerkzeugen bietet hier einen guten Ansatzpunkt. Als Alternative zur relativ ineffizienten Kühlung durch in das Werkzeug integrierte Kühlkanäle und deren komplizierte und teure Herstellung, bietet die Spraykühlung in Bezug auf den Wärmeübergang die deutlich effizientere Lösung. Darüber hinaus kann sie wesentlich gezielter eingesetzt werden. So bietet sich zum Beispiel die Möglichkeit, die Spraydüse an jedem beliebigen Ort an der Werkzeugoberfläche gezielt zum Einsatz zu bringen. Um die Vorteile einer Spraykühlung genauer bewerten zu können, können neben grundlegenden Messungen CFD-Simulationen dazu beitragen die komplexe Physik des Wärmeübergangs besser zu verstehen. Der Einfluss des Wärmeübergangs auf die Spannungsverteilung wird ebenfalls im Rahmen von FEM Berechnungen untersucht. Der grundlegende Modellansatz soll im Folgenden vorgestellt werden.

2. Modellierung

Die hier verwendete Software AVL FIRE™ ist ein Multi-Purpose CFD Tool zur numerischen Simulation von dreidimensionalen Strömungsfeldern hauptsächlich für innermotorische Anwendungen bzw. Aufgabenstellungen im Automotivebereich [2]. Neben dem Haupteinsatzgebiet der Verbrennungs- sowie Ladungswechselsimulation ist vor allem die Simulation des Conjugate Heat Transfers, sprich des Wärmeübergangs zwischen fluidführenden Domänen und Festkörpurbereichen, eine der wesentlichen Stärken des Tools.

Daneben dient die Software ebenfalls zur Berechnung von Abgasanlagen. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist ein geeignetes Modell zur Simulation von Sprühnebeln, was im Falle von AVL FIRE™ mittels eines Lagrangian Ansatzes realisiert wurde [3]. Mit diesem Ansatz lässt sich die Bewegung eines jeglichen im System befindlichen Tropfens innerhalb des eingebrachten Sprays simulieren und nachvollziehen. Geeignete Verdampfungs- wie auch Aufbruch- bzw. Zerfallsmodelle der jeweiligen in der Spraywolke vorhandenen Tropfen, sowie ein entsprechendes Wandfilmmodell runden diesen Ansatz ab. Das Wandfilmmodell ermöglicht weiter neben der eigentlichen Filmbildung auch dessen Transport sowie der Filmverdunstung innerhalb festgelegter Parameterbereiche.

Die Wandfilmbildung wird im Wesentlichen durch die Tropfen-Wand-Interaktion beschrieben, welche im entscheidenden Maße von der Temperatur der angesprützten Oberfläche bzw. des

jeweiligen Festkörpers abhängt [4]. Die umgebende Luft, in der sich das Spray befindet, wird als zusätzliche Gasphase mitmodelliert und gemäß der Eulerschen Betrachtungsweise simuliert, wobei hier entgegen des Langrangian Ansatzes auf eine raumfeste Betrachtungsweise mit feldbezogenen orts- und zeitabhängigen Größen gewechselt wird. Die stattfindende Interaktion zwischen Spraytropfen und Gasphase wird hinsichtlich Impuls-, Energie- und Massenaustausch berücksichtigt.

3. Experimenteller bzw. numerischer Aufbau

Das numerische Setup ist an einem experimentellen Versuchsaufbau angelehnt. Dazu wird im ersten Schritt eine Kupferplatte der Stärke $l = 1 \text{ mm}$ und Durchmesser $D_{\text{Platte}} = 150 \text{ mm}$ verwendet. Diese wird isoliert in einen Metallrahmen eingebettet. Die Isolierung erfolgt, um eine Wärmeleitung von der eingespannten Platte auf den Rahmen und vice versa zu verhindern.

Für die numerischen Simulationen werden gekoppelte Rechnungen durchgeführt, d.h. die Fluid- bzw. Gasphase, in der auch die Sprayausbildung stattfindet, wird als eigenes Rechenetz mit eigener Rechendomäne gestaltet. Dieses besteht aus einem Rechenetz zu ca. 324000 Netzzellen, basierend auf einer polyedrischen Vernetzung. Demgegenüber befindet sich das entsprechende Rechenetz der Testgeometrie, welches ebenfalls ca. 113000 Rechenzellen vom polyedrischen Basistyp aufweist. Beide Rechendomänen sind über ein sogenanntes AVL Code Coupling Interface miteinander verbunden [5]. Dieses regelt den Austausch von Temperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten von Fluid- zu Solidbereich und vice versa. Während im Fluidbereich neben der Tropfenbewegung zusätzlich die Strömungsgleichungen für die Gasphase mitberechnet werden, kommt im Solidbereich allein die Wärmeleitung zum Tragen, weshalb dort nur die Energiegleichung gelöst wird.

Diese Basis-Konfiguration verwendet weiter einen Spray zur Kühlung der erhitzten Platte mit folgender Charakteristik: Dem dabei verwendeten Injektor liegt eine gepulste Taktung zugrunde, d.h. die Düse wird intervallartig geöffnet und der Spray wird während dieser Öffnungsintervalle aus der Düse gesprüht. Der Spray-Durchmesser ist mit $D_{\text{Spray}} = 1.45 \text{ mm}$ sowie einem Volumenstrom von $V = 3.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ gewählt. Mit einem Öffnungswinkel von 100° , d.h. Half Outer Cone Angle (HOCA) = 50° und einer Partikelstartgeschwindigkeit von $v = 20 \text{ m/s}$ am Düsenaustritt ergibt sich zusammen ein Sauterdurchmesser von $\text{SMD} = 470 \text{ }\mu\text{m}$. Die Düse selbst befindet sich 18 mm entfernt zur Plattenmitte und sprüht normal auf diese auf, siehe Bild 1.

In der Basis-Konfiguration besteht die Platte aus gängigem Kupfer mit einer Dichte von $\rho = 8960 \text{ kg/m}^3$, einer thermischen Leitfähigkeit von $\lambda = 385 \text{ W/mK}$ sowie einer Wärmekapazität von $c_p = 400 \text{ J/kgK}$. Aus diesen Größen ergibt sich damit eine Biot-Zahl von $Bi = 0.026 [-]$ sowie eine Fourier-Zahl von $Fo = 2.148 [-]$. Die Biot-Zahl gibt das Verhältnis von Wärmeleitwiderstand des besprühten bzw. gekühlten Körpers zu Wärmeübergangswiderstand der umgebenden Luft wieder. Demgegenüber beschreibt die Fourier-Zahl das Verhältnis der Wärmetransportrate zu Wärmespeicherungsrate für ein Sprayintervall [6]. Biot-Zahl und Fourier-Zahl sind dimensionslose Kennzahlen, die zusammen eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Materialien sowie deren Abkühlverhalten zulassen. Die wesentlichen, oben aufgeführten Parameter sind in Tabelle 1 sowie Tabelle 2 noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

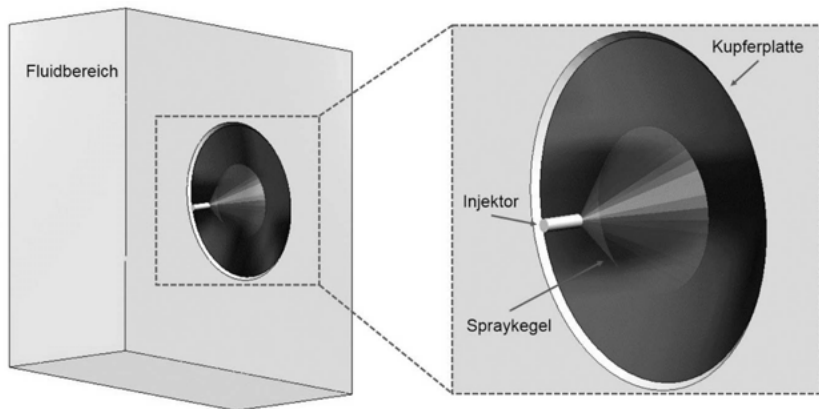


Bild 1: Numerisches Setup des experimentellen Versuchsaufbaus

Die so beschriebene Basis-Konfiguration wird durch weitere Varianten ergänzt. Dazu zählen die ersten beiden Varianten (Variante A und B) bei denen lediglich die Materialdaten des Festkörpers geändert werden, siehe dazu auch Tabelle 1 und 2. Es kommt dabei neben AL7050, einer gängigen Aluminiumlegierung für Gussbauteile wie beispielweise Zylinderköpfe [7], auch Serienstahl (AISI 4000, [8]) zum Einsatz. Der restliche Versuchsaufbau und somit die numerischen Einstellungen bleiben somit für diese beiden Varianten gleich.

Tabelle 1: Wesentliche Parameter der Basiskonfiguration sowie ihrer Varianten

AVL FIRE™ v2017.1		Basismodell	Varianten			
			A	B	C	D
Scheibe	Material	Kupfer	Alumi- nium	Stahl	Kupfer	Kupfer
	Durchmesser	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
	Dicke	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
Spray	Durchmesser	1.45 mm	1.45 mm	1.45 mm	1.45 mm	1.45 mm
	Volumen- strom	3.3 cm³/s	3.3 cm³/s	3.3 cm³/s	3.3 cm³/s	3.3 cm³/s
	SMD	470 µm	470 µm	470 µm	470 µm	470 µm
	HOCA	50°	50°	50°	30.8°	50°
	Startgeschw.	ca. 20 m/s	ca. 20 m/s	ca. 20 m/s	ca. 20 m/s	ca. 40 m/s

Bei den weiteren Varianten C und D werden die Spraycharakteristika angepasst: Variante C weist dabei einen konzentrierteren Spraykegel auf, d.h. der Radius der benetzten Fläche wurde halbiert. Es ergibt sich damit ein Half Outer Cone Angle von HOCA = 30.8°. Die besprühte Platte erfährt damit ausgehend vom Mittelpunkt eine erhöhte, durch die Zentrierung des Sprays, hervorgerufene Kühlung. Die äußeren Bereiche werden dadurch weniger stark gekühlt. Bei der Variante D hingegen bleiben bis auf die Einspritzrate alle Parameter zur Basis-Konfiguration gleich. Die Einspritzrate wird dahingehend umgeändert, so dass sich die Startgeschwindigkeit der Tropfen verdoppelt. Um eine gleichbleibende Einspritzmasse beizubehalten müssen dabei dann die Einspritzintervalle des Injektors um die Hälfte reduziert werden.

Tabelle 2: Materialdaten der Versuchsscheiben

	Kupfer (Basis)	Aluminium (AL7050, [5])	Stahl (AISI 4000, [6])
Dichte [kg/m ³]	8960	2830	7850
Therm. Leitfähigkeit [W/mK]	385	157	44.5
Wärmekapazität [J/kgK]	400	860	475
Biot-Zahl	0.026	0.064	0.234
Fourier-Zahl	2.148	1.290	0.228

4. Ergebnisse

Die hier vorgestellte Simulationemethode umfasst mehrere numerische Berechnungsvorgänge, welche in der Software AVL FIRE™ durch verschiedene, zum Strömungslöser hinzuschaltbare Module realisiert werden können. Die in das System eingebrachten Partikel werden durch das entsprechende, weiter oben beschriebenen Langrangian Spray-Modul erzeugt und deren Bewegung im System mit jeweiliger Interaktion zur umgebenden Gasphase berechnet. Beim Auftreffen der so dargestellten Spraywolke an festen Hindernissen wie Wänden oder im vorgestellten Beispiel an der Testgeometrie wird eine geeignete Tropfen-Wand-Interaktion ausgeführt. Diese kann abhängig vom Einschlagswinkel, Wandtemperatur und Flüssigkeitseigenschaften, wie auch von der zum Zeitpunkt des Auftreffens vorliegenden Tropfengeschwindigkeit zum Abprallen des Tropfens von festen Grund zurück in den Fluidbereich bis hin zur Bildung eines Wandfilms führen. Sofern Wandfilm gebildet wird, berechnet das Wandfilmmodul dessen physikalische Eigenschaften, wie Ansammlung, Abdampfung, Temperaturen oder auch Bewegung. Die Einbringung wie auch Ausbreitung der Spraywolke in das Fluidsystem sowie dessen Interaktion mit der Plattengeometrie kann in Abbildung 3 beobachtet werden. Da es sich um einen gepulsten Injektor wie weiter oben beschrieben handelt, wird in der Bilderfolge lediglich die erste Eindüsung und deren Sprayausbreitung dargestellt.

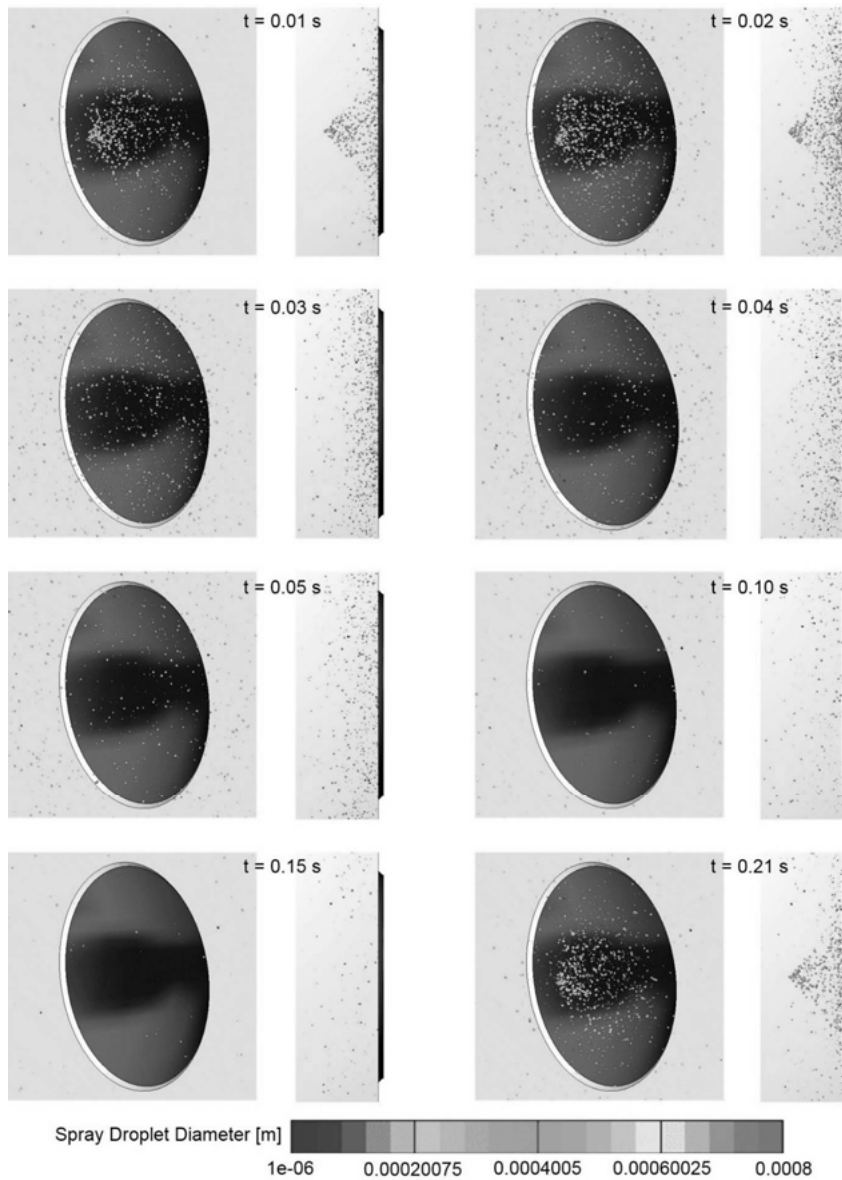


Bild 3: Ausbreitung der Spraywolke zu unterschiedlichen Zeitpunkten

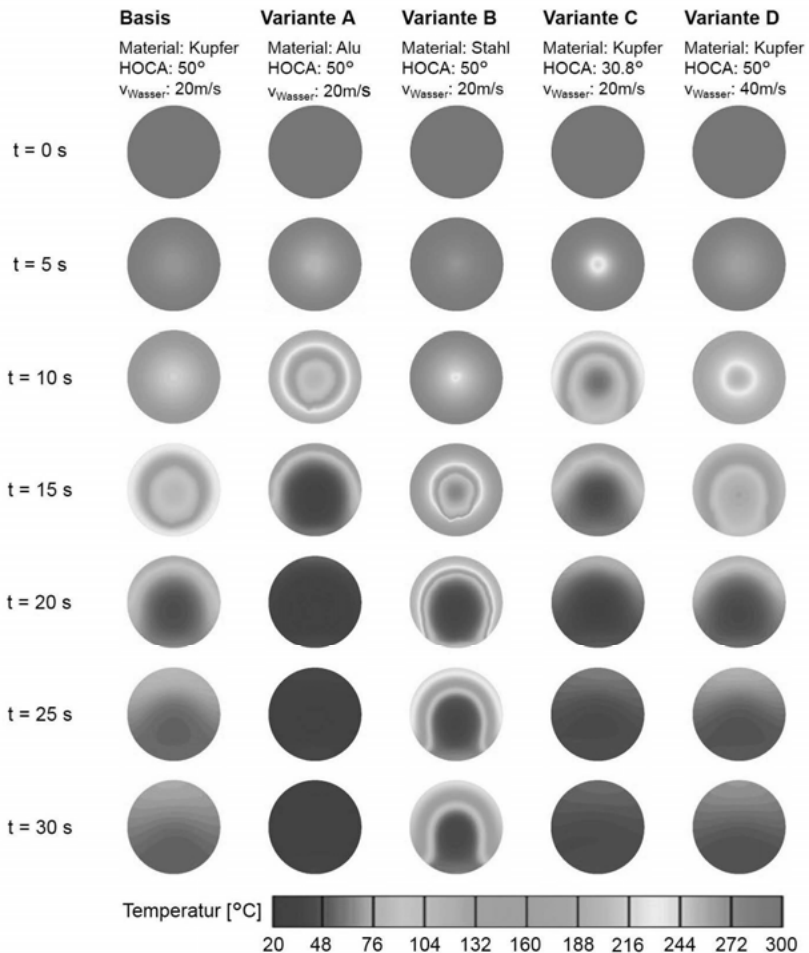


Bild 4: Zeitliche Temperaturverläufe auf den Scheiben in der Basis-Konfiguration und ihren Varianten A-D (dargestellt ist die angesprühte Seite)

Bei einer Taktung von $f = 5\text{ Hz}$ findet die nächste Eindüsung somit zum Zeitpunkt 0.2 s statt. Das dargestellte Attribut ist der Durchmesser des jeweiligen Partikels, welcher sich auf seiner Bewegungsbahn im Lauf der Zeit verständlicherweise ändert. Es sei an dieser Stelle ange-

merkt, dass die in Abbildung 3 dargestellte sich ausbreitende Spraywolke für die Basis-Konfiguration gilt. Da lediglich die Spraycharakteristik für Variante C geändert wurde, ist die somit in Bild 3 dargestellte Spraywolke für alle weiteren Varianten mit Ausnahme von Variante C gültig.

Aufgrund der kühlenden Wirkung der Spraywolke und ihrer Einzeltropfen kühlt die Platte nach gewisser Zeit merklich ab. Wie in Abbildung 4 aufgezeigt, kühlen die Basis-Konfiguration sowie ihre Variationen dazu immer von der Mitte nach außen hin ab. Aufgrund der eingestellten Gravitationskraft wandert der an der Platte haftende Flüssigkeitsfilm nach unten, so dass die untere Hälfte der Plattengeometrie gegenüber der oberen Hälfte zuerst abkühlt. Dies lässt sich auch in allen dargestellten Berechnungen, jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten, nachvollziehen.

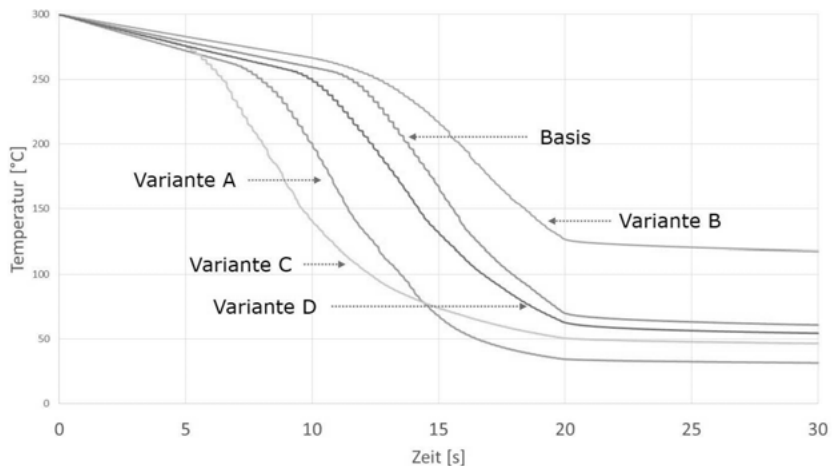


Bild 5: Zeitliche Temperaturkurven der Scheiben in der Basis-Konfiguration und ihren Varianten A-D (gemittelt über das gesamte Solid)

Werden die Basis-Konfiguration zu den Varianten dazu in Beziehung gesetzt, so lässt sich erkennen, dass zum einen das zugrundeliegende Material für die Platte einen wesentlichen Einfluss auf die Abkühlung des Testobjekts hat. Während Variante A mit AL7050 als verwendetes Material schneller als die Basis-Konfiguration abkühlt, hat Variante B mit einer Platte aus Stahl zum Ende der Simulationszeit von $t = 30$ s noch keine durchgängige und gleichmä-

ßige Abkühlung erfahren. Diese Beobachtung deckt sich auch mit den in Tabelle 2 angegebenen Kennzahlen in Form von Biot- und Fourier-Zahl. Während für die Basis-Konfiguration und die Variante A beide Kennzahlen im ähnlichen Bereich vorliegen, unterscheiden sich die jeweiligen Zahlen zur Variante B jeweils um den Faktor 0.1 bzw. 10 im Vergleich zur Basis-Konfiguration.

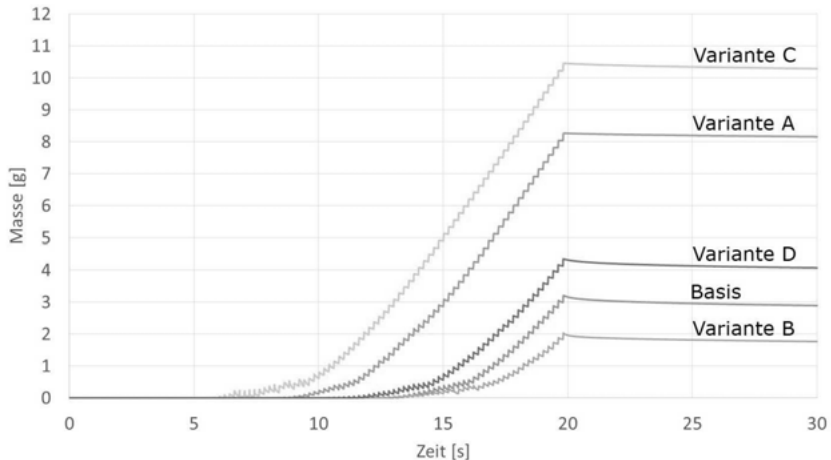


Bild 6: Sich einstellende Wandfilmmasse auf der angesprühten Seite der Scheiben in der Basis-Konfiguration und ihren Varianten A-D (gemittelt über das gesamte Solid, aufgetragen über die Zeit)

Weiter hat die Variation der Spraycharakteristiken einen hohen Einfluss auf das Abkühlverhalten der Kupferplatte. Obwohl Variante C mit ihrem mehr zentrierten Spray in Form des verringerten Öffnungswinkels auf ein weitaus ungleichmäßigeres Abkühlen des Testobjektes vermuten lässt, zeigt diese Variante das mit Abstand schnellste Abkühlverhalten von Basis-Konfiguration und Variante C und D. Werden vielmehr die weiteren Varianten A und B in den Vergleich miteinbezogen, so stellt sich Variante C dennoch als die am schnellsten abkühlende Variante dar. Die schnelle Abkühlung im Plattenzentrum aufgrund des zentrierten Sprays wird durch die sehr gute Wärmeleitung des Kupfers an die Ränder der Platte abgeführt, so dass die Randbereiche ebenfalls schnell kühlen. Variante D zeigt im Gegensatz dazu ein zur Basis-

Konfiguration ähnliches Abkühlverhalten. Die Änderung der Taktrate hat damit einen geringen Einfluss auf die Abkühlung. Die über die Gesamtgeometrie gemittelten zeitlichen Temperaturverläufe sind in Abbildung 5 abgebildet.

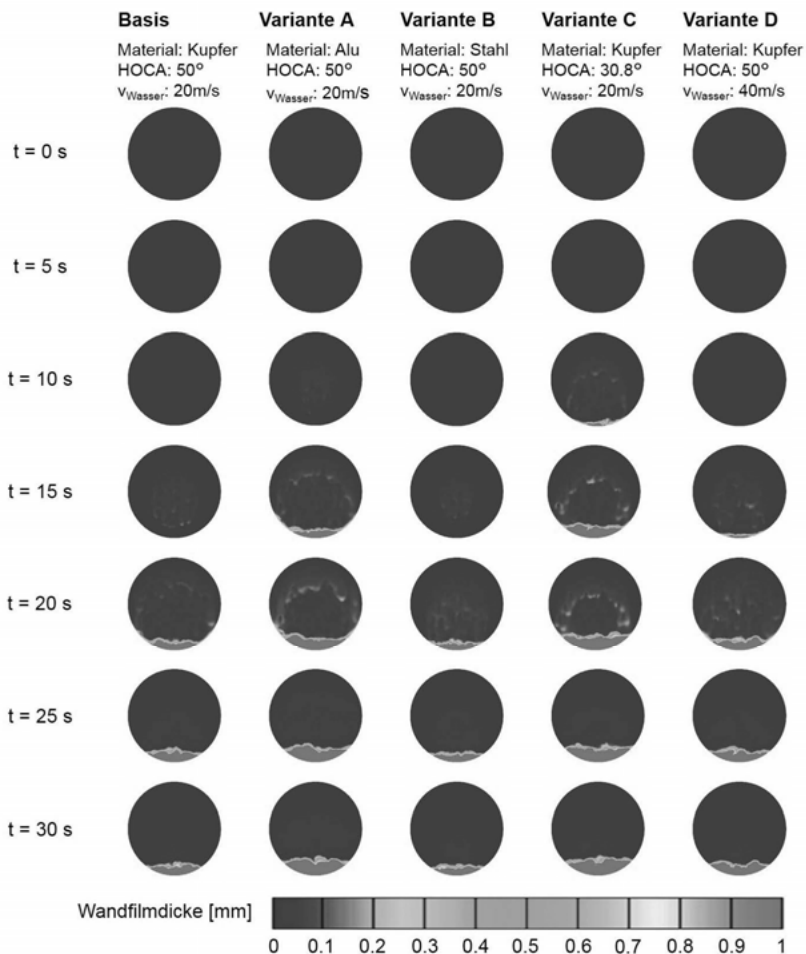


Bild 7: Zeitliche Wandfilmverteilung auf den Scheiben in der Basis-Konfiguration und ihren Varianten A-D (dargestellt ist die angesprühte Seite)

So zeigt sich zum einen, dass im Vergleich zur Basis-Konfiguration diejenige Variante mit der schnellsten und auf der Zeitskala frühesten Abkühlung die Variante C darstellt. Demgegenüber zeigt die Variante B das schlechteste Abkühlverhalten, gemessen am Gradienten sowie Abknickzeitpunkt der Temperaturkurve. Weiter ist eindeutig ersichtlich, dass nicht alle Varianten zu einem einheitlichen Temperaturniveau abkühlen.

Hier zeigt sich eine Spreizung von tiefstem Temperaturniveau (Variante A) zu höchstem Niveau (Variante B) von in etwa $\Delta T = 85^\circ$.

Die weiter oben beschriebene Ausbildung eines Wandfilms, welcher aufgrund der auf die Platte aufgespritzten Tropfen in Abhängigkeit des Auftreffwinkels, der Aufprallgeschwindigkeit sowie in entscheidendem Maße in Abhängigkeit der Temperatur des Solids entsteht, kann in Abbildung 7 untersucht werden. Erneut spiegelt sich in diesen diskreten Aufnahmen das für die Temperaturverläufe bereits aufgezeigte Kühlverhalten. Es lässt sich eindeutig ausmachen, dass sich für die Varianten A und C bereits zum Zeitpunkt $t = 10$ s Wandfilm ausbildet. Dieser ist weiter für die Variante C bereits stärker ausgeprägt als für Variante A. Bei den übrigen Varianten, Basis-Konfiguration sowie Variante B und C, zeigt sich die Wandfilmentstehung erst ab $t = 15$ s. Alle Rechnungen haben gemein, dass ab ca. $t = 20$ s der Wandfilm im etwa oberen Fünftel der Plattengeometrie bereits abgedampft bzw. abgeflossen ist und sich im entsprechend unteren Fünftel der Platte sammelt. Dies deckt sich auch mit der Beobachtung, dass bei sämtlichen Simulationen, die unteren Plattenbereiche schneller abkühlen als die jeweiligen oberen Bereiche.

Eine aufsummierte Darstellung der Wandfilmmasse über die Zeit wird in Abbildung 6 aufgezeigt. Interessant ist hierbei, dass sich wieder die Varianten B und C die Extrema unter sich aufteilen, d.h. Variante B bildet am Ende der Einspritzung denjenigen Wandfilm mit der von allen Varianten geringsten Wandfilmmasse aus, während Variante C entsprechend denjenigen mit der größten Masse aufweist. Diese Beobachtung deckt sich mit den in Abbildung 7 aufgezeigten Konturplots. In Abbildung 8 sind die zeitlichen max. absoluten Hauptspannungsverläufe, sowie Deformationen aus der nachgeschalteten FE-Analyse dargestellt. Der Spannungs- und Deformationszustand ergibt sich aus der örtlichen Temperaturverteilung, sowie dem viskoplastischen Materialverhalten.

Die mittige Kühlung des Bauteils bewirkt zunächst eine Indizierung von Zugspannungen in der Mitte und Druckspannungen im Randbereich der Platte (je nach Variante zwischen 5 s und 20 s). Anschließend erfolgt eine auch für Abschrecksimulationen typische Spannungsumkehr

im Bauteil, sodass am Ende der Abkühlphase Druckspannungen im Inneren und Zugspannungen im Äußeren dominieren. Die Höhe, Verteilung, sowie zeitliche Entwicklung der Spannungen unterscheidet sich je nach Variante deutlich. Allen Varianten ist eine Restspannung (Eigenspannung) am Ende des Kühlvorganges gleich, was auf eine Plastifizierung des Materials hinweist.

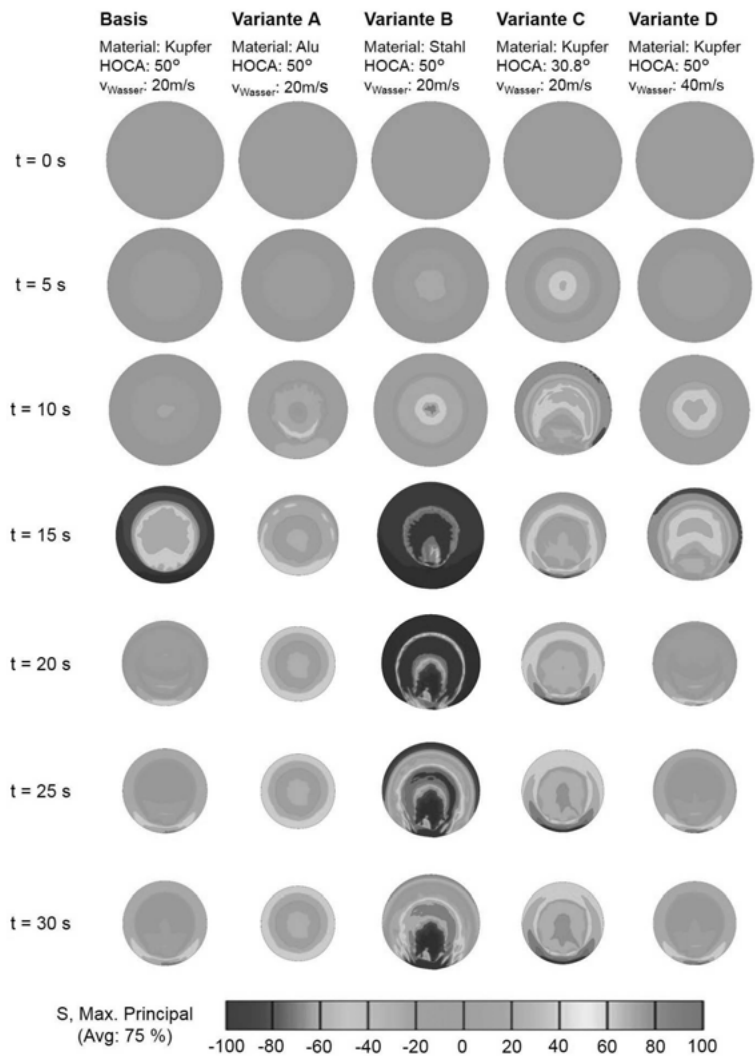


Bild 8: Zeitlicher Verlauf der max. absoluten Hauptspannungen, sowie zugehörige Deformationen (Skalierungsfaktor 100)

Die akkumulierten plastischen Dehnungen, die max. absoluten Hauptspannungen, sowie der zugehörige Deformationszustand sind im Detail für Variante C am Ende der Abkühlphase in Abbildung 9 dargestellt.

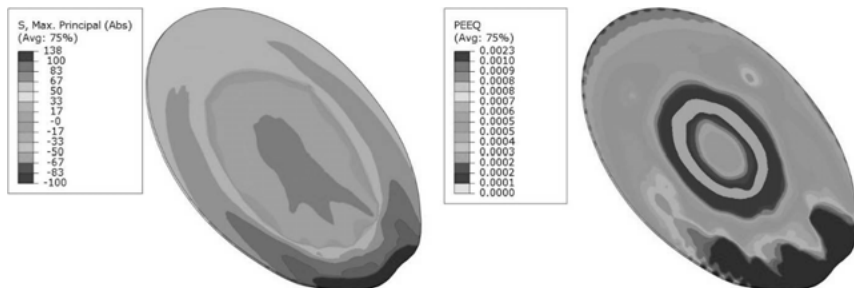


Bild 9: Akkumulierte plast. Dehnungen, max. absoluten Hauptspannungen, sowie zugehörige Deformationen (Skalierungsfaktor 500) am Ende der Abkühlphase

Die plastischen Dehnungen bewegen sich im Bereich von 0.2 % am unteren Rand des Bauteils, der mit dem Bereich der Wandfilmbildung aus der CFD-Simulation korreliert. Bezugnehmend auf eine mögliche Werkzeugkühlung ist dieses Verhalten unzulässig da die Maßhaltigkeit (im Beispielfall Rundheit) dauerhaft negativ beeinflusst wird.

5. Bewertung & Ausblick

Der vorgestellte Simulationsansatz verbindet auf geeignete Weise etablierte Simulationsmethoden zu einer neuartigen Berechnungsvorgehensweise. Er eignet sich für die Auswertung und anschließende Bewertung verschiedener Spray-induzierter Kühlkonzepte. Er stellt damit ein wertvolles Werkzeug zur simulatorischen Vorhersage sowie Bewertung des Abkühlverhaltens und der sich daraus resultierenden transienten Spannungen und Verzüge von komplexen Bauteilen dar. Der entscheidende Vorteil liegt somit darin, auf aufwendige Versuche und Messungen verzichten zu können.

Der beschriebene Modellsatz zeigt damit erhebliche Potenziale zur theoretischen Bewertung und zum grundsätzlichen Verständnis des Wärmeübergangs bei der Spraykühlung. Die durchgeführte Studie hat aber auch gezeigt, dass weitergehende Untersuchungen notwendig sind. Es ist geplant im Rahmen von einem Forschungsprojekt diese Potenziale weiter auszuleuchten und auszubauen, um daraus eine grundsätzliche Berechnungsmethodik zur Bewertung

von Spraykühlungsvorgängen abzuleiten. Darüber hinaus soll im Rahmen des Projekts anhand von einer einfachen Versuchsanordnung der gesamte Abkühlprozess während eines Druckgussvorgangs nachgestellt und die gesamte Simulationskette hinsichtlich des Wärmeübergangs aufgebaut werden. Dieser schließt neben der CFD- auch die FEM Simulation zur Berechnung der Spannungen und Verzüge im Werkzeug sowie die Erstarrungssimulation ein.

6. Danksagung

Die Autoren möchten alle an diesem Beitrag Beteiligten danken. Weiter danken wir dem Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel, mit welchem bereits eine Kooperation im Bereich der experimentellen und numerischen Untersuchung der Spray-induzierten Kühlung von dünnwandigen Werkstoffen und Werkzeugen besteht. Teile dieser Kooperation wurden für die hier aufgeführte Studie verwendet, insbesondere der grobe experimentelle Aufbau der vorgestellten Basis-Konfiguration.

7. Literaturangaben

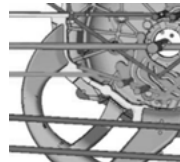
- [1] Lünendonk®-Automotive-Radar 2016, Trends und Entwicklungen in der Automotive- Industrie
- [2] AVL FIRE™ Produktübersicht, Abgerufen am 30. November 2017 von <https://www.avl.com/fire>
- [3] AVL FIRE™ Version 2017.1 Spray Module, Solver Theory Guide, AVL List GmbH, Graz, Österreich, 2017
- [4] AVL FIRE™ Version 2017.1 Wall Film Module, Solver Theory Guide, AVL List GmbH, Graz, Österreich, 2017
- [5] AVL FIRE™ Version 2017.1 Coupling Module CAE, Solver Theory Guide, AVL List GmbH, Graz, Österreich, 2017
- [6] Polifke, W., Kopitz, J., Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden, München: Pearson Studium 2009
- [7] ASM Aerospace Specification Metals, Inc., Abgerufen am 30. November 2017 von <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7050T745>
- [8] ASM Aerospace Specification Metals, Inc., Abgerufen am 30. November 2017 von <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=m434ae>

Performancebasierte Thermohaushalts-Auslegung von Druckgussformen

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) **Siegfried Heinrich**,
Schaufler Tooling GmbH & Co. KG, Laichingen

Inhalt

1. Überblick über die SF Tooling Group
2. Einfluss des Thermohaushalts auf Produktivität, Qualität und Formenlebensdauer
3. Anforderungen an den Thermohaushalt bei Minimalmengensprühen
4. Anwendung der „DieTherm“-Methode für eine optimale Formtemperierung
5. Aufwand und Nutzen



2018

Die SF Tooling Group

3 Standorte (1x D, 2x USA)

300 Mitarbeiter

Kapazität für 150 Großformen p.a.

20 Konstrukteure (CAD, Berechnung, Simulation)

Formen für Al & Mg Druckguss bis zu 4.400to DGM

RTM-Werkzeuge für CFK-Teile

Werkzeugservice, Ersatzteile, Standardisierung, Workshops



2018

Wir bieten Lösungen

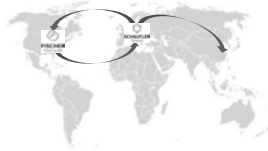
- Gießprozess Know-how
- Formauslegung basierend auf klaren Leistungsparametern
- Management interkontinentaler Projekte
- Bestes Kosten- / Leistungsverhältnis
- Folgeformen first-time right ("Kaltbemusterung")
- Life-time Programmbegleitung: kontinuierliche Verbesserungen, Änderungsdienst, Wartungen, Ersatzteile



2018

Auf dem Weg vom weltweit aktiven Formenbauer Zum global agierenden Full-Service Anbieter

SF Tooling Group heute



Der nächste Schritt: Präsenz in China



- technologisch führender Anbieter für Druckgussformen und RTM-Werkzeuge
- Formherstellung und Service vor Ort in NA, EU, Asien
- Unterstützung bei der globalen Standardisierung von Gießprozessen

2018

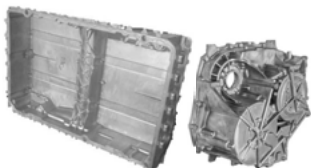
Die SF Tooling Group: Produktportfolio



Antriebsstrang ICE



Strukturteile



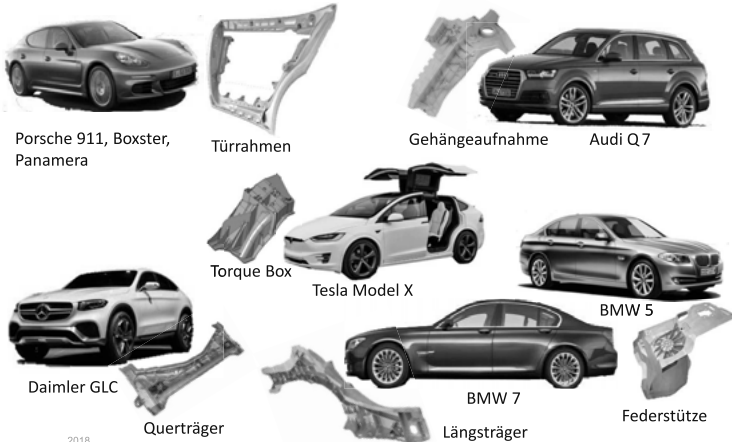
E-Mobilität, Hybrid



CFK

2018

Seit 1993: mehr als 150 Formen für Strukturteile



Was müssen wir tun, um weiterhin erfolgreich Strukturteile zu produzieren?

- Wettbewerbsfähigkeit gegenüber alternativen Materialien und Herstellverfahren erhalten und verbessern durch:
- Nutzung der Gestaltungsfreiheiten von Gussteilen zur Funktionsintegration
- Steigerung von Produktivität und Qualität

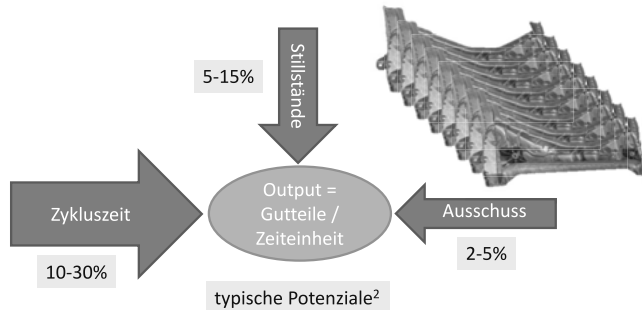


- Die Beherrschung des Thermohaushalts beim Druckgießen bietet signifikante Potenziale zur Reduzierung der Herstellkosten. Diese gilt es gemeinsam zu realisieren.

2018

Einfluss des Thermohaushalts auf Produktivität, Qualität und Lebensdauer

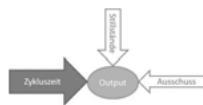
Produktivität ist das Verhältnis von Output und Input.¹



¹ Gabler Wirtschaftslexikon ² bezogen auf die Wertschöpfung des Rohgussteils

2018


Zykluszeit – Potenzial anhand eines Beispiels



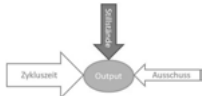
Zyklusanalyse Struktursteil, 2.500 to DGM

Vorgang	Dauer in Sek. optimiert	
Metall dosieren	7,5	7,5
Schuss	3	3
Erstarrungszeit	25	18
Form öffnen	5	5
Ausstoßen/Entnehmen	7,5	7
Sprühanlage einfahren	2,5	2,5
Sprühen	19	8
Ausblasen	7	4
Sprühanlage ausfahren	2,5	2,5
Form schließen	5	5
Gesamt	84	62,5
Dosierofen		
Bewegungen Maschine/Peripherie		
Formtemperierung direkt / indirekt		

2018



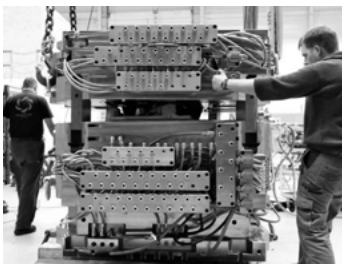
Formbedingte Stillstände




- Anklebungen
- Auswaschungen
- Formausbrüche
- Leckagen
- Wechsel Verschleißteile
- Ablagerungen in Temperierkanälen
- Formenwechsel

Ansätze:


- Vorbeugende Wartung
- Schnellwechsel von Verschleißteilen, Schieberwechsel auf Maschine
- Leckage-freie Stopfen
- optimaler Thermohaushalt
- Verbesserung Wasserqualität (Korrosion, Kalkablagerungen)



2018

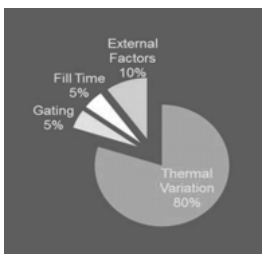


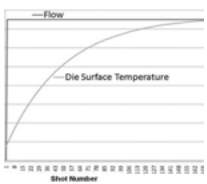
Ausschuss



70% - 80% der Prozessschwankungen im Druckguss sind durch Thermohaushaltsveränderungen verursacht:

- schwankender Wasserdruck / -temperatur
- Ablagerungen in Temperierkanälen
- veränderter Wärmeübergang Formoberfläche
- wechselnde Sprühbedingungen (Druck, Konzentration, Durchfluss der Düsen)
- Bedienereingriffe
- lange Anfahrkurven, häufige Stillstände

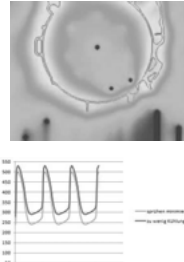
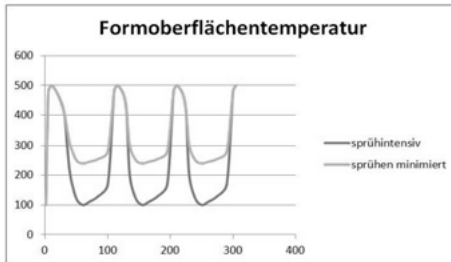




2018

Anforderungen an den Thermohaushalt bei Minimalmengensprühen

Weshalb Minimalmengensprühen?



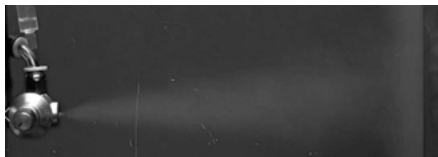
weitere Einflussfaktoren auf die Formlebensdauer:

- Teilegeometrie
- Legierung
- Füllbedingungen (Geschwindigkeiten, Kavitation)

2018

Anforderungen an den Thermohaushalt bei Minimalmengensprühen

- Korrekturmöglichkeiten bei Temperatur- Inhomogenitäten sehr eingeschränkt
- ausreichender Energieaustrag durch das interne Temperiersystem an jeder Stelle der Schussgeometrie
- korrekt dimensionierte Abstände der Temperierbohrungen zur Formoberfläche für ein homogenes Temperaturbild beim Ausstoßen des Teils



Die DieTherm Design Methode ist geeignet, diese Anforderungen zu erfüllen.

2018

Wer oder was ist DieTherm?

- **DieTherm Engineering LLC** wurde von Scott Kirkman 2007 gegründet
- > 25 Jahre Druckgusserfahrung, NADCA Trainer und Autor

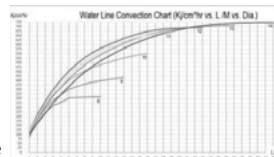


- patentierte Methode zur präzisen Auslegung der Formtemperierung
- berücksichtigt die kürzest mögliche Zykluszeit
- erzielt homogene Formoberflächentemperaturen
- erkennt falsch angeschlossene und verstopfte Kreise
- Liefert Echtzeit-Daten über Energieausträge je Kreis (Soll- / Ist-Abgleich)
- gleicht Wärmeaustragsschwankungen aus
- "Start-up control" erreicht wesentlich schneller die gewünschte Formoberflächentemperatur
-> Teile sind maßlich stabiler

2018

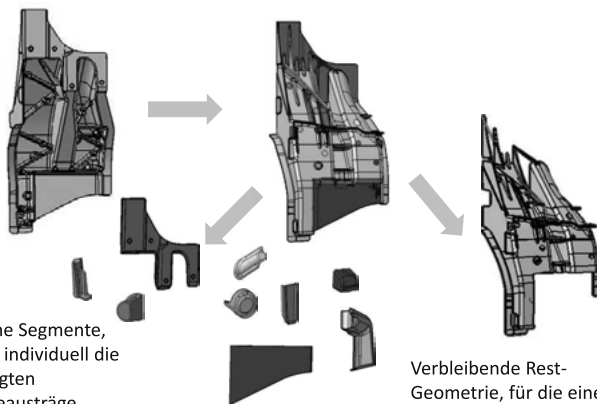
Anwendung der DieTherm Design Methode

1. Definition Gießprozess
 - Teileorientierung und grobe Angussgeometrie
 - bestmögliche Zykluszeit bei gegebener Gießzelle
 - Füllzeit
 - Sprühprozess (Mittel, Mengen, Temperaturfenster)
2. Identifizierung kritischer Gussteilbereiche
 - Materialanhäufungen
 - Anforderungen an Porosität, Dichtheit, Oberfläche, Maßhaltigkeit
3. Segmentierung der gesamten Schussgeometrie
4. Berechnung der einzelnen Segmente:
 - Volumina, Oberflächen, Energieeintrag
5. Festlegung der Temperierungselemente, Medien, aktive Längen und Durchflussraten
6. Berechnung der adäquaten Bohrungsabstände



2018

Segmentierung der Schussgeometrie



Einzelne Segmente,
für die individuell die
benötigten
Wärmeausträge
berechnet werden.

Verbleibende Rest-Geometrie, für die eine Grundtemperierung berechnet wird.

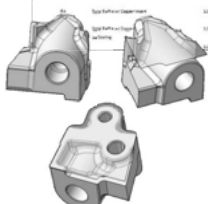
2018

Kalkulation der einzelnen Temperierkreisläufe

[illegible]

Kalkuliert werden je Segment:

- Volumina, Energieinhalte, Oberflächen für Wärmeaustausch
- Energieaustausch durch Konvektion und Strahlung
- Verbleibender Energieaustausch, aufgeteilt nach einzelnen Kühlelementen
- Erforderliche aktive Länge und Durchflussrate
- Adäquater Abstand zur Erreichung der gewünschten Oberflächentemperatur

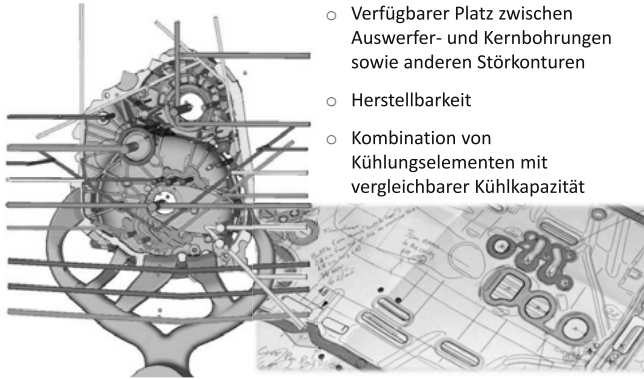


2018

Implementierung der Temperaturelemente

zu berücksichtigende Einschränkungen:

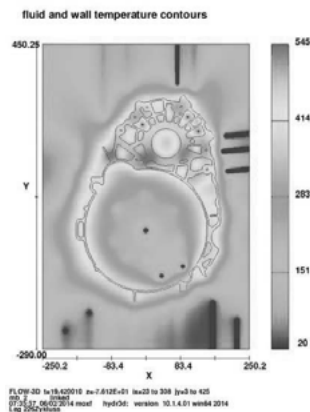
- Verfügbarer Platz zwischen Auswerfer- und Kernbohrungen sowie anderen Störkonturen
- Herstellbarkeit
- Kombination von Kühlelementen mit vergleichbarer Kühlkapazität



2018

Validierung

- Zyklensimulation (Erstarrung)
- meist nur eine finale Optimierungsschleife notwendig



2018

Aufwand und Nutzen

Aufwand¹

- Berechnung, Konstruktion (aufwändigeres Temperiersystem)
- Herstellkosten (Mehrkosten aufwändigeres Temperiersystem)
- Montage und Verrohrung (Mehrkosten aufwändigeres Temperiersystem)

¹ evtl. sollte die Wasserqualität verbessert werden

Nutzen

- optimale Zykluszeit von Anfang an
- geringerer Ausschuss (voller Effekt mit DieTherm Control)
- weniger Stillstände (voller Effekt mit DieTherm Control)
- höhere Formenlebensdauer, weniger Reparaturaufwendungen
- Einsparung von Trennmittel

In Summe:

**mehr Gutteile
pro Zeiteinheit**

2018

Aufwand und Nutzen: Beispielrechnung

Basisszenario		
Strukturgussteil, z.B. Querträger		
DGM:	2.800to.	
Zykluszeit	80Sekunden	
h-Satz Vollkosten Gießzelle	260 €	
Ausschuss total	8%	
Stillstandszeiten	30%	
Gesamtvolumen (life-time)	500.000	
Anzahl Formen/Bestückungen	5	
Einmalaufwand ¹		
DieTherm Berechnung	14.000 €	
Konstruktionsmehraufwand	12.000 €	
Summe Einmalaufwand	26.000 €	
je Form / Bestückung ¹		
Herstellung incl. Kühlungsbauteile / -Verteiler	15.000 €	
Montage, Verrohren	9.000 €	
Summe je Form / Bestückung	24.000 €	
Gesamtaufwand bei 5 Einheiten	146.000 €	

¹ohne Sonderlösungen wie lasergenerierte Teileinsätze

2018



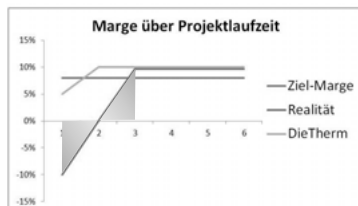
Aufwand und Nutzen: Beispielrechnung

Nutzen		
Zykluszeitverbesserung		10 Sekunden
je Gutteil	1,11 €	
Ersparnis Gesamtvolumen	557.143 €	
Ausschussreduzierung		2%-Punkte
je Gutteil	0,17 €	
Ersparnis Gesamtvolumen	82.540 €	
Stillstandszeitreduzierung		5%-Punkte
Verbesserung		
je Gutteil	0,29 €	
Ersparnis Gesamtvolumen	144.444 €	
Gesamtersparnis kombiniert	884.550 €	
zuzüglich Einsparungen bei Trennmittelverbrauch, höhere Formenlebensdauer, geringere Formwartungskosten		
Gutteile / Tag Basisszenario	696	
Gutteile / Tag mit allen Optimierungen	870	
	+25%	

2018

Fazit

- Die Beherrschung des Thermohaushalts bietet große Potenziale, um Strukturteile aus Druckguss auch in Zukunft wettbewerbsfähig zu produzieren.
- Mit der DieTherm-Methodik schaffen Sie die Voraussetzungen für erfolgreiche Projekte von Anfang an.



- Der Erfolg stellt sich nicht von selber ein. Es braucht die intensive Zusammenarbeit zwischen Gießer, Formenbauer, Sprühsystem- und Trennmittellieferant sowie dem Anlagenhersteller.

2018

Challenges in Housing and Structure Design for Future HV Battery Systems

Herausforderungen in der Gehäuse- und Strukturentwicklung von HV Batteriesystemen

Dipl. Ing. **Ralph Wünsche**, Samsung SDIBS, Premstätten

Abstract

Battery housings have more and different requirements to include than a conventional structural component. Aluminium is for most applications currently the best material choice. Weight reduction is achieved by integration of functionalities. The next step for weight reduction is to be made with other lightweight materials.

1. Introduction to Battery Systems

The rise of electric mobility results in a need for battery systems for electrified vehicles.

Samsung SDIBS develops and manufactures battery systems for all kinds of applications, from small 48V battery systems to large EV batteries.

The target from Samsung SDI is to provide customized solutions regarding energy and power requirements, packaging and mechanical robustness and the like.

The core element of a battery is the battery cell, which usually is stacked up to a module. Typically battery systems consist of several battery modules which are electrically connected, but also HV electric components, electronic supervision and a cooling system. All of these components have to be packaged into the battery housing.

2. Requirements for Battery Housings

The requirements for a battery housing, aside from being just an enclosure for these components, is also to provide a robust fixation and reinforcement for vibration profiles and crash loads. The thermal strategy requirements have to be considered with thermal insulation or intended heat dissipation. The housing also has an electromagnetic shielding function for a stable operation.

3. Examples of recent Development Projects

SDIBS has already developed housings using reinforced plastics, steel and aluminium. Especially for PHEV applications housings from casted aluminium or welded extrusion profiles have shown to be a good solution. They offer a good EMC shielding behaviour in combination with an aluminium cover. Usually there is no need for corrosion protection as long as contact corrosion to other metals has been avoided.

Casted housings offer great design possibilities to integrate mounting points and structural geometries. Since interface surfaces are usually machined, tolerances are not an issue. On the opposite there are high tooling costs and the limitation of the maximum part size.

Housings made from aluminium extrusion profiles offer good weight to stiffness ratio, low tooling costs, but also long manufacturing time and a certain restriction to rectangular shapes of battery systems. During a development project for a PHEV battery a steel housing and an extrusion housing concept have been compared and showed that the weight has been reduced, but the crash behaviour has been improved.

4. Weight saving through Integration

Additional weight saving can be achieved by increased integration of functionalities. For example, by integrating the cooling system into the housing, which has already been realized at SDIBS for a casted housing. This is a way the number of parts can be reduced, which results in a reduction of mounting effort, handling costs, and weight. Additionally the safety can be improved if the cooling connections can be located at the outside of the battery housing. Using extrusion profiles for battery housings, cooling channels can be extruded into the profiles themselves to incorporate cooling ducts into the housing floor.

Integration of the battery structure into the vehicle's structure: Especially for large battery systems it makes sense to combine the structure of the vehicle and the battery, to use the reinforcement needed for the construction of a battery also as part of the vehicle's structure in case of crash.

This can even lead to applying certain loads onto the battery cells themselves.

5. Future Challenges

In the future there will be the need for larger battery systems for long range EVs. There will be more variants and a higher production volume.

To meet these requirements Samsung SDIBS is developing new scalable concepts which fit for mass production.

Weight and cost can be saved by leaving the classical approach of using standardized cell modules. The concept of Samsung SDIBS is to widen up this approach by incorporating more functionality into the modules such as cooling and structural functionalities.

Hochvoltbatteriekasten als Hybridkonstruktion aus Druckguss und Blech

Mögliche Fügeverfahren und Nahtgeometrien

Battery box for high voltage application designed as hybrid structure made up of aluminum die-casting and sheet metal

Joining methods and corresponding geometries of the joint

Dr.-Ing. **Peter Lutze**, ae group ag, Gerstungen

- **Abstract**

Hochvoltbatteriekästen weisen eine erhebliche Größe auf. Funktionsbedingt werden hohe Anforderungen an ihre Dichtheit und partiell an die Oberflächengüten gestellt. Zusätzlich sind die Sicherheit im Crashfall und eine hohe Steifigkeit zu gewährleisten. Aufgrund ihrer Größe ergeben sich erhebliche Sprengflächen, was Gießmaschinen mit hoher Schließkraft erforderlich macht. Die notwendigen Oberflächengüten limitieren die Formlebensdauer stark.

Aufgrund des Einsatzes im Automobil müssen Werkstoffe mit hoher Duktilität verarbeitet werden. Teilweise wird eine Wärmebehandlung gefordert, um die Bauteileigenschaften zu verbessern.

Eine Hybridkonstruktion aus Aluminium-Druckguss als Grundstruktur und Aluminiumblech in den wärmetauschenden Bereichen kann die Summe aller dieser Anforderungen gewährleisten. Um Druckdichtheit zu erreichen, wird die Verbindung von Druckguss und Blech durch Schweißen hergestellt. Das Blech wird im Bereich der wärmetauschenden Oberflächen eingefügt.

- **1. Gießtechnische Gesichtspunkte**

Die Gießform für den betrachteten Batteriekasten weist eine Gesamtsprengfläche von 8.051 cm² auf. Bei 900 bar Gießdruck erfordert das eine Gießmaschine mit 7.245 to Schließkraft. Die größte zur Verfügung stehende Gießmaschine hat aktuell 4.400 to Zuhaltkraft. Selbst bei

einem auf 600 bar reduzierten Gießdruck würde dieses aktuell verfügbare Maximum um 10 % überschritten.

Bedingt durch die Größe des Teils ergeben sich lange Füllwege, die vor einem nennenswerten Erkalten der Schmelze zurückgelegt werden müssen. Dies bedingt eine kurze Füllzeit und entsprechend hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Infolge können die tief eingebetteten Teilepartien weder gezielt durchströmt noch entlüftet werden. Dies hat Verwirbelungen und Luft einschüsse zur Folge, die beim nachfolgenden Lösungsglühen der hier geforderten T6 Behandlung zu Blasenbildung führen. Entfernt vom Anschnitt liegende Materialanhäufungen können aufgrund der dünnen Bodenpartien nicht über den Anschnitt dicht gespeist werden, zumal die für die Wärmebehandlung erforderliche Legierung ein enges Erstarrungsintervall aufweist.

Die großen, unterbrechungslosen Flächen der Formgravur erzeugen maximale Spannungen in der Formoberfläche aufgrund der thermischen Wechselbelastung, die im Gießzyklus auftritt, und führen damit zu einer frühzeitigen Brandrissbildung in der Formoberfläche sowie zu Kornausbrüchen. Dem kann mit gießtechnischen Massnahmen nur ungenügend entgegen gewirkt werden. Die vorliegende Konstruktion ist als Gussteil praktisch nicht herstellbar und bedingt frühzeitig hohen Nacharbeitsaufwand am Behälterboden.

- **2. Lösungsansatz Hybridkonstruktion**

Die ebenen Böden des Batteriekastens dienen der Temperierung der Stromspeicher, was eine „satte“ Anlage der Batteriemodule bedingt. Die Kühlung erfolgt über eine außen am Boden liegende Flüssigkeitskühlung. Dies macht absolute Druckdichtheit erforderlich. Daneben werden Steifigkeit, Festigkeit und duktiles Verhalten im Crashfall gefordert.

Dieses Eigenschaftsprofil lässt sich mit Aluminiumblech problemlos erfüllen. Die Unterteilung der Fächer sowie der außen liegende Rahmen und allgemein die tragende Struktur ist als Gussstück darstellbar. So wird auch eine Funktionsintegration z. B. für die erforderlichen Anschlüsse erreicht.

Reduziert man die projizierte Oberfläche des Gussstücks um die Anteile des Blechs in Höhe von 3.600 cm², so bleiben 4.451 cm² Sprengfläche übrig. Bei 900 bar Gießdruck macht dies eine Formschließkraft von rund 4.000 to erforderlich, so dass eine gerade noch verfügbare Schließkraft von 4.400 to eine nominelle Reserve von 10 % beinhaltet.

Die Hybridkonstruktion gewährleistet damit dauerhaft die Funktion des Bauteils und ist grundlegende Voraussetzung für seine Herstellbarkeit. Blech und Guss müssen jedoch noch zusammengefügt werden.

- **3. Fügen der Hybridkonstruktion**

Das Fügen des druckgegossenen Rahmens mit den Blechen unter den Batterieelementen kann sinnvollerweise durch Schweißen erfolgen, wodurch dauerhaft eine stabile und druckdichte Verbindung erzielt werden kann. Voraussetzung hierfür ist eine hinreichende Schweiß-eignung der gesamten Konstruktion, die sich aus verschiedenen Faktoren ergibt.

Neben den eingesetzten Werkstoffen und deren Gasgehalt sind hier vor allem das gewählte Schweißverfahren und die zugehörige Nahtgeometrie abzustimmen. Dabei wird oft die Nahtzugänglichkeit ungenügend gewährleistet und dadurch die Schweißmöglichkeit eingeschränkt. Für die Aufgabe des Verbindens eines Blechs mit einer profilierten Struktur, hier in Form eines Gussstücks, kommen zahlreiche Schweißverfahren in Betracht. Neben den verschiedenen Lichtbogenschweißverfahren sind dies das Strahlschweißen aber auch diverse Pressschweißverfahren. Mit einer Ausnahme habe ich Beispiele aller Vertreter der genannten Gruppen bereits in meiner Dissertation behandelt [1], so dass ich hier nicht im Detail darauf eingehen werde.

Alle für Aluminium geeigneten Lichtbogenschweißverfahren und deren Kombinationen auch z. B. mit Strahlschweißverfahren kommen für die Aufgabenstellung grundsätzlich in Betracht und sind in Abhängigkeit des Gasgehalts des Gusses mehr oder weniger geeignet. Bei den Lichtbogenschweißverfahren wirkt sich ein erhöhter Wasserstoffgehalt der Gussstücke besonders ungünstig auf die Nahtqualität aus und kann zu erheblicher Porosität führen. Die Schweißgeschwindigkeiten sind begrenzt und der Gebrauch von Zusatzwerkstoff ist praktisch unumgänglich, was die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahrensgruppe einschränkt. Eine Automatisierung z.B. in Form des Roboterschweißens ist Stand der Technik, wird jedoch durch verfahrensspezifische Eigenheiten wie die regelmäßig erforderliche Düsenreinigung erschwert. Vorteile sind eine gute Spaltüberbrückbarkeit, Prüfbarkeit mit zerstörungsfreien Verfahren sowie verschiedene Möglichkeiten der Nacharbeit.

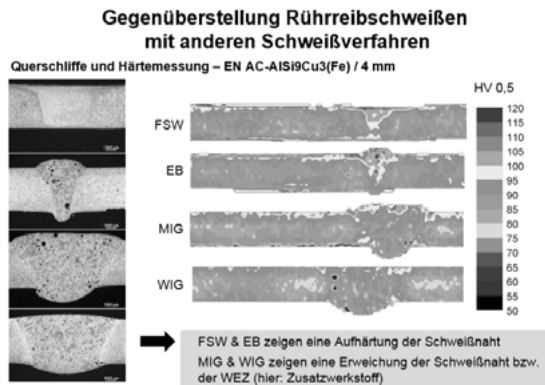


Bild 1: Gegenüberstellung verschiedener Schweißverfahren für Aluminium-Druckguss [5]

Strahlschweißverfahren sind demgegenüber unempfindlicher, erzeugen jedoch auch keine porrenfreien Schweißnähte. Aluminium, auch in Form von Knetmaterial, ist allgemein kaum porrenfrei schweißbar. Auf Zusatzwerkstoff kann zulasten der Spaltüberbrückbarkeit verzichtet werden. Infolge dürfen die Fügespalte nur wenige zehntel Millimeter betragen, da sonst erheblicher Nahteinfall die Folge ist, während bei Lichtbogenschweißverfahren eine Nahtüberhöhung normal ist. Die Schuppung als Folge der Schmelzbaddynamik kann recht rau ausfallen und kann ggf. durch eine nachfolgende Glättung mittels eines defokussierten Laserstrahls verbessert werden. Im Gegensatz zu Lichtbogenverfahren sind „Blindschweißungen“ möglich, bei denen der Laserstrahl das Deckblech durchdringt und mit der Unterlage verbindet. Die erzielbaren Schweißgeschwindigkeiten liegen deutlich über denen aller anderen Schmelzschweißverfahren und die Wirtschaftlichkeit ist dementsprechend hoch.

Pressschweißverfahren sind gegenüber Gaseinschlüssen weitgehend unempfindlich. Der zugrunde liegende Mechanismus ist der gleiche wie beim Druckgießen selbst. Die Ausdehnung der Gasporosität wird außer durch den Gasgehalt durch den beim Schweißen und der Erstarrung herrschenden Druck bestimmt.

Pressschweißverfahren arbeiten generell ohne Zusatzwerkstoff und ermöglichen erstaunliche Fügeschwindigkeiten. Die Prüfmöglichkeiten sind aufgrund der Geometrie der Fügezone eingeschränkt, je nach Verfahren treten spezifische Fehler auf. Alle Verfahren bedingen eine Automatisierung und sind nur bei entsprechender Gestaltung der Fügestelle anwendbar.

Aufgrund der gegebenen Geometrie in Form langer ebener Nähte sollten bevorzugt Strahl- und Pressschweißverfahren eingesetzt werden, die gute Automatisierbarkeit und hohe

Schweißgeschwindigkeiten bei minimiertem Verzug gewährleisten. Problematisch sind dagegen die Prüfbarkeit und Nacharbeitsmöglichkeiten.

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)

Prüf-Fehler-Matrix der zerstörungsfreien Prüfverfahren

Verfahren/Prüftechnik	Detektionsumfang	Geschwindigkeit		Nutzbarkeit KMU	Kosten
		Messzeit	Messung insgesamt		
Sichtprüfung	↓	↑	↑	↑	↓
Farbeindringprüfung	○	○	↓	○	↓
Mehrfrequenzwirbelstrom	○	↑	↑	○	○
Konvent. Ultraschall	○	○	○	↑	↓
US-Tauchtechnik	↑	↓	↓	↓	↑
US-EMUS-Plattenwellen	↑	↑	↑	↑	○
US-Rückstreuung	↓	↑	↑	○	○
Thermographie	↓	↑	○	○	↑
Durchstrahlungsprüfung	○	↑	○	↑	○
Röntgen-3D-CT	↑	○	↓	↑	○

Legende: ↑ gut geeignet ↓ wenig geeignet ○ nicht geeignet

US: Ultraschall
EMUS: Elektromagnetisch angeregter Ultraschall
CT: Computertomographie

Quelle: Fraunhofer IZfP

Bild 2: Zerstörungsfreie Prüfung von Rührreibschweißungen [5]

• 4. Mögliche Schweißverfahren

Aus der Familie der Pressschweißverfahren kommen aufgrund der Geometrie das Rollnahtschweißen sowie das Rührreibschweißen in Betracht, von den Strahlverfahren vor allem das Laserverfahren in seinen unterschiedlichen Abwandlungen.

Das Rollnahtschweißen bedingt einen Überlappstoss sowie eine tragfähige, den Stromübergang gewährleistende Unterlage und soll hier nicht näher betrachtet werden. Mit Ausnahme des Stromübergangs sind die Erfordernisse beim Rührreibschweißen vergleichbar. Insbesondere die Tragfähigkeit der Unterlage direkt unterhalb des Schweißkopfes verdient hohe Aufmerksamkeit, wirkt doch eine Kraft entsprechend mehrerer hundert Kilogramm auf den Fügebereich. Hinzu kommen vergleichbare Kräfte in der Fügeebene selbst. Dies ist bei der Auslegung des Gussstücks zu berücksichtigen, das entsprechend unterstützt und eingespannt werden muss.

Demgegenüber sind die Anforderungen für das Laserschweißen deutlich geringer. Hier reicht eine ebene Auflage mit seitlicher Positionierung der Baugruppe aus. Die möglichen Nahtgeometrien entsprechen denen beim Rührreibschweißen ebenso wie die einzuhaltenden Toleranzen der zu fügenden Teile. Das Laserschweißen bietet zumindest theoretisch höhere Schweißgeschwindigkeiten und vermeidet einige der Erschwernisse des Rührreibschweißens

z.B. bzgl. des Endlochs und Einschränkungen gegenüber engen Radien sowie Sprüngen in der Höhe. Auf Gussteilfehler und Gasgehalt reagiert es jedoch empfindlicher.

Das AiF Forschungsvorhaben 14.571N [2] mit dem Titel

„Untersuchung des Einflusses von Fertigungstoleranzen und Verzug auf die Festigkeitseigenschaften laserhybrid- und rührreibgeschweißter Verbindungen an hochfesten Aluminiumlegierungen der 5000er und 7000er Serie bis 15 mm. “

hat den beim Fügen auftretenden Verzug des Plasmaschweißens mit dem des Rührreischweißens verglichen und keinen nennenswerten Unterschied festgestellt, was zunächst überrascht. Erklären lässt sich dies durch eine Betrachtung der Temperaturfelder. Der Wärmeeintrag beim Rührreischweißen entspricht als Folge des Energieerhaltungssatzes in erster Näherung dem Anschlusswert der Spindel, die den Schweißkopf antreibt, abzüglich der durch deren Wirkungsgrad bedingten Abwärme und ist damit mindestens vergleichbar dem einer Laserschweißung. Dies möchte ich als „heat input“ bezeichnen. Die Auswirkungen dieser Wärmeerbringung sind jedoch grundverschieden, was im folgenden „heat impact“ genannt wird.

Das Rührreischweißen erzeugt einen breiten Saum einer gleichmäßig erwärmten Zone etwa in Breite der „Schulter“ des benutzten Werkzeuges. Das Temperaturfeld des Lasers passt dagegen in den Stiftdurchmesser des Rührwerkzeugs und ist damit deutlich kompakter. Das Temperaturfeld beim Rührreischweißen liegt komplett unterhalb der Solidustemperatur des Werkstoffs. Die dadurch induzierte Spannung entspricht damit der jeweils zugehörigen Warmstreckgrenze und wirkt in voller Breite des Temperaturfeldes.

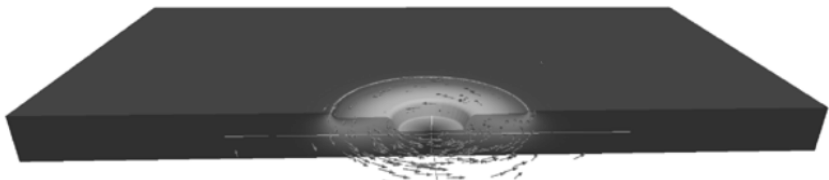


Bild 3: Temperaturfeld beim Rührreischweißen

Beim Laserschweißen treten wesentlich höhere Temperaturen auf, die selbst den Siedepunkt des Materials überschreiten können, weshalb sich eine Dampfkapillare bildet. Die induzierte

Spannung ist demgegenüber aber deutlich geringer, da heißere Bereiche eine kleinere Warmstreckgrenze aufweisen und flüssige naturgemäß gar keine Spannung induzieren können. Der „heat impact“ ist hier also geringer.

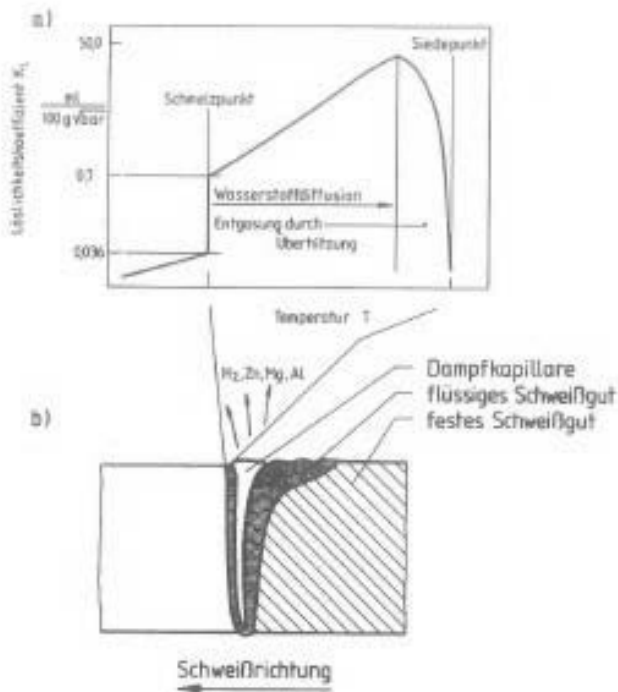


Bild 4: Schmelzbadgeometrie und Entgasungsmechanismen beim Strahlschweißen [1]

Der Verzug der Bauteile nach erfolgter Abkühlung hat in Summe komplexere Ursachen, beinhaltet weitere Gesichtspunkte und beruht auf zahlreichen Mechanismen. Er ist Folge der Gesamtheit der Randbedingungen, lässt sich aber mittels Simulation im Voraus abschätzen.

• 5. Mögliche Nahtgeometrien

Wirtschaftliche Gesichtspunkte erzwingen eine Minimierung der zu fügenden Nahtlängen. Beim betrachteten Bauteil sind dies immerhin mehrere Meter. Optimal ist eine Kombination aus Stumpfstoss und Überlappverbindung, wobei bis zu drei Bauteile simultan verbunden werden können. Die gesamte Nahtlänge wird hierdurch bereichsweise in etwa halbiert.

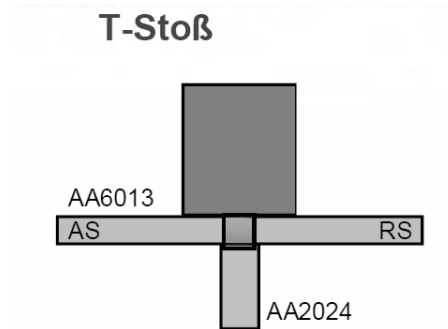


Bild 5: T-Stoß beim Rührreibschweißen von Aluminium-Knetwerkstoffen [3]

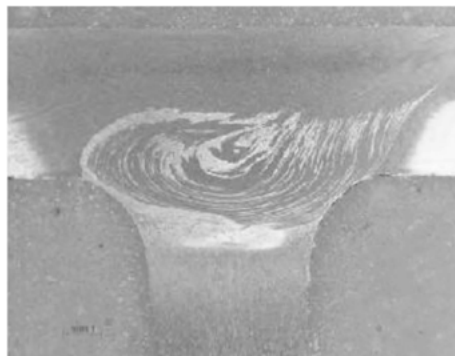


Bild 6: Gefüge der zugehörigen Rührreibschweißung [3]

Der Stumpfstoß übernimmt hierbei die Positionierung der Bauteile zueinander, die Überlappverbindung dient zur Verbindung mit der Grundstruktur. Aufgrund der erheblichen Nahtlänge ist trotz kleiner Nahtbreiten beim Überlappstoß eine ausreichende Festigkeit zu erwarten. Hierbei ist die Nahtbreite beim Laserschweißen deutlich kleiner als beim Rührreibschweißen, wo sie mindestens dem Stiftdurchmesser des verwendeten Werkzeugs entspricht.

Die erforderlichen Toleranzen bzgl. zulässiger Spaltmaße, die Spaltüberbrückbarkeit sowie der nachfolgende Nahteinfall sind bei beiden Verfahren sehr ähnlich und dem fehlenden Zusatzwerkstoff geschuldet. Sie betragen nur einige zehntel Millimeter und bedingen aufgrund der Bauteilabmessungen faktisch eine spanende Vorbearbeitung der Auflageflächen und

Nahtflanken, so dass Formverschleiß in den Hintergrund tritt. Aufgrund der damit erreichbaren Fertigungssicherheit ist dieses Vorgehen sehr empfehlenswert.

Beim Einsetzen der Bleche in die Gussstruktur ist die umlaufende und unvermeidbare Ausbeschräge auf den Fügeflächen zu beachten. Hier kann Formverschleiß zu vorstehenden Partien führen, die Zwängungen verursachen. Dies kann sicher vermieden werden, wenn die gesamte Fügezone spanend bearbeitet wird. Hierdurch wird auch dem sonst unvermeidlichen Nahteinfall entgegen gewirkt. Dies gilt sowohl für das Laser- wie auch für das Rührreibschweißen. Gusspickel auf den Auflageflächen sind demgegenüber unkritischer zu bewerten, solange sie nur geringe Ausmaße aufweisen.

- **6. Einbettung ins industrielle Umfeld**

Sowohl das Laserschweißen wie auch das Rührreibschweißen bedingen eine Einhausung sowie eine Vollautomatisierung. Platz- und Energiebedarfe unterscheiden sich unwesentlich. Sowohl Nahtform wie auch Nahtvorbereitung können identisch ausgeführt werden. Beide Schweißverfahren benutzen CNC gesteuerte Werkzeugmaschinen oder Roboter. Beim Rührreibschweißen tritt unvermeidlicher Verschleiß am Rührwerkzeug auf, dass regelmäßig gewechselt werden muss. Aufgrund des Standwegs ist von einmal pro Schicht auszugehen. Dies bedeutet nicht unerhebliche Werkzeugkosten sowie Stillstandzeiten, die beim Laser so nicht erforderlich sind. Aber auch Laser sind nicht wartungsfrei und brauchen z.B. prozessbedingt Zusatzstoffe wie Schutzgas. Das Laser-Remote-Schweißen geht hier neue Wege und lässt höhere Schweißgeschwindigkeiten möglich erscheinen. Für beide Verfahren wird eine spanende Vorbereitung der Fügestellen empfohlen. Beim Laserschweißen können Nahteinfall und Spaltüberbrückbarkeit durch den Einsatz von Zusatzwerkstoff verbessert werden. Die Toleranz gegenüber Gießfehlern ist dagegen geringer.

Für die Wirtschaftlichkeit entscheidend ist, dass die Taktung z.B. dem Gießzyklus angepasst werden kann, um eine direkte Verkettung der Prozesse zu ermöglichen. Ausschuss muss minimiert und Nacharbeit tunlichst komplett vermieden werden, um den Prozessablauf nicht zu stören oder gar unterbrechen zu müssen.

Wenn aufgrund der geforderten Materialeigenschaften eine Wärmebehandlung erforderlich ist, ergeben sich gravierende Unterschiede zwischen den betrachteten Schweißverfahren. Während nach dem Rührreibschweißen durch eine T6-Wärmebehandlung nicht die optimalen Materialeigenschaften in der Fügezone erreicht werden können [4], tritt dies beim Laserschweißen so nicht auf. Ursache ist der unterschiedliche Aufbau der Verbindungszonen.

Während beim Rührreibschweißen die Werkstoffe des Blechs und des Gussstücks wie auch ihre Gefüge mechanisch umgeformt und inklusive der Oberflächenbeläge vermischt werden, ist die Vermischung beim Laserschweißen minimal. Hier ist ggf. der Einfluss einer für den Guss bestimmten Wärmebehandlung auf das Blech gesondert zu betrachten, generell aber keine drastische Verschlechterung im Nahtbereich zu erwarten.

Die Festigkeiten von Rührreibschweißungen an Guss/Guss-Verbindungen im Zustand F liegen oftmals oberhalb der des Gussgefüges, so dass Zugproben derartiger Verbindungen oft im Grundwerkstoff brechen [5]. Rührreibschweißungen wärmebehandelter Gefüge erreichen das Grundwerkstoffniveau dagegen grundsätzlich nicht [4]. Umso mehr stört, dass eine nachträgliche Wärmebehandlung nicht zielführend wäre. Abhilfe schafft hier der Einsatz neuartiger Werkstoffe, die bereits im Gusszustand (F) die Eigenschaften wärmebehandelter Werkstoffe erreichen oder übertreffen. Diese Materialien weisen eine gute bis sehr gute Gießbarkeit auf und beeinträchtigen nicht die Formlebensdauer [6].

Gegenüberstellung Rührreibschweißen mit anderen Schweißverfahren

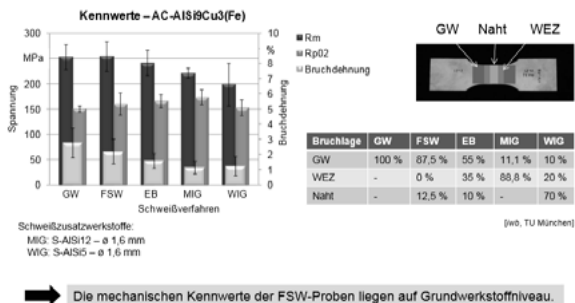


Bild 7: Mit unterschiedlichen Schweißverfahren an Druckguss erzielbare Festigkeiten [5]

Derartige Werkstoffe sind auch für das Laserschweißen geeignet, wie eigene Untersuchungen zeigen. Laserschweißungen erreichen allerdings aufgrund verschiedener Faktoren nicht Grundwerkstofffestigkeiten, liegen bei wärmebehandelten Materialien in den mechanischen Gütewerten aber deutlich höher als Rührreibschweißungen, die teilweise 25 % bis zu 50 % Einbußen haben [4].

• 7. Fazit

Bezüglich der schweißtechnischen Aufgabenstellung sind die in die Auswahl genommenen Fügeverfahren nahezu gleichwertig. Über ihren Einsatz entscheidet zum einen die Gussqualität vor allem in Form des Gasgehalts sowie möglicherweise erforderliche Wärmebehandlungen des Gusses.

Mit einer T6-Wärmebehandlung scheidet das Rührreibschweißen aufgrund der zu erwartenden Eigenschaften der Fügezone faktisch aus. Aber bei der Erfordernis einer Wärmebehandlung ist die Gussqualität immer auch für eine Laserschweißung ausreichend, wobei die Wärmebehandlung vor oder nach dem Schweißen erfolgen kann.

Ohne Wärmebehandlung ist die Gussqualität bei Einsatz des Rührreibschweißens für das Fügen des Batteriegehäuses demgegenüber von untergeordneter Bedeutung. Es sind Vorteile bzgl. der Dichtheit der Verbindung zu erwarten. Die Herstellung erscheint unproblematischer, wird aber vermutlich teurer als Laserschweißen sein.

Vorteile bietet das Rührreibschweißen auch bzgl. des Nahtaussehens, eine geeignete Nahtvorbereitung vorausgesetzt, da dann keinerlei Schuppung zu erkennen ist. Während die Schweißfolge der Nähte bei beiden Verfahren gleich sein kann, ist die Nahtgeometrie insofern unterschiedlich zu gestalten, dass die Nähte beim Rührreibschweißen geradlinig durchgehend sein sollten, wobei sie sich naturgemäß kreuzen. So wird die Endlochproblematik umgangen.

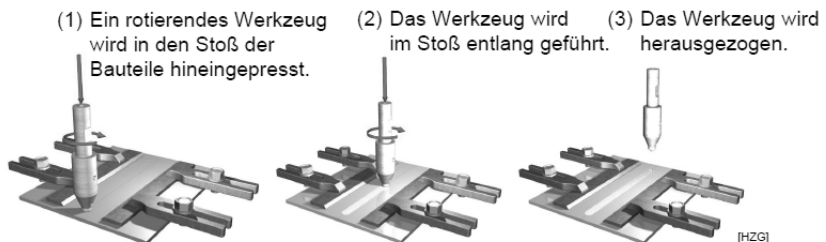


Bild 8: Verfahrensprinzip des Rührreibschweißens [5]

Die Aufgabenstellung „Batteriekasten“ erfordert vom Konstrukteur die Berücksichtigung verschiedenster Gesichtspunkte, ist aber durch eine hybride Gusskonstruktion mit eingeschweißten Blechen elegant lösbar.

- **8. Zusammenfassung**

Hochvoltbatteriekästen weisen eine erhebliche Größe auf. Funktionsbedingt werden hohe Anforderungen an ihre Dichtheit und partiell an die Oberflächengüten gestellt. Zusätzlich sind die Sicherheit im Crashfall und eine hohe Steifigkeit zu gewährleisten. Aufgrund ihrer Größe ergeben sich erhebliche Sprengflächen, was Gießmaschinen mit hoher Schließkraft erforderlich macht. Die notwendigen Oberflächengüten limitieren die Formlebensdauer stark. Es müssen Werkstoffe mit hoher Duktilität eingesetzt werden. Teilweise wird eine Wärmebehandlung gefordert, um die Bauteileigenschaften zu verbessern.

Eine Hybridkonstruktion aus Aluminium-Druckguss als Grundstruktur und Aluminiumblech in den wärmetauschenden Bereichen kann die Einhaltung der Summe aller dieser Anforderungen gewährleisten. Um Druckdichtheit zu erreichen, wird die Verbindung von Druckguss und Blech durch Schweißen hergestellt. Das Blech wird im Bereich der wärmetauschenden Oberflächen eingefügt.

Aufgrund einer nennenswerten Verkleinerung der Sprengfläche der gegossenen Struktur kann eine Gießmaschine mit kleinerer Schließkraft benutzt werden, was die Herstellkosten sowie die Zykluszeit beim Gießen reduziert. Die Formlebensdauer wird aufgrund der Verlagerung der extremen Oberflächenanforderungen im Bereich der wärmetauschenden Oberflächen auf das eingeschweißte Blech deutlich verlängert, was die Werkzeugkosten vermindert und die erforderliche Formwartung minimiert. Das Werkzeug kann somit länger auf der Maschine bleiben, was die Produktivität und den Ausstoß optimieren hilft.

Bei Schweißgeschwindigkeiten von 3-6 m/min liegt die Taktzeit beim Schweißen je Bauteil im Bereich der Zykluszeit beim Gießen. Alle Prozesse können automatisiert und somit ggf. verkettet erfolgen. Auf Nacharbeit des Gusses zur Erzielung der erforderlichen Oberflächengüten kann verzichtet werden. Die Wirtschaftlichkeit ist allein schon durch den weitgehenden Entfall sonst erforderlicher Glättung der wärmetauschenden Oberflächen gegeben, dessen Aufwand den des Schweißens übersteigt und die Lieferfähigkeit beeinträchtigt. Die erforderliche Nacharbeit käme am Ende der Formstandzeit einer kompletten Bearbeitung der Oberflächen in den wärmetauschenden Bereichen gleich.

Als Schweißverfahren kommen verschiedene Verfahren infrage. Dies sind von den Schmelzschweißverfahren sowohl Laser- wie auch MIG- und Plasma-Schweißen und deren Kombinationen sowie von den Pressschweißverfahren das Rollnahtschweißen und das Rührreißschweißen. Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt u.a. von konstruktiv gegebenen

Einschränkungen in der Geometrie der Baugruppe sowie von der Gussqualität, ggf. erforderlichen Wärmebehandlungen und von verfahrensspezifischen Eigenheiten der Schweißverfahren ab.

• 9. Literaturangaben

- [1] Lutze, P.: Gasgehalt und Schweißseignung von Aluminium-Druckguss, Dr.-Ing. Diss., Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig 1989
- [2] AiF Forschungsvorhaben 14.571N:
Untersuchung des Einflusses von Fertigungstoleranzen und Verzug auf die Festigkeitseigenschaften laserhybrid- und rührreibgeschweißter Verbindungen an hochfesten Aluminiumlegierungen der 5000er und 7000er Serie bis 15 mm.
- [3] Biallas, G.: Herstellung integraler metallischer Strukturen durch FSW, DLR Institut für Werkstoff-Forschung
- [4] Sayer, S.; Yeni, C.; Kusoglu, M.: Mechanische Eigenschaften und Mikrogefüge von mittels Rührreibschweißen gefügten ungleichen Aluminiumlegierungen, Practical Metallography Vol. 47, No. 2, pp. 96-111
- [5] Präsentationsunterlagen Fügeverfahren Rührreibschweißen, DVS Arbeitsgruppe 11.2, DIN NA 092-00-27 AA „Rührreibschweißen“, Gemeinschaftsausschuss für Technik, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
- [6] Ductile Aluminum Alloys for Automotive Structural Applications, Rheinfelden Alloys, Rheinfelden, Version 2 – 05/2017

• 10. Danksagung

Der Autor dankt den Firmen Trumpf Laser- und Systemtechnik GmbH sowie der Firma RHEINFELDEN ALLOYS GmbH & Co. KG für die Bereitstellung von Probematerialien und die Herstellung von Laserschweißungen.

Karosserieleichtbau in Al-Stahl-Mischbauweise

Fügetechnisch optimierte Integration von Al-Guss in Rohbauprozessen durch hybride Unterzusammenbauten

Lightweight Al/steel bodyshell

integration of Al castings in bodywork processes by hybrid subassemblies

M.Eng. **Mario Senff**, Dipl.-Ing. **Jean-Marc Ségaud**, BMW AG, Landshut

Abstract

Für diverse Strukturbauteile in der Karosserie ist ein Trend von der Schalenbauweise Stahl hin zur Integralbauweise aus Aluminiumguss zu erkennen. Allerdings fordert dieser Umschwung neue Investitionen im Rohbau und Prozessanpassungen in der Fügetechnik, da der Karosseriebau aktuell überwiegend auf das Fügen von Stahl-Stahl-Verbindungen (Widerstandspunktschweißen Stahl-Stahl) ausgelegt ist. Um diese Aufwände zu reduzieren, sollen Stahlflansche bereits beim Gießen, außerhalb des Rohbaus, an den Gussbauteilen angebracht werden. Diese hybriden Unterzusammenbauten können dann im Karosseriebau sortenrein gefügt werden, da die Anbindungspunkte an die Karosserie in Stahl vorliegen.

1. Einleitung und Problemstellung

Die aktuellen Entwicklungen im Automobilbau hinsichtlich Hybridisierung oder Elektrifizierung des Antriebstrangs, sowie autonomes Fahren und Fahrassistenz führen durch zusätzliche Komponenten wie Hochvoltspeicher und Sensorik zu einer Erhöhung der Fahrzeuggewichte. Hinzu kommen steigende Kundenanforderung bzgl. Komfort und Sicherheit, welche die Gewichtsspirale der Fahrzeuge zusätzlich nach oben treiben.

Um diesen Gewichtssteigerungen entgegenzuwirken, werden zwingend Leichtbaumaßnahmen benötigt, welche jedoch unter steigendem Kostendruck der Hersteller auch den wirtschaftlichen Ansprüchen gerecht werden müssen. Der Umstand, dass die eingangs

erwähnten Komponenten das Fahrzeug nicht nur schwerer, sondern auch teurer machen verleiht dem Wunsch nach bezahlbarem Leichtbau zusätzlichen Auftrieb.

In dem vorliegenden Projekt wird eine Leichtbaumaßnahme aus Aluminiumguss und Stahl für die Karosserie betrachtet, welche mit einem Gewichtsanteil von bis zu 40 % vom Fahrzeuggesamtgewicht besonderes Potential für Gewichtseinsparungen aufweist.

Um diese Mischbauweise aus Aluminium und Stahl auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu betrachten, kann Bild 1 herangezogen werden. Dort wird versucht eine erste Eingruppierung der verschiedenen Leichtbauweisen in Abhängigkeit von Leichtbaupotential und Seriengröße der Automobilproduktion vorzunehmen. Wie in Bild 1 zu sehen ist, stellt die Mischbauweise Aluminium/Stahl in Abhängigkeit vom Leichtbaupotential, bei Großserienfertigung die wirtschaftlichste Bauweise dar.

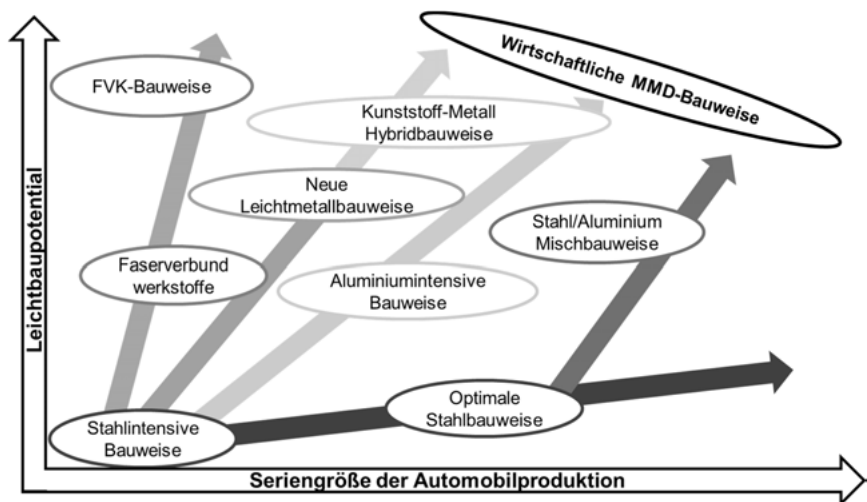


Bild 1: Eingruppierung verschiedener Bauweisen im Karosseriebau nach [1]

Allerdings ist es bei der wirtschaftlichen Bewertung von Mischbauweisen besonders wichtig, nicht nur die Kosten der Einzelkomponente zu betrachten, sondern auch die nötigen Folgeprozesse wie Logistik, Korrosionsmaßnahmen und insbesondere die benötigte Fügetechnik im Karosseriebau.

Dies wird deutlich, wenn das Fügekonzept des aktuellen BMW 7er betrachtet wird. Durch den Materialmix ist eine Vielzahl verschiedener Füge Technologien notwendig, welche einen hohen Investitions- und Flächenbedarf mit sich bringen.

In Abb. 2 ist ein Ausschnitt des Rohbaus der aktuellen BMW 7er-Serie mit seinen verschiedenen Füge Techniken (ohne Punktschweißen) dargestellt.

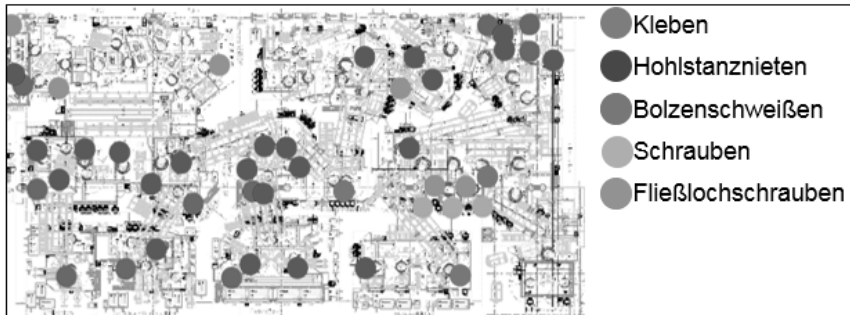


Bild 2: Ausschnitt verschiedener Füge Techniken im Rohbau des aktuellen 7ers.

Als Konsequenz daraus soll die bestehende Füge- und Anlagentechnik in der nächsten Fahrzeuggeneration wiederverwendet werden, was jedoch das Leichtbaupotential erheblich einschränkt. Bauteile die aktuell in der Karosserie aus einem bestimmten Werkstoff wie Stahl hergestellt sind, müssen in der nächsten Generation wieder aus Stahl sein, damit die bestehende Füge Technik wiederverwendet werden kann.

Lösungsansatz:

Um weiterhin Stahlbauteile in Schalenbauweise durch Integralbauweise Aluminiumguss zu substituieren, muss eine vorherige Anbringung von Stahlflanschen, außerhalb des Rohbaus (z.B. beim Gießer) an die Gussbauteile erfolgen (vgl. Abb. 3). Diese hybriden Unterzusammenbauten können dann konventionell durch Widerstandspunktschweißen im Rohbau gefügt werden, ohne die bestehende Füge Technik zu beeinflussen.

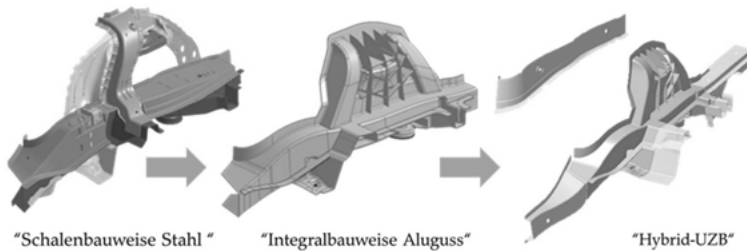


Bild 3: Geplante Entwicklung

2. Vorgehensweise

Stahlflansche sowie bei geeigneter Fügefolge angrenzende Bauteile aus Stahl werden bereits beim Gießen durch Rührreibschweißen an die Gussteile gefügt. Die Anbindungspunkte der hybriden Unterzusammenbauten an die Karosserie liegen in Stahl vor und können im Rohbau sortenrein durch Widerstandspunktschweißen gefügt werden. Um die Stahlflansche an den Aluminiumguss anzubringen wird das Rührreibschweißverfahren verwendet. Durch den geringen Wärmeeintrag und dem Umstand, dass keiner der Fügepartner die schmelzflüssige Phase erreicht, eignet sich das Verfahren besonders gut um Gussmaterialien sowie artungleiche Werkstoffpaarungen zu verbinden. Um die Eignung des Verfahrens für die angestrebte Werkstoffkombination zu untersuchen, werden im ersten Schritt Laborproben hergestellt um diese mit unserem aktuellen Benchmark Halbhohlstanznieten in Verbindung mit Kleben zu vergleichen. Nach dem die Tauglichkeit des Verfahrens für das Einsatzfeld nachgewiesen wurde, erfolgt im nächsten Schritt der Übertrag auf ein Realbauteil.

Rührreibschweißen Grundlagen:

Rührreibschweißen ist ein Pressschweißverfahren welches nach DIN EN 14610 in der Untergruppe „Schweißen durch Bewegung eingruppiert ist“. Die Verbindung zwischen zwei Werkstücken wird dabei nicht wie beim Reibschweißen durch eine Bewegung der Fügepartner gegeneinander erzeugt, sondern durch ein spezielles Werkzeug, welches in der Regel eine Rotations- sowie eine Linearbewegung gleichzeitig ausführt [2].

Das verschleißfeste Werkzeug, welches in dieser Untersuchung aus Hartmetall oder Wolfram-Rhenium hergestellt ist, wird (vgl. Abb. 4) durch eine Schulter sowie einen Pin charakterisiert. Das Werkzeug ist zweiteilig ausgeführt, um Pin und Schulter unabhängig voneinander zu wechseln. Dies ist notwendig, da der Pin eine deutlich kürzere Standzeit als die Schulter hat

und somit nicht das ganze Werkzeug gewechselt werden muss. Für diese Versuchsreihe wurden Schulterdurchmesser zwischen 10 mm und 13 mm verwendet, während der Pin einen Durchmesser von 5 mm aufweist welcher konisch nach unten zuläuft umso leichter in Materialien einzudringen.

Um Rührreibschweißungen durchzuführen, muss das Werkzeug noch über eine geeignete Werkzeugaufnahme von einem Schwerlastroboter oder einem Fräs-Bearbeitungszentrum geführt werden. Vgl. Abb. 4 wurden alle Versuche mit Industrieroboter KR 500 R2830 MT der Firma KUKA durchgeführt.

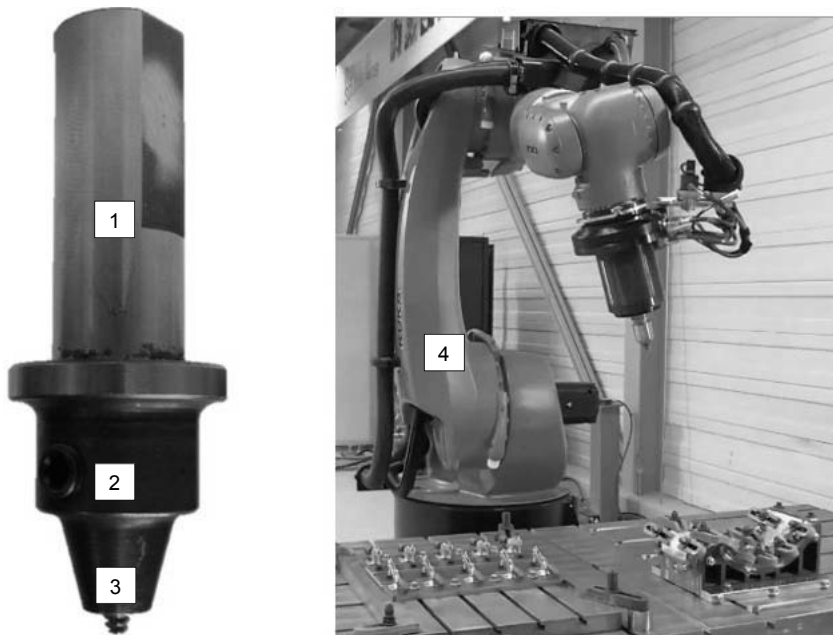


Bild 4: Zum Rührreibschweißen verwendetes Equipment

- 1. Werkzeug
- 2. Schulter
- 3. Pin
- 4. Industrieroboter KUKA KR 500 R2830 MT

Da der PIN einen horizontalen sowie auch vertikalen Werkstofftransport ermöglicht, können die Schweißungen entweder überlappend oder stumpf zueinander ausgeführt werden (vgl. Abb.5) [2].

Beim Überlappstoß befindet sich der weichere Fügepartner, in diesem Fall Aluminium, oben, der Stahl wird auf der Unterseite auf einer steifen Aufnahme positioniert, um so die Kräfte des Roboters aufzunehmen. Der Pin dringt dabei durch das Aluminium hindurch wenige Zehntel Millimeter in die Oberfläche des Stahls hinein.

Beim Stumpfstoß verfährt der Pin entlang der Stoßstelle zwischen Aluminiumguss und Stahl, allerdings aluminiumseitig versetzt, sodass, der Eingriff des Pins in den Stahl nur wieder wenige Zehntel Millimeter beträgt.

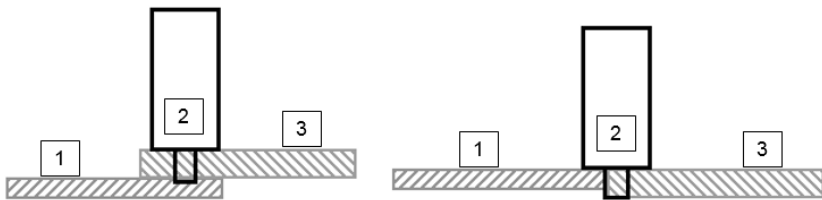


Bild 5: Anordnung der Fügepartner bei Überlappstoß- (links) bzw. Stumpfstoßkonfiguration (rechts)

- 1. Stahl
- 2. Werkzeug mit Schulter und Pin
- 3. Aluminium

Versuchsdurchführung Rührreibschweißen:

Für die Versuche wurden Gussplatten aus der Druckgusslegierung AlSi10MnMg im T7-Zustand in 3 mm Wandstärke mit dem mikrolegierten Stahl CR380LA in 1,6 mm Wandstärke gefügt. Diese Materialkombination aus Materialgüte und –stärke wurde zum einen gewählt, da sie unseren aktuellen Benchmark entspricht, welcher durch Halbhohlstanzen verbunden werden kann, zum anderen stellt es eine häufig vorkommende Materialpaarung in der Karosserie dar.

Zur Probenherstellung wurden Platinen mit den Abmaßen von 200 mm*70 mm an ihrer Längsseite geschweißt und anschließend Proben mit einer Breite von 48 mm herausgearbeitet (Vgl. Abb. 6). Die Probenlänge beträgt 140 mm bei den Stumpfstößen, sowie 120 mm bei den

Überlappstößen mit einer Materialdoppelung von 20 mm. Vgl. Abb. 6 befindet sich rechts neben den Proben das dazugehörige Schliffbild. Im ersten Schliffbild der Stumpfstoßschweißung lässt sich am Stahl deutlich das Eindringen des Pins erkennen. Des Weiteren werden die gelösten Stahlpartikel in das Aluminium eingerührt. Im zweiten Schliffbild, dem Überlappstoß, dringt der Pin von oben durch das Aluminium in den Stahl ein. Auch hier ist wieder das Herauslösen von Stahlpartikeln in die Aluminiummatrix zu erkennen. Beim Überlappstoß ist darauf zu achten, dass der sog. Hook (Aufwurf rechts) nicht zu groß wird, da dieser zum einen den Querschnitt des Aluminiumwerkstoffs herabsetzt, zum anderen wird durch die Kerbwirkung die Dauerlastbeständigkeit negativ beeinträchtigt.

Probenherstellung Halbhohlstanznieten und Kleben:

Dazu wurden im ersten Schritt die Gussplatten in schwarzer kathodischer Tauchlackierung beschichtet. Anschließend wurde auf dieser Schicht das Stahlbauteil geklebt und mit zwei Halbhohlstanznieten verbunden (vgl. Abb.6). Die Probenbreite beträgt wieder 48 mm die Überlappung 20 mm.

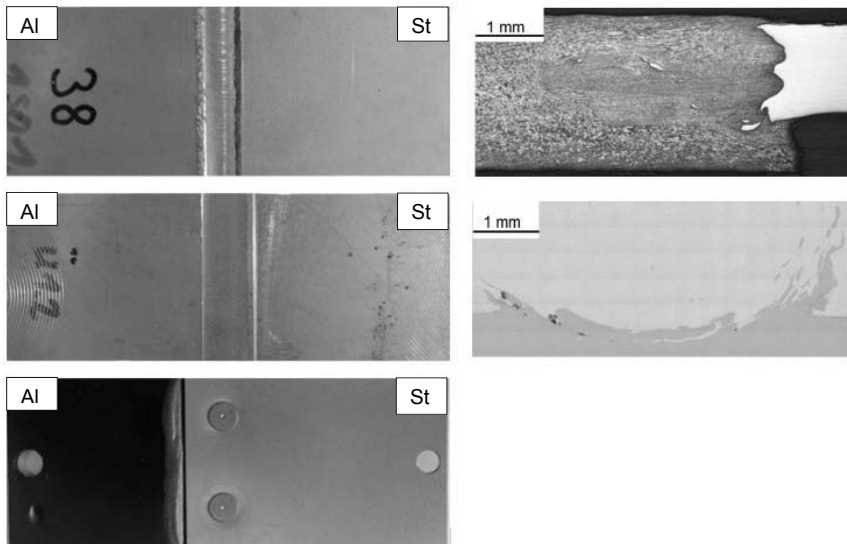


Bild 6: links Proben in der Reihenfolge RRS Stumpfstoß, RRS Überlappstoß, Stanznieten/Kleben, rechts die dazugehörigen Schliffe

3. Charakterisierung

3.1 Quasistatischer Zugversuch

Im Anschluss wurden alle drei Proben bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min in einem quasistatischen Zugversuch geprüft. Wie Bild 7 zu entnehmen ist, können bei gleicher Flanschbreite sowie gleicher Materialstärke die rührreibgeschweißten Proben höhere Kräfte als die Stanzniet-Klebe Proben übertragen. Während die Proben im Überlappstoß bei nur geringfügig höheren Kräften als die Stanzniet-Klebe-Proben versagen, ergibt sich bei den Proben im Stumpfstoß eine deutlich erhöhte Zugkraft. Aus der Differenz der ca. 18000 N bei den Nietproben zu den ca. 24000 N bei den Stumpfstoßproben ergibt sich eine übertragbare Mehrlast von rund 30%. Bei den Bruchdehnungen stellt sich das Versagen der Stumpfstoßschweißungen sowie der Stanzniet-Klebeproben bei etwa 2% ein während die Überlappschweißungen bei etwa 4% versagen. Hierbei muss erwähnt werden, dass die Stanzniet-Klebe-Proben den Vorteil aufweisen, dass nach Versagen des Klebstoffes durch die Nieten weiterhin Energie auf geringeren Kraftniveau aufgenommen werden kann.

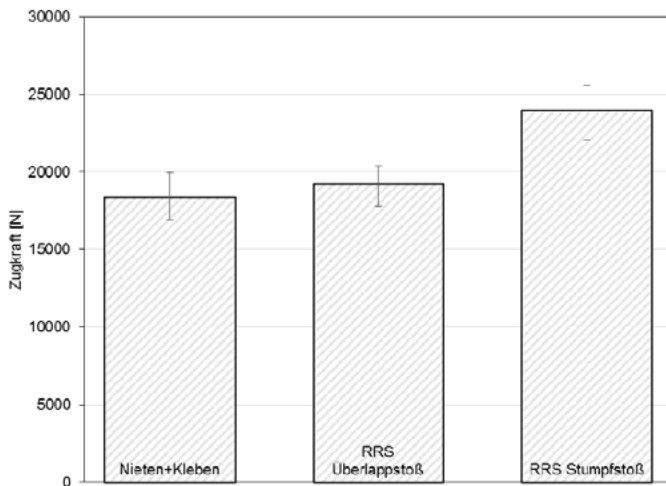


Bild 7: Vergleich von Zugkräften der unterschiedlichen Fügemethoden

3.1.1 Versagensmechanismen nach der Prüfung:

Stanznieten und Kleben:

Im ersten Schritt kommt es zum Versagen des Klebstoffes bzw. der KTL-Beschichtung. Dabei reißt der Klebstoff einen Großteil der KTL-Beschichtung des Aluminiums ab, während die Nieten noch im Aluminium verharren und weiterhin Energie aufnehmen.

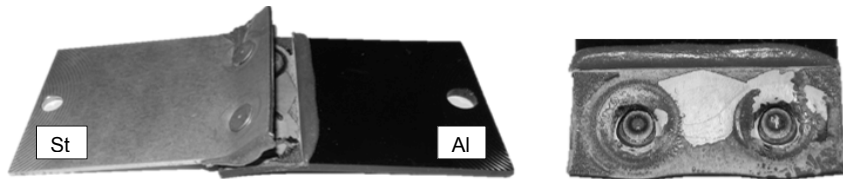


Bild 8: Versagen der Probe Stanznieten und Kleben

RRS Überlappstoß:

Beim Rührreibschweißen im Überlappstoß kommt es (vgl. Abb. 9) in der Regel zu einem Versagen direkt im Nahtbereich und die Verbindung knöpft auf.

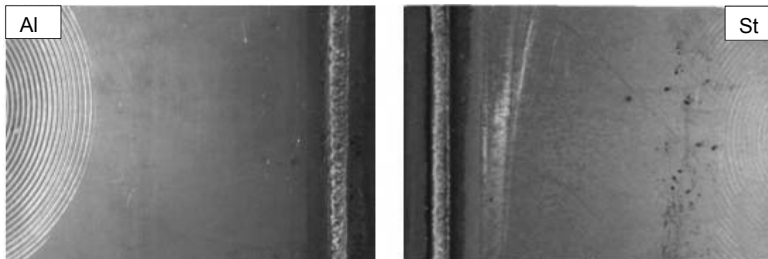


Bild 9: Versagensbild Überlappstoß

RRS Stumpfstoß:

Beim Rührreibschweißen im Stumpfstoß kommt es (vgl. Abb.10) zum Versagen in der Wärmeeinflusszone des Grundmaterials Aluminiums etwa drei Zehntel vom ursprünglichen Stoß entfernt.

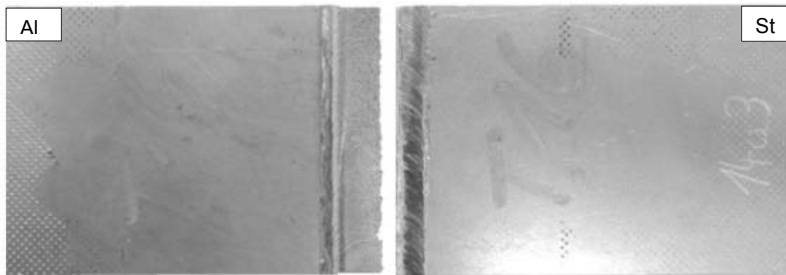


Bild 10: Versagensbild Stumpfstoß

3.2 Untersuchung von dynamischen Lastfällen:

Nachdem sich bei den statischen Untersuchungen das Rührreibschweißen im Stumpfstoß als Zielführend herausgestellt hat, wurden im nächsten Schritt noch die dynamischen Eigenschaften untersucht. Dazu wurde eine Wöhlerlinie mit Zug-Schwell-Belastung erstellt. Die Proben wurden mit einer Frequenz von 20 Hz und einem Spannungsverhältnis R von Unter- zu Oberlast von 0,1 geprüft. Wie aus Bild 11 zu entnehmen ist, weisen die rührreibgeschweißten Proben im Stumpfstoß, entgegen den statischen Versuchsergebnissen, ein geringeres Lastniveau als die Stanzniet-Klebe-Proben auf. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die rührreibgeschweißten Proben im Nahtbereich eine prozessbedingte Rauigkeit aufweisen. In Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl werden durch die Schulter riefen in die Fügenaht eingebracht, sowie eine gewisse Rauigkeit erzeugt, welche während der Belastung zur einer Rissinitiierung führt. Dadurch ergibt sich eine größere Streuung der geprüften Proben sowie ein geringeres Lastniveau. Um eine fundierte Aussage über die Dauerlastbeständigkeit der Rührreibschweißungen zu erhalten sind weitergehende Untersuchungen notwendig. Dazu muss ein Realbauteil dem Lastfall entsprechend geprüft werden um zu sehen, ob die Verbindung der spezifischen Lebensdauernanforderung gerecht wird.

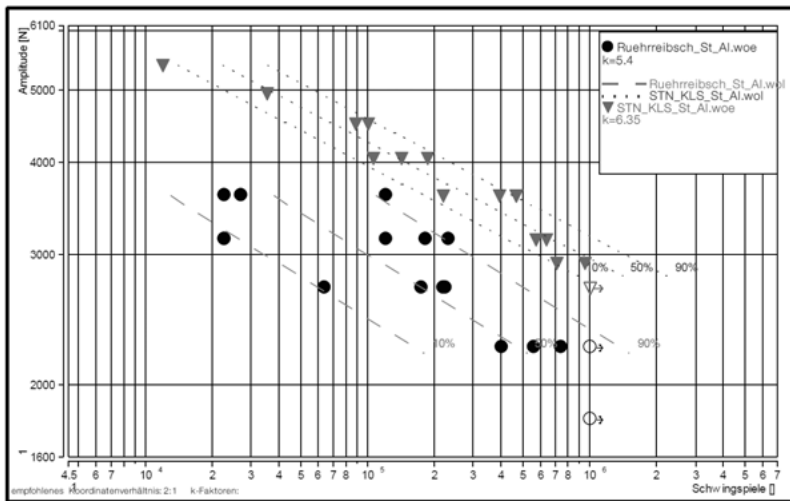


Bild 11: Vergleich Wöhlerlinien Rührreibschweißen Stumpfstoß/ Stanznieten und Kleben

4. Ausblick: Übertrag der Untersuchungen auf Realbauteil A-Säule

Aufgrund der hohen Kräfte welche sich durch die Stumpfstoßschweißung zwischen Aluminiumguss und Stahl übertragen lassen, der Vermeidung von Materialdoppelung an der Schnittstelle sowie des vereinfachten Korrosionsschutzes aufgrund fehlenden Spalts, wurden die Versuche zur Schweißung des Realbauteils mit der Stumpfstoßvariante fortgesetzt.

In Abb. 12 ist ein Entwicklungsbeispiel am Bauteil A-Säule aufgezeigt. In der aktuellen Fahrzeugserie wird die A-Säule in Schalenbauweise Stahl hergestellt. Eine Substitution der A-Säule durch Aluminiumguss wäre nicht möglich ohne die Fügetechnik im Rohbau anzupassen. Dort müssten die Punktschweißzangen durch Anlagen zum Kleben und Nieten ersetzt werden was einen hohen Flächen- und Investitionsbedarf nach sich zieht. Anstatt dessen werden bereits beim Gießen, außerhalb des Rohbaus, Stahlflansche angebracht und die hybride A-Säule kann anschließend konventionell gefügt werden.

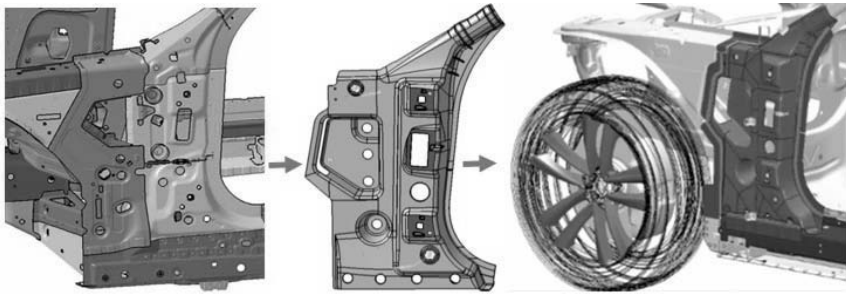


Bild 12: Entwicklungsbeispiel am Bauteil A-Säule

In Bild 13 ist der Versuchsaufbau und die Schweißung am Realbauteil A-Säule dargestellt. Dazu wurde eine im Druckgussverfahren hergestellte A-Säule zusammen mit den dazugehörigen Stahlflanschen in einer Spannvorrichtung fixiert und anschließend über das Rührreißschweißverfahren im Stumpfstoß gefügt. Die Stahlflansche konnten erfolgreich an die A-Säule angeschweißt und die Parameter aus den Vorversuchen übertragen werden.

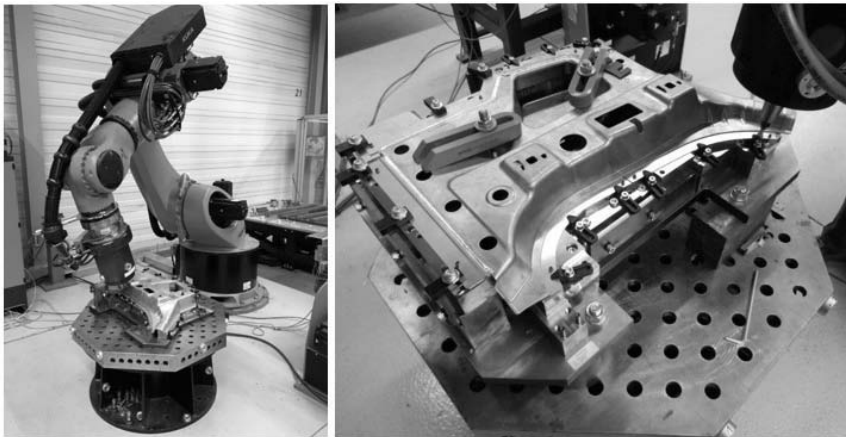


Bild 13: Versuchsaufbau zur Schweißung eines Realbauteils

Fazit, Zusammenfassung:

Im ersten Schritt wurde die Eignung des Verfahrens Rührreibschweißen für die Materialkombination aus Aluminiumdruckguss (AlSi10MnMg) und Stahl (CR380LA) nachgewiesen. Hierzu wurde die Verbindung anhand von Laborproben in einem quasi-statischen Zugversuch, so wie einem Wöhlerversuch charakterisiert. Anschließend wurden die Erkenntnisse aus den Grundlagenversuchen auf die Fertigung eines Realbauteils übertragen. Hier konnte die Machbarkeit nachgewiesen und ein Realbauteil gefertigt werden.

Im nächsten Schritt gilt es nun eine Erprobung am Realbauteil durchzuführen und die Eigenschaften hinsichtlich statischer und dynamischer Belastung, Crasheigenschaften, sowie Korrosion zu untersuchen. Um später eine mögliche Anwendung im Serienbetrieb zu realisieren, müssten vorausgesetzt positiver Ergebnisse aus den Realbauteiltests, noch Konzepte und Methoden für Fertigung, Absicherung und Prüfmethodik ausgearbeitet werden.

- [1] FRIEDRICH, H.E., 2013. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik* [Online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ATZ / MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-8348-1467-8. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2110-2>

- [2] SCHMID, D., 2015. *Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie* [Online]. Zugl.: München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss., 2014. München: Utz. Forschungsberichte IWB / Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München. 297. ISBN 9783831671342. Verfügbar unter: <http://utzverlag.de/buecher/44452dbl.pdf>

Integration der lieferantenseitigen T5 Wärmebehandlung für Strukturgussteile der Legierung AlSi7MnMg (C611) in den Lacktrocknungsprozess des OEM

Optimierung der Prozesskette

Integration of the supplier-applied T5 heat treatment process for structural die-castings of the alloy AlSi7MnMg (C611) into the paint drying process of the OEM

Optimization of the process chain

Dipl.-Ing. **Thomas Mache**, **Klaus Maier**,

Dr. h.c. F. Porsche AG, Fachgebiet Karosserieentwicklung und Gießen, Weissach;

Dipl.-Wirt.-Ing **Tim Spielmann**, Dipl.-Ing. **Çağdaş Köroğlu**,

MAGNA BDW technologies Soest GmbH,

Fachgebiet Technologieentwicklung Gießen, Soest

Kurzfassung

Das in diesem Beitrag vorgestellte Projekt beschreibt die Integration der T5 Wärmebehandlung für Strukturgussbauteile der Legierung AlSi7MnMg in den Produktions- bzw. Lackierprozess der Karosserie am Beispiel des Porsche 911 Carrera (Typ 991).

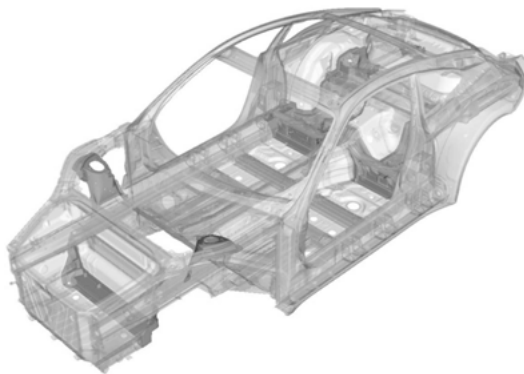


Bild 1: Strukturgussbauteile des Porsche 911 Carrera (Typ 991)

Ziel dieses Projekts war, die Verlagerung der Wärmebehandlung der Einzelteile beim Lieferanten in den Fertigungsprozess beim OEM, durch die Nutzung der Prozesswärme während der Trocknungsphasen der Lackschichten. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen durch einen geringeren Teilepreis auf Seiten des OEM und dem Entfall von Arbeitsschritten beim Zulieferer ergeben sich zusätzlich technologische und ökologische Vorteile auf beiden Seiten. Da die Bauteile im F- bzw. im Gusszustand verbaut werden, ergibt sich durch die geringeren Festigkeiten und der erhöhten Dehnung ein robusteres Verhalten im Hinblick auf die Verbindungstechnik. Darüber hinaus bedeutet der Entfall der Wärmebehandlung beim Lieferanten, den Entfall eines vergleichsweise energieintensiven Fertigungsschritts, was eine Reduzierung von ca. 1400 Tonnen CO₂ im Produktionszeitraum entspricht. Durch die Wärmebehandlung der Bauteile in der gefügten Karosserie wird die heutige Prozesskette jedoch auch entscheidend verändert. Untersuchungen zur Entwicklung der mechanischen Eigenschaften und dem Verhalten speziell beim Stanznieten sowie zur Maßhaltigkeit der Gussteile waren daher erforderlich. Des Weiteren wurde ein neues Konzept zur Qualitätssicherung erarbeitet, um serienbegleitend die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs im T5 Zustand nachzuweisen. Hierfür wurden die Temperatur-Zeit-Verläufe, an den für die Gussbauteile relevanten Bereichen der Karosserie, während der Lacktrocknung analysiert und die Parameter einer resultierenden Wärmebehandlung abgeleitet und validiert. Zeitgleich wurde ein Ofen im Labor-Maßstab installiert, welcher durch eine entsprechende Steuerung diese Temperatur-Zeit-Verläufe realisieren kann, um die Proben der Bauteile im F-Zustand mit den Parametern der Lacktrocknung auszulagern. Darüber hinaus wurden die Dokumentationsumfänge erweitert, sodass die Ergebnisse der serienbegleitenden Prüfungen den Wärmebehandlungsparameter der jeweiligen Proben zuzuordnen sind.

Das in diesem Artikel beschriebene Projekt zeigt, dass durch eine Betrachtung der gesamten Fertigungsprozesskette, vom Einzelteil zur Karosserie, technologische, ökonomische und ökologische Potentiale gehoben werden können. Eine stetige und konsequente Optimierung von Prozessen und Fertigungsabläufen nimmt daher, mit Blick auf die gesamte Fahrzeugfertigung, eine zentrale Rolle ein.

Abstract

The project presented in this contribution describes the integration of the T5 heat treatment for structural die-cast parts from the AlSi7MnMg alloy into the production and paint-coating process of the vehicle body by the example of the Porsche 911 Carrera (Type 991). The goal of this project was to relocate the heat treatment process of the individual components thus far carried out at the supplier into the production process of the OEM, using the heat of the drying

ovens during the coating process. In addition to economic advantages for both, the OEM through reduced part pricing and the supplier through the reduction of production steps, the result is advantageous for both sides in both the technological as well as in the ecological sense. Since the die-cast parts are joined to the vehicle body as fabricated without a heat treatment, the reduced tensile strength and higher ductility of the parts result more robust behavior with respect to the joining process. Furthermore, the elimination of the heat treatment in the supplier's factory means a relatively energy-intensive production step can be eliminated, resulting in a reduction of 1400 tons of CO₂ over the production lifetime. The consequence of the integration of the heat treatment into the production process at a point in time when the die-cast parts are already joined in the vehicle body, is a significant change in the production process with respect to the established process. For this reason it was necessary to examine the mechanical properties and the dimensional accuracy of the die-cast parts, and especially the behavior during the self-pierce riveting process. Additionally, a new concept for the quality assurance of the mechanical characteristics of the material in T5 condition was developed to accompany the serial implementation of this new production method. To this end temperature-time curves of areas relevant to die-cast parts in the vehicle body were analyzed during the drying step of the paint-coating process and the parameters of the heat treatment were derived and validated. At the same time an oven in a laboratory setting was installed, which can realize these temperature-time progressions. This oven was used to perform the heat treatment on samples of the component with the parameters of the various dryer. In addition to this the documentation of this production step was expanded, such that the results of the accompanying serial production tests carried out in parallel to the production process and the corresponding heat treatment parameters can be matched to the individual samples.

The project presented in this article shows that by examining the complete chain of production processes from individual parts to the complete vehicle body, there is technological, economical and ecological potential for improvement. A constant and consequent optimization of processes and production sequences is therefore of central importance with respect to the complete production of a motor vehicle.

1 Motivation

Die aktuellen und zukünftigen Entwicklungen in der Automobilindustrie werden entscheidend von der effizienten und nachhaltigen Nutzung von Ressourcen bestimmt. Der Leichtbau spielt hierbei eine zentrale Rolle um das Gewicht des Fahrzeugs zu senken und somit den Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen Emissionen zu reduzieren. Die von der Europäischen Union erlassenen Vorgaben für die Zielwerte der durchschnittlichen CO₂-Emissionen sollen bis zum Jahr 2020 auf einen Wert von 95 g CO₂/km reduziert werden [1]. Um diesen Wert zu realisieren werden gerade im Karosseriebau neben höher- und hochfesten Stählen im zunehmenden Maße Aluminiumlegierungen als Blech-, Profil- und Gussbauteile eingesetzt. Ziel ist eine, den Anforderungen entsprechende, Materialverteilung innerhalb der Karosserie um den bestmöglichen Kompromiss zwischen dem Materialeinsatz und der Funktion des Bauteils zu realisieren [2]. Strukturelle Gussbauteile aus Aluminium bieten dabei ein hohes Leichtbaupotential, da die geometrische Gestaltungsfreiheit ein hohes Maß an Funktionsintegration ermöglicht. Durch unterschiedliche Wandstärken, lokale Verrippungen oder Gewindedome lassen sich komplexe Bauteile erstellen, welche sehr gezielt und den Anforderungen entsprechend konstruiert werden können. Dabei ist ein Trend zu immer komplexeren Bauteilen mit steigenden Abmessungen und höheren Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften zu erkennen. Um das volle Potential der Gusslegierungen auszuschöpfen, werden die Bauteile in den meisten Fällen einer legierungsspezifischen Wärmebehandlung unterzogen um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Dieser Prozessschritt ist jedoch gerade bei großen Bauteilen, wie bspw. dem Längsträger 3 des Porsche 911 (Typ 991) mit Abmessungen von ca. 1055mm x 725mm x 540mm, ein vergleichsweise kosten- und energieintensiver Prozessschritt. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Minderung der CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Gussbauteilen während der Nutzungsphase des Fahrzeugs mit hohen Bauteilkosten und CO₂-Emissionen während der Produktion der Bauteile einhergehen. Daher ist gerade beim Einsatz von Gussbauteilen, im Hinblick auf diesen Zielkonflikt, eine kritische Betrachtung des gesamten Lebenszyklus notwendig. Die Gussbauteile der Porsche Sportwagen Carrera sowie Boxster und Cayman der Baureihen 991 und 982 werden aus der Legierung AlSi7MnMg gefertigt und einer T5 Wärmebehandlung unterzogen. Mit dem Ziel sowohl die Einzelteilkosten als auch die CO₂-Emission zu reduzieren, wurde eine Analyse der Prozesskette von der Einzelteilerfertigung bis zur lackierten Karosserie durchgeführt. Die T5 Wärmebehandlung der Einzelteile beim Zulieferer wies ein großes Potential auf um diese Ziele zu erreichen, da durch die Prozesswärme beim Lackierprozess der Karosserie ebenso Wärme in die Bauteile eingetragen wird. Dabei führt eine Verlagerung der Wärmebehandlung vom Lieferant zum OEM zum Entfall von Arbeitsschritten, was die Kosten der Bauteile senkt und die maßliche Qualität der

Bauteile erhöht. Des Weiteren wird der Ausstoß von CO₂ reduziert, da die Bauteile nicht separat, sondern im Fertigungsprozess der Karosserie ausgehärtet werden.

Diese Integration in den Lackierprozess führt somit zu einer Verschlankung des Fertigungsprozesses beim Zulieferer. Unter Zugrundelegung größerer Fertigungsvolumen ohne Wärmebehandlung wird somit zukünftig neben den bereits angesprochenen Ressourcen auch weniger Platz erforderlich, da gerade komplexe Wärmebehandlungsanlagen einen großen Platzbedarf erfordern.

2 Stand der Technik

2.1 Wärmebehandlung von Gusslegierungen

Durch eine Wärmebehandlung können die mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gussbauteilen gezielt beeinflusst und verbessert werden. In Abhängigkeit des Legierungssystems und der chemischen Zusammensetzung der Legierung, kommen dabei verschiedene Arten der Wärmebehandlung zur Anwendung um ein Aushärten des Werkstoffs zu erreichen. Im Normalfall erfolgt das Aushärten in den Teilschritten Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern. Nach dem Lösungsglühen, bei Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt, sind nahezu alle Legierungselemente im Aluminiummischkristall gelöst. Mit sinkender Temperatur nimmt die Löslichkeit der Legierungsbestandteile im Mischkristall jedoch rapide ab, was bei einer schnellen Abkühlung bzw. dem Abschrecken zu einem instabilen übersättigten Mischkristall führt. Der Werkstoff hat nun das Bestreben, in einen stabilen, energetisch günstigeren Zustand zu gelangen und die im Überschuss gelösten Bestandteile auszulagern. Beim Auslagern laufen diffusionsgesteuerte Entmischungsvorgänge ab, welche bei Raumtemperatur (Kaltauslagern) oder mäßig erhöhten Temperaturen (Warmauslagern) zur Ausscheidung dieser Bestandteile führen und sich im Gefüge des Al-Mischkristalls gruppieren. Die Ausscheidung (kohärent oder teilkohärent) dieser Legierungsbestandteile führt dabei zu Verspannungen im Kristallgitter, welche einen Anstieg der Festigkeit zur Folge haben. Die Temperaturen und Zeiträume der Wärmebehandlung bzw. des Auslagerns haben dabei einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der mechanischen Kennwerte. Je nach Prozessführung kann das Auslagern der Legierung gezielt gesteuert und bestimmte Eigenschaften eingestellt werden.

[3]

Neben den Normalfällen der Aushärtung kommen auch Sonderformen, wie das vereinfachte Aushärten, zum Einsatz. Dieser Prozess beschreibt eine Auslagerung ohne Lösungsglühen. Durch ein rasches Abschrecken der Bauteile direkt nach dem Guss wird ebenso ein Ausscheiden der im Überschuss gelösten Bestandteile verhindert. Die Steigerung der mechanischen Eigenschaften erfolgt durch eine anschließende Warmauslagerung. Da die Temperatur der

Bauteile nach dem Entformen weit unter der Lösungsglühtemperatur liegt und somit weniger Legierungselemente gelöst sind, ist das Potential zur Festigkeitssteigerung im Vergleich zu einer vollen Wärmebehandlung jedoch geringer. [3]

Die unterschiedlichen Arten der Aushärtung ergeben verschiedene Werkstoffzustände, die nach DIN EN 515 [4] kategorisiert werden. In Tabelle 1 sind die, für die Automobilindustrie, üblichen Werkstoffzustandsbezeichnungen und die entsprechende Wärmebehandlung aufgeführt.

Tabelle 1: Arten der Wärmebehandlung und Werkstoffzustandsbezeichnungen nach DIN EN 515 [4]

Werkstoffzustand	Bedeutung
F	Herstellungszustand
T4	lösungsgeglüht und kaltausgelagert
T5	abgekühlt von der erhöhten Temperatur eines Formgebungsverfahrens und warmausgelagert
T6	lösungsgeglüht und warmausgelagert
T7	lösungsgeglüht und überaltert

Die Zustände T4, T5, T6, und T7 sind in Bezug auf Druckgusslegierungen relevant und unterscheiden sich in der Art des Lösungsglühens sowie des Auslagerns.

2.2 T5 Wärmebehandlung der AlSi7MnMg

Gegenstand der Untersuchung in diesem Projekt ist die Legierung AlSi7MnMg mit einer T5 Wärmebehandlung, welche in den Gussbauteilen der Sportwagen Porsche 911 (Typ 991) sowie Boxster und Cayman (Typ 982) eingesetzt wird. Die Wahl der Legierung sowie der Wärmebehandlung resultiert hierbei aus den Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften und einer möglichst hohen Maßhaltigkeit. Da die Bauteile vergleichsweise große Abmessungen aufweisen, können bei einer vollen Wärmebehandlung inkl. Lösungsglügen große geometrische Abweichungen auftreten. Mit steigenden Temperaturen und Wärmebehandlungszeiten steigt die Neigung zu Verzügen im Bauteil, da im Druckgussprozess entstehende Spannungen freigesetzt werden. Durch das Warmauslagern ohne Lösungsglügen nach T5 mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen und kurzen Haltezeiten werden die geometrischen Abweichungen bzw. Schwankungen stark reduziert aber dennoch vergleichsweise hohe mechanische Kennwerte erreicht und ein stabiler Zustand in Bezug auf Kurz- und Langzeitwärmebeständigkeit erzeugt.

Die geforderten Parameter der Auslagerung und das Verhalten der Legierung hinsichtlich der Entwicklung der Eigenschaften bilden die Rahmenbedingungen für die Optimierung des Fertigungsprozesses bzw. der Verlagerung der Wärmebehandlung in den Lacktrocknungsprozess beim OEM.

3 Prozessvergleich

Wie eingangs erwähnt stellt die Verlagerung der Wärmebehandlung einen Eingriff in den bestehenden Fertigungsprozess beim Zulieferer dar, wodurch ein verkürzter und effizienterer Prozess entsteht. Der aktuelle Fertigungsprozess beinhaltet nach dem Gießen der Bauteile ein Richten und eine Wärmebehandlung in Form einer Warmauslagerung bevor die weiteren Arbeitsschritte hin zum fertigen Produkt erfolgen. Durch die Verlagerung des Prozesses der Warmauslagerung vom Zulieferer hin zum ohnehin beim OEM durchgeführten Lackprozess verringern sich zudem die maßlichen Schwankungen. Es können engere Bauteiltoleranzen erzeugt werden, wodurch das nachträgliche Richten je nach Bauteilgröße gänzlich entfallen oder stark minimiert werden kann. Auch alle weiteren Fertigungsschritte werden aufgrund der höheren Genauigkeit positiv beeinflusst. Somit wird gleichzeitig ein stabilerer CNC-Bearbeitungsprozess sichergestellt. Durch den Entfall der Wärmebehandlung wird der Prozess somit von neun auf sieben Prozessschritte verringert. Die Reduzierung der Teilprozesse hat darüber hinaus den Vorteil, dass die geometrischen Beeinträchtigungen durch das Handling der Bauteile verringert wird

Der Entfall der Wärmebehandlung beim Lieferanten reduziert somit die Bauteilkosten durch den Entfall der, durch die Prozessschritte notwendigen, Fertigungszeiten und der benötigten Energie. Zudem wird die maßliche Genauigkeit in einem erheblichen Maße optimiert.

4 Untersuchungsumfänge zur Absicherung des Prozesses

Im Fokus der Untersuchungen zur Absicherung des Prozesses standen die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften sowie die Definition der Wärmebehandlung, welche vom Lackprozess abzuleiten war. Darüber hinaus wurde das Verhalten der Verbindungstechnik speziell beim Stanznieten sowie die Maßhaltigkeit der Gussteile während der Auslagerung untersucht. Zu diesem Zweck wurden auf Basis des Porsche 911 (Typ 991) drei Versuchskarosserien mit Gussbauteilen im F- bzw. Gusszustand aufgebaut, durch den Lackprozess gefahren und im Anschluss zerstörend geprüft. Darüber hinaus wurden Untersuchungen auf Bauteil- und Probenebene, welchen mit den Parametern der Lacktrocknung unter Laborbedingungen wärmebehandelt wurden, durchgeführt.

4.1 Mechanischen Eigenschaften und Wärmebehandlung

Um die Integration der Wärmebehandlung in den Fertigungsprozess der Karosserie zu realisieren, müssen die Gussbauteile nach der Auslagerung des Werkstoffs im Lacktrocknungsprozess gegenüber dem heutigen Prozess, vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen. Die geforderten Kennwerte der Legierung AlSi7MnMg sind in der TL133 [5] beschrieben und in Tabelle 2 für den Guss- und den T5-Zustand aufgeführt. Diese Lieferbedingungen bilden die Grundlage zur Untersuchung der mechanischen Kennwerte und stellt die Mindestanforderungen an den Werkstoff dar.

Tabelle 2: Mechanischen Eigenschaften der Legierung AlSi7MnMg im F- und T5-Zustand nach TL 133

Gießverfahren	Behandlungszustand	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]
D	F	> 100	> 240	> 10
D	T5	> 140	> 240	> 8
D = Druckguss		F = Gusszustand		T5 = Härtezustand

Die Wärmebehandlung der Einzelteile wird beim Lieferanten in einem einstufigen Prozess durchgeführt. Die Wahl der Parameter ist dem Produktportfolio des Zulieferers geschuldet und ergeben sich aus den Anforderungen verschiedener Bauteile bzw. Legierungen die zeitgleich wärmebehandelt werden. Bei der Wärmebehandlung der Bauteile im Lacktrocknungsprozess gibt die Prozessführung der Lackierung die Parameter vor, wobei die einzelnen Schritte der Lacktrocknung einen mehrstufigen Wärmebehandlungsprozess darstellen. Zur Ermittlung dieser Parameter wurden die Ergebnisse von mehreren Versuchskarossen ausgewertet, welchen mit Temperaturfühlern ausgerüstet waren und in regelmäßigen Abständen über einen Zeitraum von 50 Wochen den gesamten Lackprozess durchlaufen haben. Die resultierende Kurve des Temperatur-Zeit-Verlaufs ist eine Interpolation aus den verschiedenen Messreihen an unterschiedlichen Punkten der Karosserie mit Fokus auf der Bodengruppe, auf oder in der Nähe der Gussbauteile. Ausgehend von dieser, sich ergebenden, Kurve wurden die Eckpunkte der Wärmebehandlung im Lackprozess abgeleitet, welche im Folgenden zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und zukünftig zur Überwachung der Bauteilqualität im Serienprozess herangezogen wird. Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt diese Kurve im Vergleich zur Interpolation der Messergebnisse der Versuchskarosserien und dem Temperatur-Zeit-Verlauf

der beim Lieferanten durchgeführten Wärmebehandlung. Der Lackprozess weist vier Temperatur- und Zeitzonen für KTL-, PVC-, Füller- und Decklacktrocknung auf, welche durch vier Durchlauföfen realisiert werden.

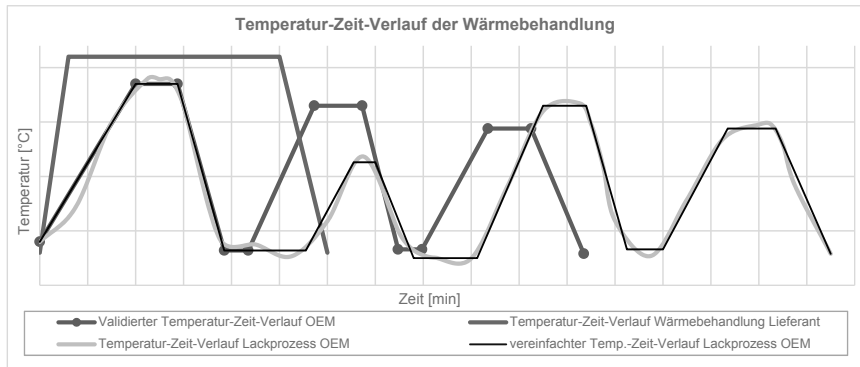


Bild 2: Temperatur-Zeit-Verlauf der Wärmebehandlung

Im Zuge der Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die PVC- für die Auslagerung eine untergeordnete Rolle spielt und daher für die Kurve der Wärmebehandlung vernachlässigt wurde.

Die Validierung dieser Parameter bzw. der abgeleiteten Wärmebehandlung erfolgte anhand von Vergleichen der mechanischen Eigenschaften. Hierfür wurden die Ergebnisse von Zugversuchen aus Proben, welche in einem Laborofen ausgelagert wurden und Proben, welche aus Bauteilen entnommen wurden die innerhalb der Karosserie den Lackprozess durchlaufen haben, gegenübergestellt. Darüber hinaus wurde die Langzeitwärmestabilität des Werkstoffs anhand von Proben nachgewiesen, welche eine Wärmebehandlung entsprechend dem Lackprozess erfahren haben. Die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften der Versuchskarossern, der Proben zur Validierung der abgeleiteten Wärmebehandlungsparameter sowie der Langzeitwärmestabilität sind im Diagramm in Abbildung 3 dargestellt.

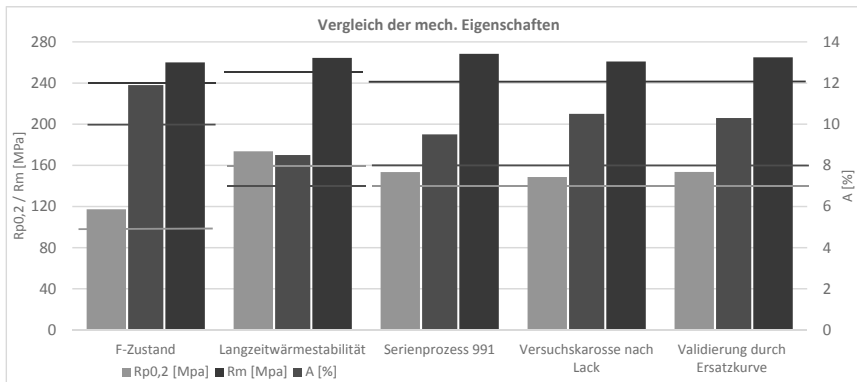


Bild 3: Mechanische Eigenschaften im Vergleich

Im Diagramm sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu den geforderten Mindestanforderungen aufgeführt. Es wird deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften nach der Wärmebehandlung im Lacktrocknungsprozess die Mindestanforderungen erfüllen. Im Vergleich zum Serienprozess werden bei geringfügig niedrigeren Festigkeitswerten höheren Werte der Dehnung erzielt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die vom Lacktrocknungsprozess abgeleiteten Parameter zur Wärmebehandlung der Proben im Laborofen den Prozess sehr gut beschreiben und eine valide Prognose der Eigenschaften darstellt.

4.2 Verbindungstechnik

Neben den mechanischen Eigenschaften war die Verbindungstechnik und speziell das Halbhohlstanznieten Gegenstand der Untersuchung, da durch die Verlagerung der Wärmebehandlung in den Lackprozess die endgültigen mechanischen Kennwerte des Werkstoffs erreicht werden nachdem die Bauteile gefügt wurden. Das bedeutet, dass die Bauteile im F-Zustand verbaut werden und somit im Vergleich zum Serienprozess verringerte Festigkeits- und erhöhte Dehnwerte aufweisen. Daher wurden zunächst anhand von Proben und Einzelteilen ohne Wärmebehandlung die Parameter des Stanznietprozesses ermittelt und den neuen Randbedingungen angepasst. Im Anschluss wurden drei Versuchskarosserien mit Gussbauteilen im F-Zustand aufgebaut und nach Abschluss aller Untersuchungen zerstörend geprüft um die Verbindungstechnik zu bewerten. Darüber hinaus wurden über einen Zeitraum von 10 Wochen Stanznietversuche durchgeführt um Aussagen über die Robustheit der Verbindungstechnik hinsichtlich schwankender Prozessparameter und das Alter der Bauteile treffen zu können. Die Auswertung aller Fügepunkte der Versuchskarosserien und die der Langzeiterprobung zeigten dabei I.O.-Ergebnisse in Bezug auf die Prüfnorm und ein sehr robustes Verhalten der Qualität der Verbindung.

4.3 Maßhaltigkeit

Durch den Entfall der Warmauslagerung wird die Maßhaltigkeit positiv beeinflusst. Grundsätzlich führt jedes Teilhandling zu geringfügigen geometrischen Abweichungen am Bauteil. Durch den Entfall der Wärmebehandlung entfällt einer dieser Prozesse, wodurch der negative Einfluss um eine Möglichkeit verringert wird. Der größte Einflussfaktor ist allerdings die Wärmebehandlung selbst. In der Wärmebehandlung werden beim Gießen entstehende Spannungen freigesetzt. Diese führen zu Verzügen an den Bauteilen und wirken somit negativ auf die Maßhaltigkeit ein. Die Tabelle 3 zeigt die positive Veränderung der Maßhaltigkeit am Beispiel eines Längsträgers sowie einer Federbeinaufnahme (FBA).

Tabelle 3: Veränderung der maßlichen Streubreite an Bauteilen in C611 im F- und T5 Zustand

Streubreite [mm]	Längsträgers T5-Zustand [%]	Längsträgers F-Zustand [%]	FBA T5-Zustand [%]	FBA F-Zustand [%]
<0,4	8	58	23	91
>0,4<0,8	73	34	55	8
>0,8	19	8	22	1

Diese Auswertung verdeutlicht, dass aufgrund des Entfalls der Wärmebehandlung der Anteil an maßlichen Schwankungen am Bauteil massiv reduziert wird. Während im gealterten T5 Zustand die Mehrheit der Messpunkte um 0,4 bis 0,8mm schwankt verschiebt sich diese Mehrheit auf kleiner 0,4mm. Und dies sowohl beim Träger III mit Bauteilabmessungen von 1055mm x 725mm x 540mm als auch bei der Federbeinaufnahme mit Abmessungen von 309mm x 285mm x 300mm. Die erreichbaren geringeren Schwankungen und somit größere Prozesssicherheit führen dazu, dass bei kleineren Bauteile kein Richtprozess mehr erforderlich ist. Bei größeren Bauteilen konnten die nachträglichen Richtaufwände reduziert werden. Durch die so erreichte höhere Prozessfähigkeit kann die finale maßliche 100% Lehrenprüfung in Teilbereichen erheblich minimiert werden.

Um einen Einfluss der Auslagerung auf die Maßhaltigkeit der Karosserie zu untersuchen wurden die Versuchskarosserien vor und nach dem Lackprozess vermessen und mit Serienkarosserien verglichen. Dabei wurde deutlich, dass die Werte der Versuchs- und Serienkarosserien vergleichbar sind und die Maßhaltigkeit der Gesamtkarosserie durch die Auslagerung der Gussbauteile in der gefügten Karosserie nicht beeinträchtigt wird.

5 Qualitätsplanung und –sicherung

Im Zuge der Prozessänderung wurden auch die Qualitätsanforderungen ganzheitlich neu betrachtet. Um mögliche Einflussfaktoren im Entwicklungsprozess zu identifizieren und anschließend zu berücksichtigen wurde zunächst die FMEA überarbeitet. Wesentliche Änderung im Prüfprozess ist die Erzeugung der Proben. Im Standardprozess wurden bislang Bauteile beim Lieferanten im Serienofen mit Serienparametern wärmebehandelt und anschließend mittels Zugproben beprobt. Durch die Verlagerung der Warmauslagerung in den Lacktrocknungsprozess des OEM müssen nun Proben aus den Bauteile mit eben diesen Parametern beprobt werden. Im Speziellen werden die Proben zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und zur Prüfung der Gewindefestigkeit mit den Parametern des Lacktrocknungsprozesses des OEMs wärmebehandelt. Die Stanznietprüfung findet nun an nicht wärmebehandelten Bauteilen statt, da auch dies dem Serienprozess der Bauteile entspricht. Hierzu wurde ein Probenofen installiert, welcher die Lackprozessparameter des OEM realisieren und den Lacktrocknungsprozesses beim OEM exakt abbilden kann. Die Ofenkurven werden gem. den Anforderungen aufgezeichnet, dokumentiert und lassen sich im zukünftigen Serienprozess den jeweiligen Proben zuordnen und archivieren. Dies dient der Qualitätsprüfung der mechanischen Eigenschaften und simuliert den späteren verbauten Zustand der Bauteile.

Die hierbei an die Ofentechnik gestellten Anforderungen lagen insbesondere darin, die erforderlichen Abkühlraten im automatisierten Laborbetrieb realisieren zu können. Diese Anforderungen waren nicht mit aktuell am Markt verfügbaren Geräten zu realisieren. Es war somit notwendig mit geeigneten Ofenherstellern in mehreren Schleifen einen Ofen zu konfigurieren, der exakt die geforderten Kundenparameter automatisiert abfahren und den Anforderungen entsprechend dokumentieren zu können.

6 Zusammenfassung

Die Integration der T5 Wärmebehandlung von Gussteilen in den Fertigungsablauf der Karosserie stellt eine konsequente Weiterentwicklung der bestehenden Prozesskette dar und bietet technologische, ökonomische sowie ökologische Vorteile für den Zulieferer und den OEM gleichermaßen. Auf Basis einer Analyse des bestehenden Serienprozesses am Beispiel der Gussbauteile des Porsche 911 (Typs 991) wurden die Potentiale dieser Prozessanpassung herausgearbeitet und eine neue Prozesskette definiert.

Zur Absicherung des Prozesses wurden Untersuchungen zur Entwicklung der mechanischen Eigenschaften, zum Verhalten der Verbindungstechnik und der Maßhaltigkeit durchgeführt. Dabei zeigte sich im Vergleich zur Serie des 991 ein Anstieg der Dehnung bei leicht geringeren Festigkeiten im T5-Zustand und der Verbau der Bauteile im F-Zustand führt zu einem robusten Verhalten des Stanznietprozesses. Es konnte weiterhin in Versuchen nachgewiesen werden, dass die Auslagerung der Gussbauteile im gefügten Zustand der Karosserie zu einer besseren Maßhaltigkeit der Einzelteile führt und keine Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit der Karosserie hat.

Um diese positiven Effekte zu erreichen wurde beim Lieferanten die serienbegleitende Qualitätssicherung an den neuen Prozess angelehnt, um den Serienprozess abzubilden. Der hier beschriebene Prozess „Verschiebung der Warmauslagerung in den Lackprozess des OEM“ birgt Potential in Bezug auf die eingangs genannten Faktoren. Er ist allerdings zwingend in Abstimmung zwischen dem Lieferanten und dem OEM durch den OEM zu validieren, da die Trocknungsparameter elementar zur Erreichung der geforderten Eigenschaften sind.

Literatur

- [1] Europäische Union, (2014). Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments, Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen
Europäische Union, Europäische Kommission, Brüssel, 2014
- [2] Christlein, J. & Kellner, P. (2017) Karosseriekonzepte bei Porsche – heute und morgen; Aachener Karosserietage 2017
- [3] C. Kammer. Aluminium-Taschenbuch. 1. Grundlagen und Werkstoffe. 16.Auflage: Aluminium-Verlag., Düsseldorf 2009, S.316-324
- [4] DIN EN 515:2017, Aluminium und Aluminiumlegierungen - Halbzeug - Bezeichnungen der Werkstoffzustände, Deutsche Fassung EN 515:2017
- [5] TL133:2017, Druckgusslegierung AC-AISi7Mg - Anforderungen und Prüfungen
Konzernnorm TL133

Aluminium-Legierungen für Strukturteile und deren Wärmebehandlung

Dr.-Ing. **Hubert Koch**,

TRIMET Aluminium SE, Essen;

Dr.-Ing. **Andreas Kleine**,

TRIMET Automotive Holding GmbH, Harzgerode

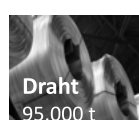
TRIMET Gruppe

Seit mehr als 30 Jahren ist TRIMET ein unabhängiges Familienunternehmen

1985	8	3000	150	1,7Mrd.€	104Mio.€	60%	775Tsd.t
Gegründet	Standorte	Mitarbeiter	Auszubildende	Umsatz	Investitionen	Eigenkapitalquote	Produktion



*Geschäftsjahr 2016/17



Aluminiumformguss

Mit Aluminiumformguss werden Fertigbauteile hergestellt, die je nach Produkt, Seriengröße und Maßgenauigkeit mit verschiedenen Gießverfahren, wie Sand-, Druck- und Kokillenguss hergestellt werden. Die Automobilindustrie ist der bedeutendste Kundenkreis für Formgießer. Die

Erzeugung von Aluminiumformguss (Druck-, Kokillen- und Sandguss) belief sich im Jahr 2015 auf insgesamt 1.065.500 Tonnen. Im Vorjahr 2014 wurden 992.800 Tonnen Aluminiumformguss produziert. Dies bedeutet in 2015 ein Produktionsplus von rund 7%.

In Tonnen	2014	2015	2016
Druckguss	576.000	615.000	631.000
Kokillenguss	303.000	332.000	344.000
Sandguss	106.000	111.000	111.000
sonstige	8.000	8.000	11.000
Gesamt	993.000	1.066.000	1.097.000

Quelle: Gesamtverband der deutschen Aluminiumindustrie, (GDA)

Aluminiumguss ist **ein begehrter Konstruktionswerkstoff** und wird heute in allen Bereichen der Technik eingesetzt. Dabei spielen natürlich die hervorragenden Eigenschaften der Aluminiumgusswerkstoffe eine entscheidende Rolle. Neben der sehr **guten Vergiessbarkeit** und den **hohen mechanischen und dynamischen Eigenschaften** sind hier zu nennen:

- Geringe Dichte
- hoher Korrosionswiderstand
- hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit
- keine Versprödung bei tiefsten Temperaturen
- schweißgeeignet mit allen gängigen Verfahren
- dekorative Gussoberflächen (Polieren, Anodisieren)
- gute Spanbarkeit
- unendlich recycelbar und damit absolut nachhaltig

Gusslegierungen und deren Anwendungspotential

Die Definition

Gegossene Strukturbauteile sind (große) stabilitätsgebende Bauteile, welche dem Leichtbaugedanken durch Maßgenauigkeit und Funktionsintegration gerecht werden. Im Crash-Fall wird von ihnen ein hohes Energieabsorptionsvermögen abgefordert.

Ralf Klos, Hubert Koch, Brainstorming 2017

Aluminium ist hier der Werkstoff der Wahl

Anforderungen an Strukturguss

- Wanddickenbereiche von ca. 1 – 4 mm
- Komplexe Geometrie mit Verrippungen, Wanddickenübergängen und Durchbrüchen
- Streckgrenzen von 100MPa bis 250MPa (und mehr)
- Zugfestigkeit von 200 – 350MPa (oder mehr)
- Dehnung > 7%
- Stabile Eigenschaften über die Lebensdauer
- Ermüdung größer 80MPa bei 10^6 Zyklen
- Zähigkeit größer 90KJ/m² oder Biegewinkel >50°
- Verbindungen mittels Schweißen, Nieten, Durchsetzfugen und Kleben
- Keine Neigung zu Spannungsrisskorrosion

Hieraus folgt, dass der Druckgussprozess das Verfahren der Wahl ist

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Patentschrift
DE 3041340 C2

DEUTSCHES PATENTAMT

Aktenzeichen: P 30 41 340.2-34
 Anmeldetag: 3. 11. 80
 Offenlegungstag: 13. 5. 82
 Veröffentlichungsdatum der Patentanmeldung: 26. 8. 87

Int. Cl. 4:
B22D 17/14

DE 3041340 C2

DE 3041340 C2

VACURAL™ Patent von 1980

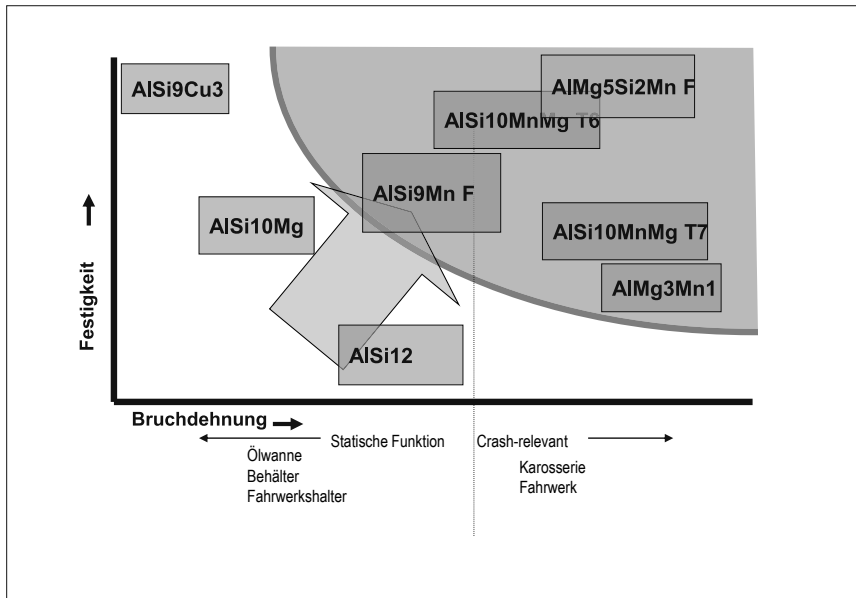
Innenhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

<p>Patentinhaber: Maschinenfabrik Müller-Weingarten AG, 7987 Weingarten, DE; Versöhle Aluminium-Werke AG, 1000 Berlin und 5300 Bonn, DE</p>	<p>Teil Nr.: P 30 50 428.8</p> <p>Erfinder: Losack, Edgar, Dr.-Ing., 5200 Rons, DE; Spriestersbach, Johan, Dr.-Ing., 6300 Alfter, DE; Baur, Josef, Schwab, Wilhelm, 7987 Weingarten, DE</p> <p>Im Prüfungsverfahren eingegangene Druckchriften nach § 44 PatG: DE-PS 19 58 261 DE-OS 14 63 969 DE-OS 14 58 181 US 38 09 218 DE-Z: Giefker, 64 (1977) B, S. 238-240; DE-Z: Giefker, 62 (1976), S. 267-262; DE-Z: Giefker-Praxis, 28 (1969), S. 365-371; DE-S: TROMMER/ALIBY, Druckgieß-Technik, Bd. I, 1965, S. 78-79, 112, 113; DE-S: BRUNHUBER, Moderne Druckgießfertigung, 1971, S. 62-61;</p>
---	---

Druckgießverfahren zur Herstellung gesammer, porosaner und oxydierter Gießstücke mittels einer Kaltkammer-Druckgießmaschine

Legierungen für Strukturteile

AlSi10MnMg
 AlMg5Si2Mn
 AlSi9Mn
 AlSi10MnMgZnZr
 (AlMg3Mn)



EN AB-Al Si10MnMg
EN AB-43500

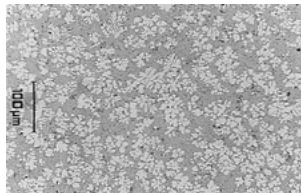
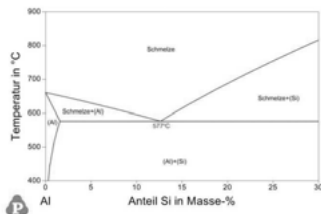
Si 10,5 Fe <0,20 Cu <0,03 Mn 0,6 Zn <0,07 Sr 0,015

Silizium: Gießbarkeit, Festigkeit

Mangan: kein Kleben in der Form, ersetzt Eisen

Magnesium: Festigkeit, Aushärtungsverhalten

Strontium: Gießbarkeit, Dehnung

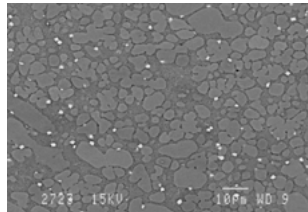
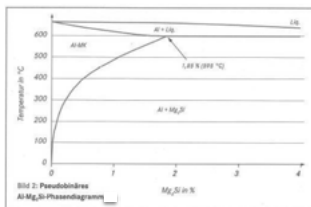


EN AB-Al Mg5Si2Mn
EN AB-51500

Si 2,2 Fe <0,20 Cu<0,08 Mn 0,6 Mg 5,5 Zn 0,07 Be 0,001

Silizium/Magnesium: Gießbarkeit, Festigkeit

Mangan: wenig Kleben in der Form, ersetzt Eisen



Al Si9Mn (Mo, Zr, V, Ti, Cu)
Nicht genormt

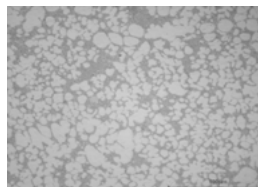
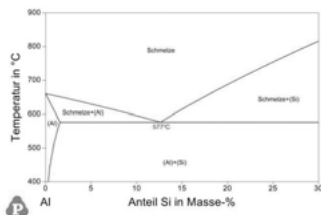
Si 9,0 Fe <0,12 Cu <0,06 Mn 0,5 Mg <0,08 Zn <0,06 Sr 0,015

Silizium: Gießbarkeit, Festigkeit

Mangan: kein Kleben in der Form, ersetzt Eisen

Mo, Zr, V, Cu: Streckgrenze

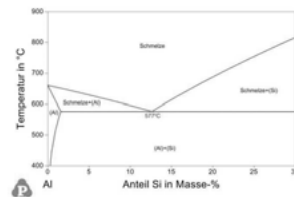
Strontium: Gießbarkeit, Dehnung



Al Si10MnMgZnZr Nicht genormt

Si 10,0 Fe <0,15 Cu <0,05 Mn 0,6 Mg 0,4 Zn 0,2 Sr 0,016

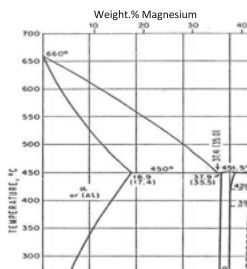
Silizium: Gießbarkeit,
Mangan: kein Kleben in der Form, ersetzt Eisen
Zirkon: Festigkeit
Zink: Formfüllung
Strontium: Gießbarkeit, Dehnung



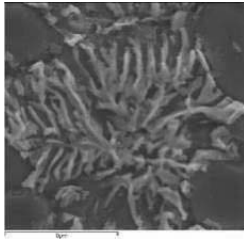
Al Mg3Mn1 Nicht genormt

Si <0,1 Fe <0,20 Cu <0,03 Mn 1,0 Mg 3,0 Zn <0,07

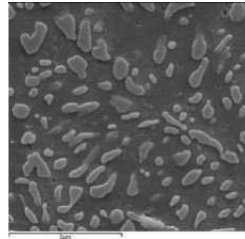
Magnesium: Festigkeit
Mangan: wenig Kleben in der Form, Festigkeit



Die Wärmebehandlung



F



T6

Die Lösungsglüh Temperatur bewirkt eine Einfeldung der Gussphasen



Durch eine schnelle Abkühlung von hoher Temperatur bis Raumtemperatur bleiben bestimmte Elemente in Lösung.

→ Der Werkstoff ist weich.

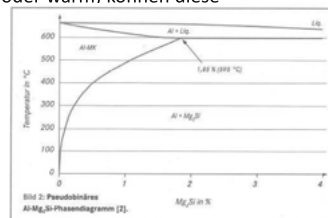
Bei einer anschließenden Auslagerung (kalt oder warm) können diese

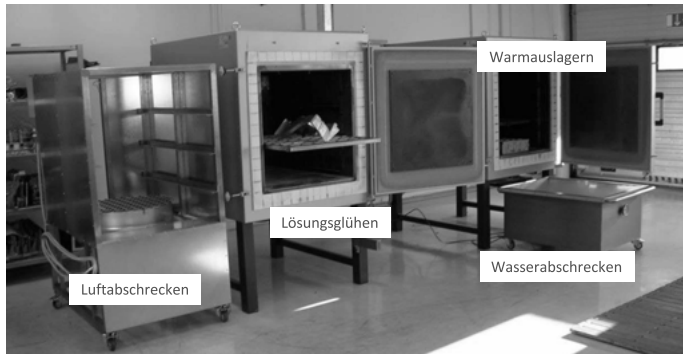
Elemente sich in der Matrix anordnen

und so das Aluminium-Gitter

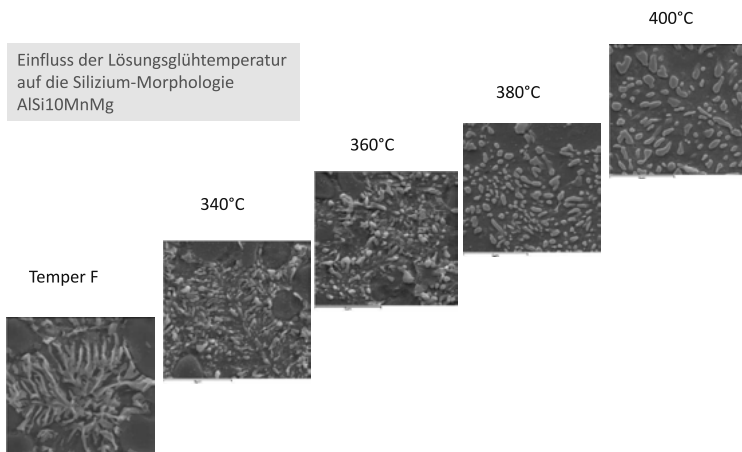
verspannen.

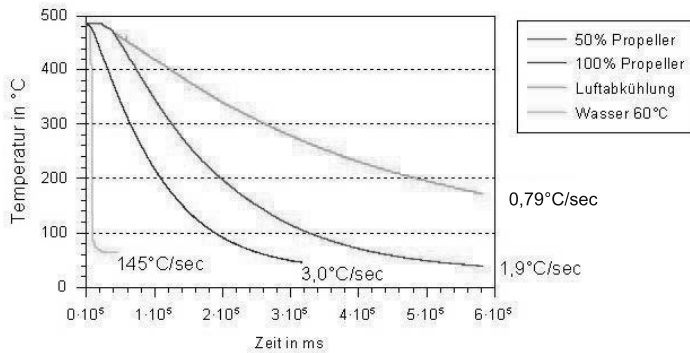
→ Der Werkstoff härtet aus.



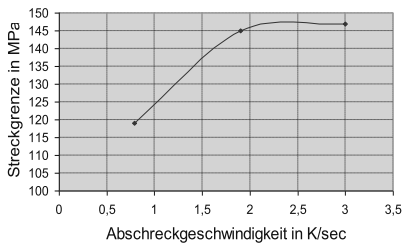


Testanlage für Wärmebehandlungen

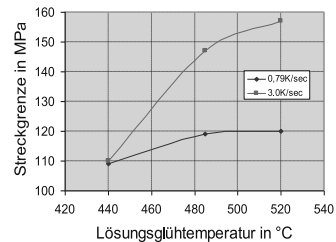


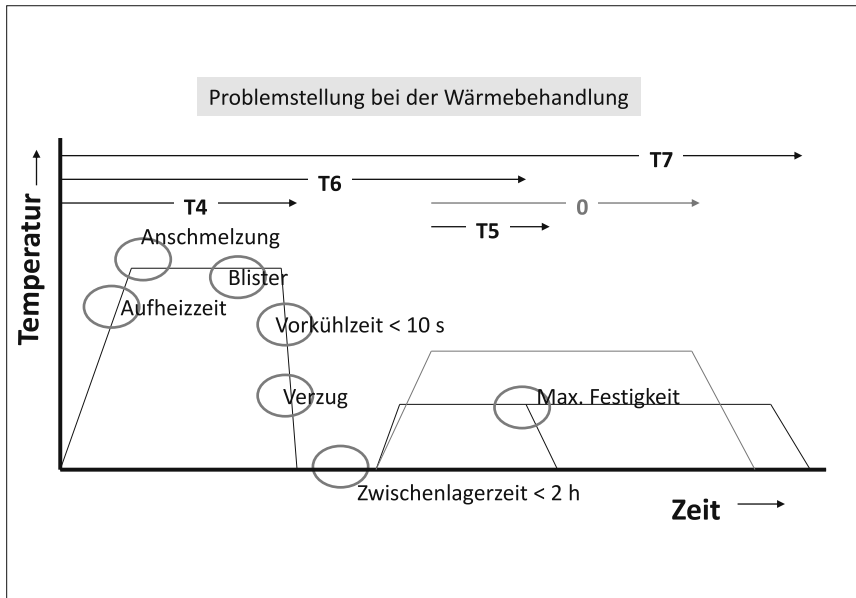


Testanlage für Wärmebehandlungen,
Abkühlungskurven



Einfluss der WB Parameter
auf die Streckgrenze
AlSi10MnMg





Eine Wärmebehandlung von Aluminium-Struktur-Guss beeinflusst:

die mechanischen Eigenschaften

die Langzeitfestigkeit

die Korrosionseigenschaften

die el. Leitfähigkeit

die Bearbeitbarkeit

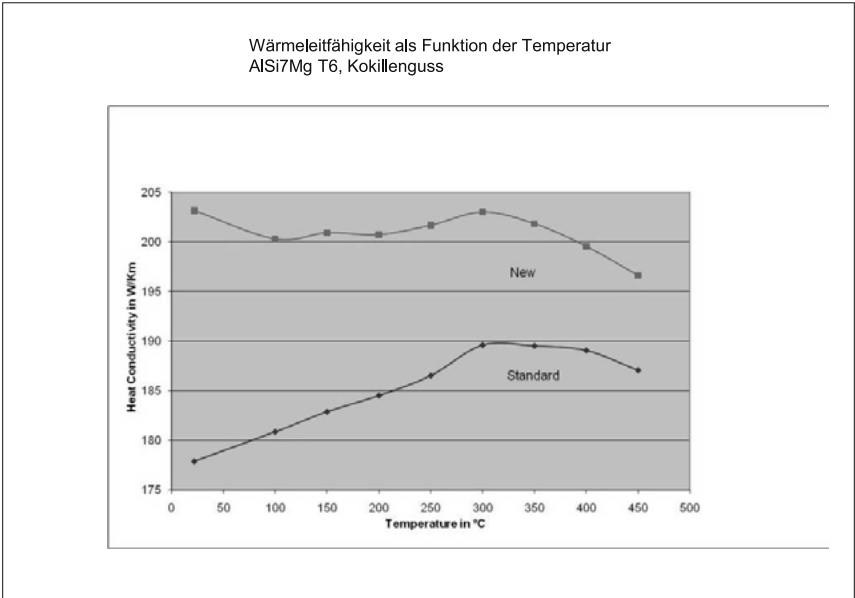
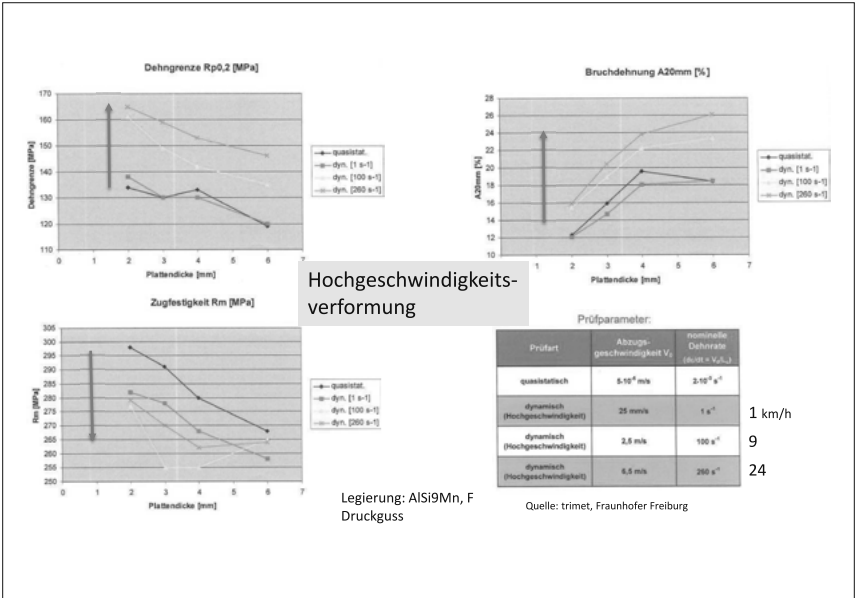
In der Hauptsache wird die Wärmebehandlung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften angewendet.

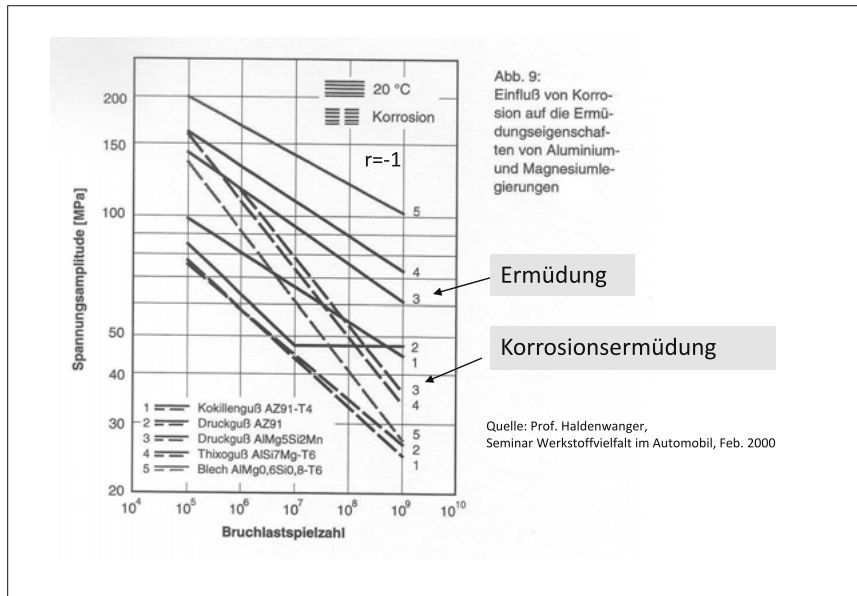
Die Werkstoffzustände /Behandlungen sind genormt und haben folgende Bezeichnungen:

- F Gußzustand
- O weicheglüht
- T1 kontrollierte Abkühlung nach dem Guß und Kaltauslagerung
- T4 Lösungsglühen, Abschrecken und Kaltauslagerung
- T5 kontrollierte (schnelle) Abkühlung nach dem Guß und Warmauslagerung
- T6 Lösungsglühung, Abschrecken und Warmauslagerung bis zur maximalen Festigkeit
- T64 Lösungsglühung, Abschrecken und Warmauslagerung bis **vor** dem Punkt der maximalen Festigkeit
- T7 Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagerung **über den** Punkt der maximalen Festigkeit hinaus

Weitere Eigenschaften







Ausblick

Gewichtseinsparung kann erreicht werden durch:

- Reduzierung der Wanddicken
- mehr Funktionsintegration
- bionische Strukturen

Der Einsatz einphasiger Legierungen sollte geprüft werden
(Wegfall der Wärmebehandlung)

Die Druckgießtechnik (Prozess und Form) muss weiterentwickelt werden

Stahlverstärkter Al-Druckguss

Integration eines Stahlkerns zur lokalen Verstärkung von Druckgussbauteilen

Steel – reinforced aluminium die casting

Integration of a steel core for local reinforcement of aluminium die casting components

M.Sc. **Dominik Schittenhelm**, Dipl.-Ing. **Jean-Marc Ségaud**,
BMW Group, Landshut

1. Einleitung

Konstruktionsseitig stehen Steifigkeits- und Gewichtsvorgaben sowie zur Verfügung stehender Bauraum in der Fahrzeugkarosserie in stetigem Zielkonflikt. Die steigenden Anforderungen an Karosseriebauteile machen zunehmend den Einsatz von Verbundwerkstoffen notwendig. [9] Der Karosseriebau wird weiterhin mit einem großen Anteil dünnwandiger Druckguss - Integralbauteile ausgestattet. Konventionelle Maßnahmen zur lokalen Steifigkeitserhöhung wie Wandstärkenerhöhung oder das Aufbringen von Gussrippen gehen mit erhöhtem Bauraumbedarf einher. Zur effizienten Auslegung von Komponenten werden vermehrt Strukturoptimierungsverfahren eingesetzt, welche sich jedoch überwiegend auf einzelne Materialien beschränken. Mit dem Ziel der Gewichtsreduzierung wird Material fern der Hauptlastpfade reduziert, ohne signifikante Steifigkeitsverluste zu erfahren. [4], [7] Aus dem Stand der Technik geht kein Optimierungstool hervor, welches mehrere Materialien zur Bauteilgestaltung einbezieht und im Grundgedanken bei unverändertem Bauteilgewicht durch Materialumverteilung die lokale Biegesteifigkeit erhöht. Die gießtechnische Umsetzung eines topologisch optimierten Umgusshybrids im Druckguss zur Erhöhung der lokalen Steifigkeit ohne erhöhten Bauraumbedarf ist ein bislang unerforschter Ansatz.

2. Motivation & Zielsetzung

Als bauraumneutrales Konstruktionsmittel soll ein Verbundhecklängsträger gestaltet und umgesetzt werden, der mit integriertem Stahlkern verstärkt ist. Hierzu wird eine Mehrphasentopologieoptimierung angewendet, welche unter Gewichtsaspekten den Stahl lastgerecht im Bauteil platziert. Der Verbundhecklängsträger soll unter Serienprozess

hergestellt und abschließend gemäß der Funktionen im Fahrzeug hinsichtlich lokaler Anbindungssteifigkeit geprüft werden.

3. Gestalt- und Topologieoptimierung

Topologieoptimierungsverfahren unterscheiden sich von der Gestaltoptimierung dadurch, dass nicht die äußere Gestalt des Bauteils verändert, sondern auch Bereiche im Inneren entfernt werden, was zu einer Änderung der Bauteiltopologie führt. Für den hybriden Leichtbau ist der menschliche Knochen ein Vorbild. Er weist Bereiche unterschiedlicher Porositäten auf (Knochenschwamm), die sich in einem durchgehend ändernden biologischen Prozess so anordnen, dass auf Basis der Knochenbelastung eine hohe Steifigkeit entsteht. Da es sich dabei um eine Materialumverteilung handelt, bleibt die Masse des Knochens in der Regel erhalten (krankheitsbedingte Ausnahme: Osteoporose). Auf Basis des Knochenumbauprozesses wurde am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) die sogenannte Mehrphasen-Topologieoptimierung (MPTO) entwickelt. [3], [8], [2] Die MPTO verteilt Materialphasen unterschiedlicher physikalischer Dichte ρ in einer mechanisch belasteten Struktur so, dass eine hohe Gesamtsteifigkeit entsteht. Als Maß für eine Art physikalischer Nachgiebigkeit wird dabei die innere elastische Energie U angenommen. Für ein statisch bestimmtes System gilt allgemein, dass einer mechanischen Belastung mit maximaler Steifigkeit begegnet wird, sobald die elastische Energie U ihr Minimum erreicht. Diese lässt sich anhand folgender Formel ermitteln, in der ε die lokale Dehnung, σ die lokale Spannung und $D(E, \nu)$ die lokale Elastizitätsmatrix beschreibt. V deklariert das Volumen der Struktur [3]:

$$U = \frac{1}{2} * \int \varepsilon^T * \sigma * dV = \frac{1}{2} * \int \varepsilon^T * D * \varepsilon * dV ; \text{ mit } U \rightarrow \min$$

Wendet man nun eine FE - Methode mit $m=m_1+m_2+...m_n$ Elementen auf ein System bestehend aus n unterschiedlichen linear elastischen Materialien an, deren Eigenschaften sich durch die jeweilige Elastizitätsmatrix D_j ($j=1,...,n$) definieren, ergänzt sich die Gleichung zur Ermittlung der inneren Energie U wie folgt:

$$U = \frac{1}{2} * \left(\sum_{m_1} \varepsilon_l^T * D_1 * \varepsilon_i * V_i + \sum_{m_2} \varepsilon_l^T * D_2 * \varepsilon_i * V_i + \dots + \sum_{m_n} \varepsilon_l^T * D_n * \varepsilon_i * V_i \right)$$

Die Validierung des Modells ist anhand der lastgerechten Umverteilung von Material innerhalb eines menschlichen Knochens bei dauerhaftem einbeinigem Stand erfolgt. Bild 1 zeigt den Lastfall, sowie die sich ändernde Materialdichte innerhalb des Knochens. Für den gewählten Lastfall gilt, dass die Muskelkraft F_M zur Gewichtskraft F_G und somit der Gewichtshebelarm L_G zum Muskelhebelarm L_M im Verhältnis 2:1 stehen.

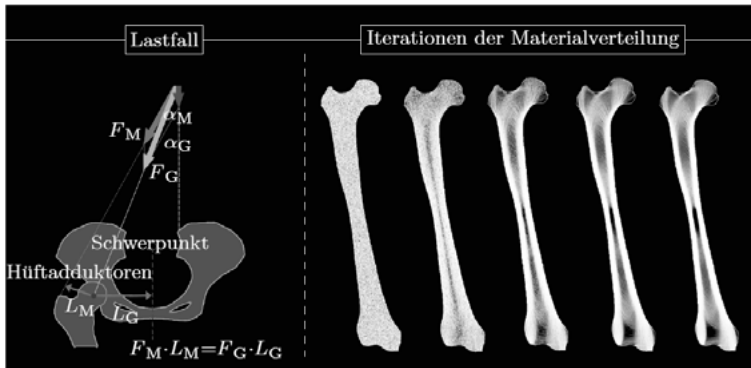


Bild 1: Lastgerechte Umverteilung von Material innerhalb eines menschlichen Knochens bei dauerhaftem einbeinigem Stand, [2], Grafik Lastfall i.A.a. [8]

In Bild 2 sind die realen Röntgenbilder gegenüber der errechneten Struktur mittels MPTO gezeigt, welche ebenso die Materialumverteilung zum Rand des Knochens hin zeigen. Bei genügend feiner Modellvernetzung ist die MPTO ebenfalls in der Lage, die Ausbildung von Lamellenbögen im Knochen auf der Seite der Lasteinleitung über die Hüftadduktoren abzubilden.

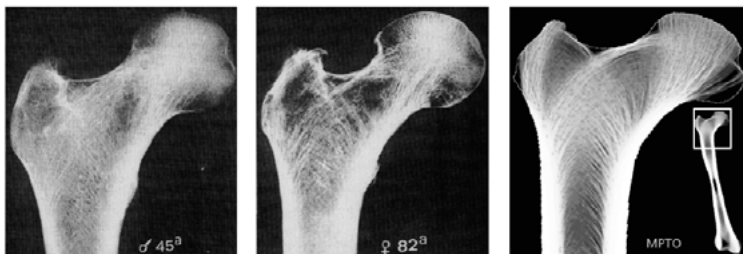


Bild 2: Gegenüberstellung realer Röntgenbilder zur numerisch berechneten Knochenstruktur mittels MPTO, Bild links und mitte i.A.a. [8]

4. Bauteilauslegung

4.1. Alternative Versteifung von Schalenbauteilen

Im numerischen Modell werden Strukturbauteile aufgrund von Rechenzeiten vorzugsweise als Schalenstruktur umgesetzt. Im Gegensatz zu Volumenstrukturen (Bsp. Knochen aus Bild 2) gibt es hier einen zusätzlichen Freiheitsgrad: die Schalendicke. Aus konstruktiver Sicht ist es damit möglich, Steifigkeiten durch stärkere Wanddicken oder lokale Verrippung auf dem Bauteil zu erhöhen. Bild 3 zeigt die heute gängigen Konstruktionsmethoden der Bauteilversteifung (Wanddickenerhöhung, Verrippung) sowie den hier verfolgten Ansatz der Hybridbauweise mit Stahlkern.



Bild 3: Konstruktionsmethoden zur lokalen Steifigkeitserhöhung von Gussbauteilen

Die Auswahl der geeigneten Versteifung ist von Kosten, Bauraum und Gewicht abhängig.

5. Charakterisierung des Hecklängsträgers

Das Versuchsbauteil ist das Segment zur Federbeinaufnahme eines Hecklängsträgers. Der Bereich der Anschraubpunkte des Luftfederbeins ist zunächst mit konventionellen Gussrippen zur Steifigkeitserhöhung versehen. Zwecks Bauraumgewinn sollen nun die Gussrippen entfernt werden. Der gesamte Topf mit Verrippung bedarf in Z-Richtung einen Bauraum Z_B von 200 mm. Der Entfall der Rippen entspricht einem gewonnenen Bauraum ΔZ_B von 25 mm. Der Bauraumgewinn von 5 mm oberhalb sowie 20 mm unterhalb der Federbeinaufnahme sowie die Gewichtsreduzierung Δm von 0,71 kg durch Entfall der Rippen ist in Bild 4 ersichtlich. Die Gussrippen sind rot hervorgehoben.

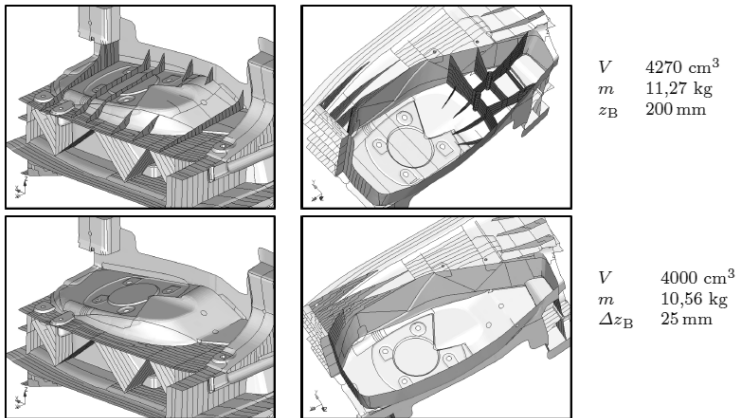


Bild 4: Topologie und Referenzgrößen des Versuchsträgers mit und ohne Verrippung

Das Bauteil ist getreu den Lagerstellen im Fahrzeug fixiert. Die Angriffsfläche des Zugstempels zur Lasteinleitung in den Federbeintopf entspricht der Auflagefläche des realen Luftfederbeins. Die notwendige Stempelkraft F_S für einen Stempelweg x_S von 1 mm wird als Bauteilsteifigkeit E_B in N/mm definiert und bildet die Bewertungsgrundlage des Versuchsaufbaus. Da die Stempelfläche gelenkig gelagert ist und erst vollständig an der Bauteilkontur aufliegen soll, wird zunächst eine Vorkraft F_V von 0,45 kN angefahren. Bild 5 zeigt die Umsetzung des Ersatzlastfalles für die Verstärkungsentwicklung.

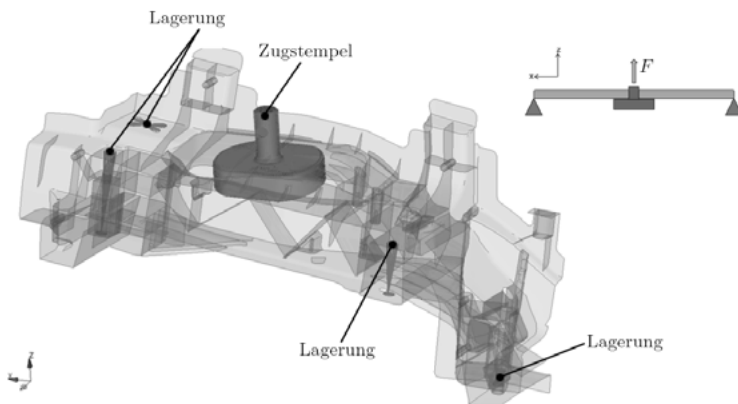


Bild 5: Numerischer Aufbau des Zugprüfstands zur Ermittlung der Bauteilsteifigkeit in der Federbeinaufnahme

Die Kraftwerte sind zunächst der numerischen Berechnung entnommen und werden später mit dem realen Prüfstand abgeglichen. Das monolithische Bauteil ohne Gussrippen zeigt für einen Stempelweg x_S von 1 mm eine Stempelkraft F_S von 13,44 kN. Die klassische Verrippung verstärkt das Bauteil im Lastfall um 43,2 % und hebt die notwendige Stempelkraft F_S auf 19,25 kN an. Die Prüfung wird im linear - elastischen Bereich gefahren, wodurch keine plastische Verformung im Bauteil verbleibt. Bild 6 stellt die Kraft/Weg - Verläufe des unverstärkten Bauteils der monolithischen verrippten Variante gegenüber.

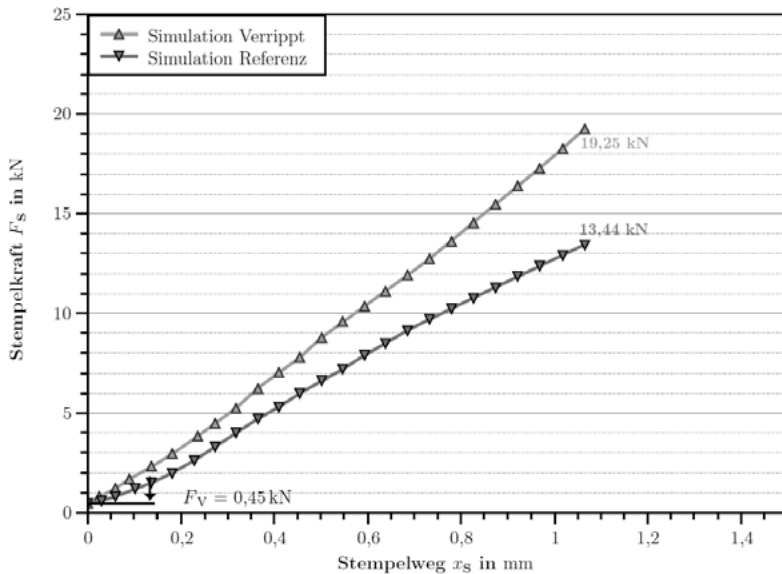


Bild 6: Steifigkeitserhöhung durch Verrippung im Bereich des Federbeintopfes

Als Konstruktionsalternative soll nun mit Hilfe der mehrphasigen Topologieoptimierung eine Erhöhung der notwendigen Stempelkraft F_S bei gleichem Gewicht zur verrippten Variante jedoch ohne zusätzlichen Bauraumbedarf erreicht werden (vgl. Bild 4).

6. Experimentelle Umsetzung

6.1. Besonderheiten von Metall-Metall-Hybriden

Stellt man die gängigen Materialien aus der Werkstoffklasse der Metalle hinsichtlich ihres spezifischen E-Moduls $E_{\text{spez.}}$ (E-Modul E / Dichte ρ) gegenüber, wird ersichtlich, dass Materialeigenschaften einer metallischen Werkstoffpaarung zu keiner spezifischen Steifigkeitserhöhung führen. Bei einachsigen Spannungszuständen ist die Ausrichtung von Materialstrukturen bei für die optimale Steifigkeit äußerst wichtig. Bild 7 zeigt die E-Moduln E der gängigen metallischen Werkstoffe relativ zu ihrer Dichte ρ . Die theoretischen Steifigkeitswerte des Verbunds zwischen Aluminium und Stahl wurden anhand der Mischungsregel von Faserverbundwerkstoffen bei Belastungen in bzw. quer zur Faserrichtung ermittelt. [1] Die elastischen Materialeigenschaften eines Aluminium - Stahl - Verbundes unter

einachsiger Belastung bewegen sich in der Fläche zwischen den Idealwerten für Parallelschaltung $E_{||}$ und Reihenschaltung E_{\perp} .

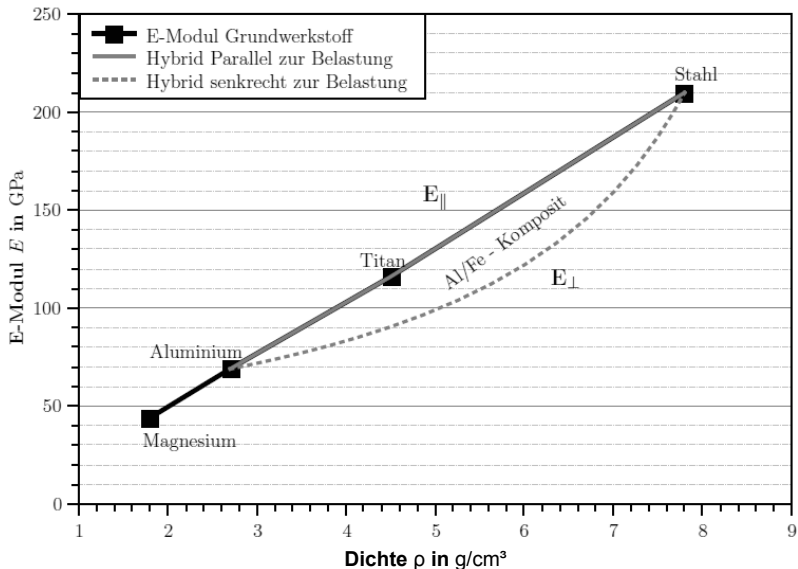


Bild 7: Steifigkeiten von Verbundstrukturen aus metallischen Werkstoffen

Für einen sinnvollen Einsatz einer Materialpaarung muss daher stets der Belastungsfall auf den Werkstoffverbund mit berücksichtigt werden. *Michael F. Ashby* gibt mit den sogenannten „Ashby-Diagrammen“ auf Basis eines Werkstoffindex M_1 eine erste Auswahlhilfe geeigneter Werkstoffe mit Einbezug der Belastung unter Leichtbaaspekten.

6.2. Mehrphasentopologieoptimierung am Hecklängsträger

Für die Verteilung mehrerer Materialien innerhalb des Gussteils, wird für die Berechnungsschritte im Modell ein so genannter „Frozen – Bereich“ und ein „Design – Bereich“ definiert. Während der Frozen - Bereich bei der Mehrphasigen Topologieoptimierung (MPTO) unangetastet bleibt, dient der Design - Bereich als Freiraum zur Umverteilungen von Aluminium und Stahl im festgelegten Volumenverhältnis. Die Verteilung der steiferen Phase,

in diesem Fall Stahl, ist damit örtlich begrenzt. Dies kann aus konstruktiver Sicht sinnvoll sein, sofern Fügestellen am Gussteil zur Integration in die Rohkarosserie kein Hybridmaterial aufweisen dürfen. In Bild 8 ist die Unterteilung im Berechnungsmodell dargestellt. Das gesamte Volumen V des Design – Bereiches beträgt $501,82 \text{ cm}^3$. Aus Bild 4 ist ersichtlich, dass für Gewichtsgleichheit zur verrippten Variante $0,71 \text{ kg}$ Stahl zur Verfügung stehen. Mit einer Dichte ρ von $7,86 \text{ g/cm}^3$ für Stahl und $2,64 \text{ g/cm}^3$ für Aluminium ist demnach im Designbereich eine Volumenverteilung von $18 \text{ Vol} - \% \text{ Stahl}$ und $82 \text{ Vol} - \% \text{ Aluminium}$ zulässig. Vom Gesamtvolumen V nimmt der Stahl $90,33 \text{ cm}^3$ und Aluminium die restlichen $411,49 \text{ cm}^3$ ein.

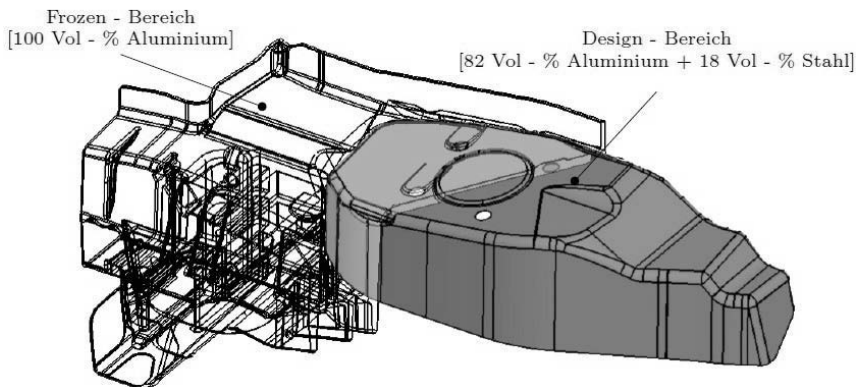


Bild 8: Einteilung des Modells in Frozen- und Design - Bereiches

Innerhalb der MPTO werden 25 Iterationen der Materialumverteilung im Hybridbauteil durchlaufen. Die Optimierung startet bei einer zunächst stochastischen Verteilung im Design - Bereich. Unter Belastung gemäß des definierten Lastfalles (vgl. Bild 5) werden Aluminium und Stahl gemäß der inneren Energien U umverteilt. Die Stempelkraft F_s erhöht sich bereits nach der ersten Iteration von den anfänglichen $13,44 \text{ kN}$ auf $16,93 \text{ kN}$. Die maximale innere Energie U_{Max} des Bauteils unter Belastung reduziert sich simultan zur Steifigkeitserhöhung von $0,217 \text{ mJ}$ auf $0,197 \text{ mJ}$. In Bild 9 wird die sich verändernde Verteilung des Stahlanteils in rot mit fortlaufendem Iterationsschritt deutlich. Das letzte Bild der Reihe zeigt die abgeschlossene Umverteilung der $18 \text{ Vol} - \% \text{ Stahl}$ im Design - Bereich. Das Bauteilgewicht m bleibt über die Iterationsschritte hinweg unverändert.

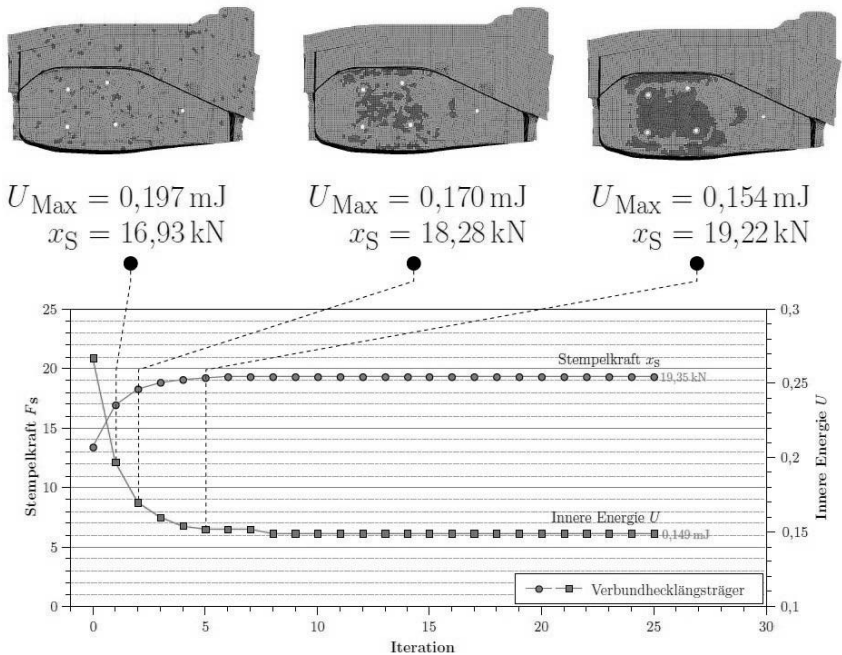


Bild 9: Lastfalloptimierte Materialverteilung bei 18 Volumen-% Stahl im Verbundhecklängsträger

Numerisch zeigt die Anwendung der MPTO auf den Verbundhecklängsträger, dass bei lastgerechter Umverteilung der zur Verfügung stehenden 0,71 kg Stahl im Bauteil die Verbundvariante nahezu die gleiche Bauteilsteifigkeit E_B im Lastfall erreicht, wie das verrippte Konzept mit 19,25 kN.

7. Praktische Versuche

7.1. Gießtechnische Umsetzung des Verbundhecklängsträgers

Die Vorteile der Grundwerkstoffe Aluminium und Stahl sollen im Verbund zum Tragen kommen, jedoch erschweren die Materialeigenschaften deren fertigungstechnische Paarung. Die begrenzte Löslichkeit der Materialien zueinander und die durch Diffusion ausgebildeten hochspröden intermetallischen Phasen Fe_2Al_5 (1000 - 1050 HV) und FeAl_3 (1000 - 1100 HV)

wirken sich negativ auf die Beständigkeit des Verbundes aus. [10] Der wohl kritischste Faktor bei der Paarung von Aluminium und Stahl ist die Differenz des elektrochemischen Normalpotentials ε_0 der Werkstoffe zueinander. Aluminium ist mit $-1,66$ V deutlich edler als Eisen mit $-0,44$ V. Beim Kontakt der Materialien unter Präsenz eines Elektrolyten korrodiert der Stahl als unedleres Metall. [6] Ein Ansatz die Werkstoffe trotz der fertigungstechnischen Hürden zu paaren, ist deren Verbund im Druckgießprozess. Die schnellen Abkühlgeschwindigkeiten bieten wenig bis keinen Zeitraum für Diffusionsprozesse wodurch spröde intermetallische Phasen ausbleiben. Der vollständige Umguss eines Einlegekerns mit einer Aluminiumlegierung unterbindet die Korrosionsproblematik, da die Kontaktfläche zur Umgebung und damit zu elektrolytisch wirkenden Stoffen abgeschirmt ist. Letzteres charakterisiert den Verbund als Aluminium – Stahl Sandwichstruktur, bei der der Stahl als Kern im Druckguss vollständig mit Aluminium ummantelt wird. Bild 10 zeigt die geplante Umsetzung des Hybridbauteils im Verbundguss. Die Dicke t der Aluminiumdeckschicht bleibt konstant bei 1 mm während der Stahlkern die Bauteilkontur abbildet und je nach Gusswandstärke von $t = 2$ bis 8 mm variiert.

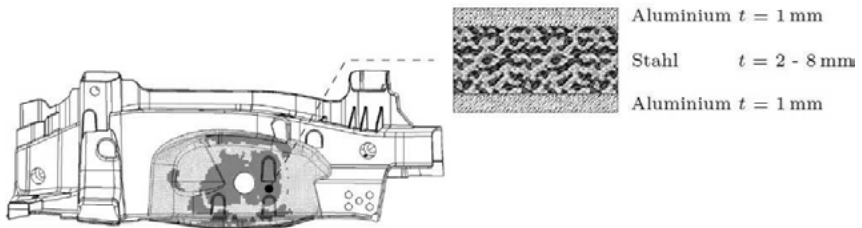


Bild 10: Prinzip der Umsetzung des hybriden Bereiches als Sandwichbauweise

Die in Bild 9 numerisch ermittelte Geometrie wird aus Vollmaterial gefertigt. Hierzu wird der thermomechanisch gewalzte, höherfeste Stahl S355MC (1.0976) verwendet. Da ein Stoffschluss ausbleiben soll, wird der Einleger zur formschlüssigen Verankerung mit zusätzlichen Durchbrüchen versehen. Aufgrund der geringeren Kerbwirkung im eingegossenen Zustand werden Rundlöcher mit einem Durchmesser D von 5 mm eingearbeitet. Die Stegbreite S zwischen den Löchern beträgt 10 mm. Bild 11 zeigt die fertigungsgerechte Adaption der numerisch ermittelten Geometrie als Stahleinleger. Als Modifikationen sind die Bereiche gekennzeichnet, welche aufgrund der Fertigbarkeit angefügt werden.

Stahlverteilung nach MPTO

Fertigungsgerechte Anpassung der Struktur

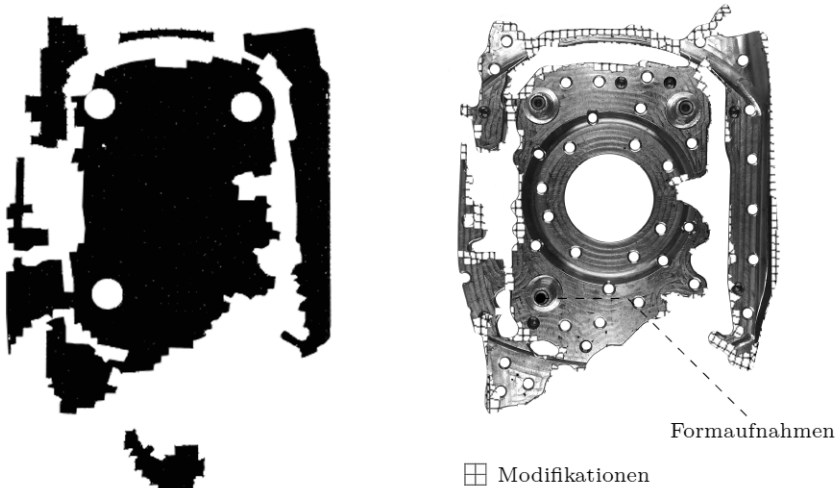


Bild 11: Fertigungsgerechte Adaption der numerisch ermittelten Einlegegeometrie

7.2. Bauteilherstellung im Druckguss

Um den Stahleinleger in der Druckgussform aufnehmen zu können, wird diese mit drei konischen Vertiefungen versehen, an deren Grund Magnete (Samarium (Sm) - Cobalt (Co)) eingesetzt werden. In den Stahleinlegern sind der Aufnahme entsprechend konisch ausgeformte Aluminium - Pins eingeschraubt. Über eingesetzte Innensechskantschrauben lässt sich der Stahleinleger magnetisch in der Form fixieren. Die Lagerstellen werden an den späteren Verschraubungspunkten des Lufffederbeins positioniert und so im Rahmen der mechanischen Nachbearbeitung des Gussteils wieder entfernt. Bild 12 zeigt das Lagerungskonzept auf der fahrenden Seite der Druckgussform sowie die Aufnahmepins des Einlegers.

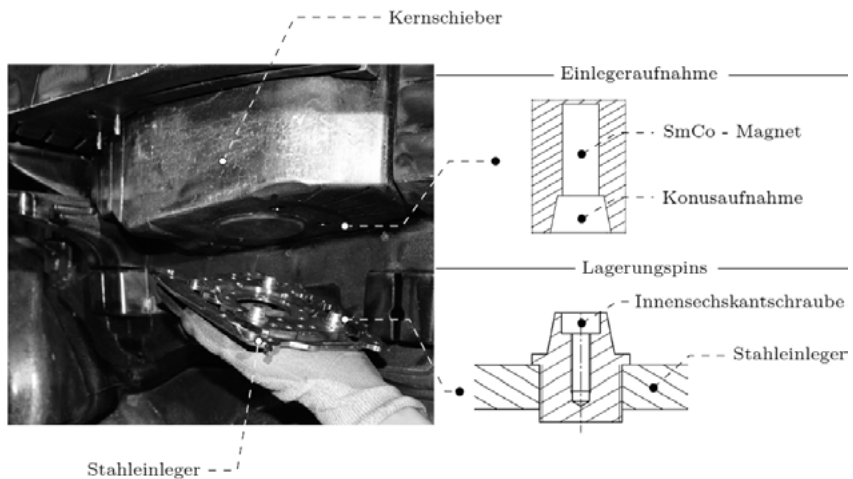


Bild 12: Aufnahme des Stahleinlegers am Kernschieber der fahrenden Formhälfte

Die Stahleinleger werden auf einer Druckgussmaschine Evolution 400D der Firma *Bühler* unter Serienbedingungen eingegossen. Das Einsetzen des Stahleinlegers in die Form erfolgt vor jedem Schuss manuell. Die Umgussmatrix bildet eine AlSi10MnMg Druckgusslegierung welche in der Versuchsreihe bei einer Schmelztemperatur T_S von 700 °C vergossen wird. Die Druckgussform bleibt auf $T_F = 160$ °C aufgewärmt. Der Stahleinleger wird nicht aktiv vorgewärmt und misst in Moment des Schmelzekontaktes ca. eine Temperatur T_B von 80 °C Bild 13 zeigt den eingesetzten Stahleinleger in der geöffneten fahrenden Formhälfte sowie die Gießparameter zur Bauteilherstellung.

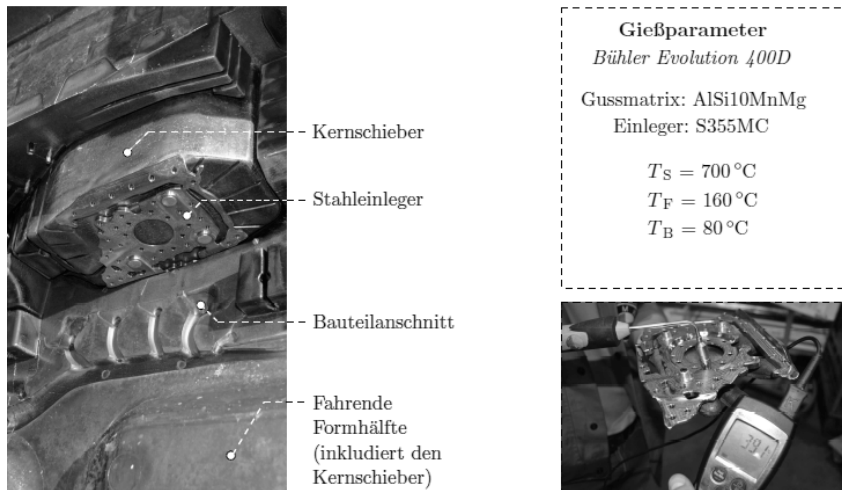


Bild 13: Geöffnete Formhälfte mit eingesetztem Stahleinleger am Kernschieber

7.3. Bauteilprüfung

Gemäß des Ersatzlastfalles aus Bild 5 wird ein identischer Aufbau auf einer *Zwick Roell Z020* Universalprüfmaschine installiert. Der Zugstempel fährt bis zum Erreichen einer Vorkraft F_V von 0,45 kN und anschließend mit einer Geschwindigkeit v_S von 5mm/min bis zum Erreichen des Stempelwegs x_S von 1 mm. Um die tatsächliche Deformation im Bereich der Federbeinaufnahme mit dem Traversenweg der Prüfmaschine zu eichen, wird ein taktiler Messaufnehmer auf dem Federbeintopf platziert, der dem Wegmesspunkt der Simulation entspricht. Bei einem Stempelweg x_S von 1,065 mm auf der Z020 Prüfmaschine liegt die Deformation am Bauteil bei 1 mm. Wie eingehend definiert, ist die Messgröße die maximale Stempelkraft F_S .

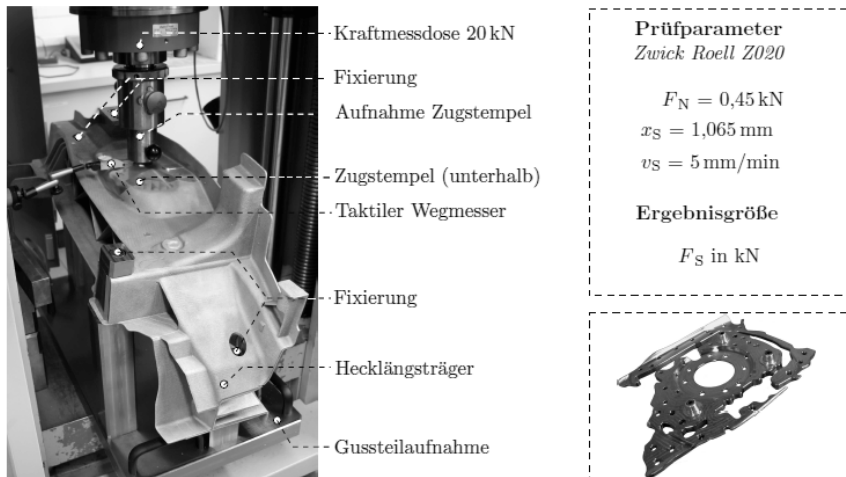


Bild 14: Prüfaufbau zur Messung der Biegesteifigkeit des Verbundlängsträgers

Im gezeigten Prüfaufbau werden jeweils 5 Bauteile geprüft. Aus den Kraft/Weg - Verläufen der Bauteile bildet sich der Mittelwert \bar{x} mit dazugehöriger Standardabweichung σ_S . Die in Bild 6 zunächst numerisch berechneten Kraftwerte stimmen mit den realen Werten auf dem Prüfstand bei den monolithen Bauteilen mit einer Toleranz von unter 2,5% gut überein. Der Verbundhecklängsträger mit eingegossener Stahlstruktur erreicht auf dem Prüfstand im Mittel eine Stempelkraft F_S von 16,05 kN und erzielt so eine Steifigkeitszunahme von 17,46 % gegenüber der unverstärkten Aluminiumreferenz (2,5% Toleranz des Simulationswertes eingerechnet). Bild 15 ergänzt die Kraft/Weg - Verläufe der Vergleichsbauteile um die Realwerte des verrippten und des hybriden Hecklängsträgers (HLT).

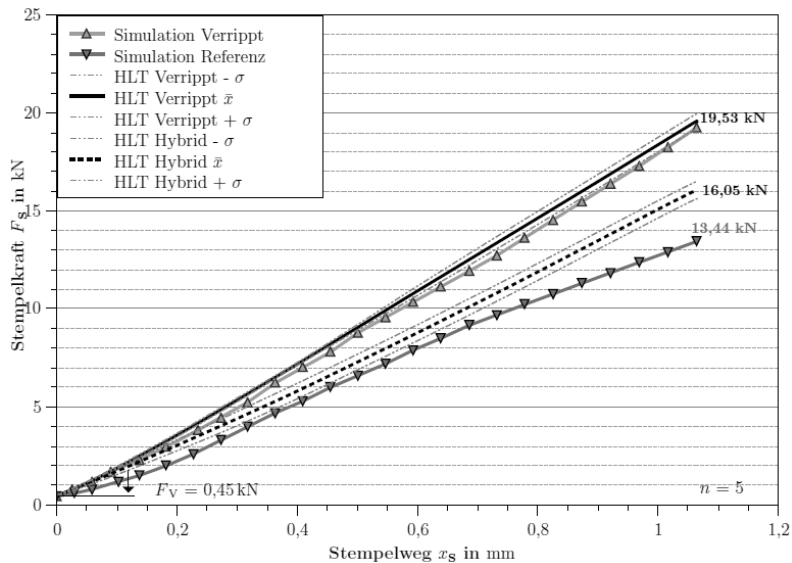


Bild 15: Darstellung der Verstärkungswirkung durch Hybridbauweise und Verrippung gegenüber dem unversteiften Referenzbauteil

Obwohl die Verbundbauweise eine Steifigkeitszunahme von 17,46 % erzielt, liegt die Stempelkraft F_S bei gleichem Bauteilgewicht unterhalb der verrippten Bauweise. Eine Erhöhung der lokalen Steifigkeit durch die Verbundbauweise wurde erzielt, jedoch bei gleichem Gewicht im Mittel mit einem Delta von 3,48 kN zur verrippten Aluminiumbauweise.

8. Diskussion der Ergebnisse

Es zeigt sich ein deutliches Delta zwischen den Ergebnissen der numerischen Optimierung und dem Realbauteil mit eingegossenem Kern. Einen gravierenden Faktor spielen hier fertigungstechnische Restriktionen. Bei Schalenmodellen nimmt die MPTO an, dass Stahl den gesamten Querschnitt einnimmt. Das Potential hinsichtlich Biegesteifigkeit wird durch den vollständigen Umguss des Stahls im Realbauteil jedoch stark reduziert. Unter Biegebelastung wirkt sich hier der reduzierte Steineranteil des steiferen Materials in Form reduzierter Biegesteifigkeit aus. [5] Darüber hinaus wird die Anbindung der Materialien in der MPTO als Optimal angenommen. Dieser Zustand lässt sich im Verbunddruckguss nicht erzielen. Trotz formschlüssiger Verankerung sind Verluste in der Krafteinleitung gegenüber einer perfekt angebundenen Grenzschicht zu verzeichnen.

9. Zusammenfassung & Fazit

Durch die lastgerechte Integration eines Stahlkerns zeigt sich zwar eine Verbesserung der Bauteilsteifigkeit, jedoch weicht diese durch fertigungstechnische Restriktionen des Verbundgusses stark vom numerischen Optimum ab. Die durch den Stahlkern erreichte, gewichtsbezogene Erhöhung der Bauteilsteifigkeit zeigt sich damit ineffizienter als konventionelle Gussrippen auf dem Bauteil. Bei verfügbarem Bauraum ist unter Steifigkeitsaspekten eine reine Aluminiumbauweise einem Hybridkonzept vorzuziehen. Soll ohne zusätzlichen Bauraumbedarf die lokale Bauteilsteifigkeit erhöht ist dies mit topologisch optimierten Einlegekernen möglich. Hier gilt es abzuwägen, ob das Verhältnis von Verstärkung zu Gewichtszunahme akzeptabel ist.

Literatur

- [1] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (2014). Handbuch Faserverbundkunststoffe - Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen (4. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [2] Baumert, M., Bonke, A., Burblies, A., Ivanova, E., Nikolay, D. & Schulen, V. (2013). Design und Herstellung gradierter zellulärer Endoprothesen und Leichtbaustrukturen (Abschlussbericht Förderrichtlinie BIONA - Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien. Abgerufen von Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/787864188.pdf>
- [3] Burblies, A. & Busse, M. (2006). Computer Based Porosity Design by Multi Phase Topology Optimization. In American Institute of Physics (AIP) (Hrsg.), Multiscale & Functionally Graded Materials Conference (S.285-290). Honolulu: Springer.
- [4] Friedrich, H.-E. (2013). Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- [5] Karl, C., Montenegro, D., Runkel, F. & Schneeberger, C. (09. Dezember 2015). Vorlesung Leichtbau, Herbstsemester 2015: Sandwichstrukturen: Musterlösung Übung 11 [Vorlesungsskript]. Abgerufen am 23. September 2017 von https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Leichtbau/HS2015/exercises/Uebung11_Musterl%C3%B6sung.pdf
- [6] Kohaupt, B. (1996). Praxiswissen Chemie für Techniker und Ingenieure (5. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- [7] Krishnamoorthy, S., Beeh, E., Schöll, R. & Friedrich, H. (2012). Methodik zur Karosserieentwicklung mittels Topologieoptimierung. Tagung Faszination Karosserie und Fahrzeugkonzepte. Wolfsburg: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- [8] Kummer, B. (2005). Biomechanik: Form und Funktion des Bewegungsapparates. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.
- [9] Pudenz, K., Der neue BMW 7er mit Carbon Core: 130 kg leichter. Automobil + Motoren, SpringerProfessional, Abgerufen am 02. Dezember 2017 von <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/werkstoffe/der-neue-bmw-7er-mit-carbon-core-130-kg-leichter/6585360>
- [10] Shahverdi, H. R., Ghomashchi, M. R., Shabestari, S. & Hejazi, J. (2002). Microstructural analysis of interfacial reaction between molten aluminium and solid iron. In ELSEVIR (Hrsg.), Journal of Materials Processing Technology (Volume 214, Issue 3, S. 345-352). Abgerufen von ScienceDirect.

Standardisierung als Schlüssel für Innovationen

Nische oder Volumen? Die Prozesskette Druckguss im Wandel der Reifegrade

Prof. Dr.-Ing. **Sven Roeren, Severin von Kuepach**, M.SE.
Hochschule Landshut

Abstract

Where are we today in casting of complex automotive structures? An easy question in a first view. But, the authors are sure that there would be no clear answer, if the two possible answers were 'innovation market' or 'volume market'. The following article shows the challenge to focus the situation of the market for complex casted structural parts in automotive industry. Nevertheless, standardization leads to a push towards the maturity level of the technology and to more acceptance for the customers. Diverse ways for an implementation of standardization and their impact on the markets are discussed. In addition, critical limits of standards are pointed out, for example in case the core competence of a foundry is spread even to a possible competitor's catch. But, in the complex area of e.g. high pressure forming standards within the entire process chain leads to a better understanding of parameters' influences and potential improvements in general.

1. Hinführung und Hintergründe

Die Komplexität der Prozesskette zur Herstellung und Bearbeitung von Strukturbauteilen auf der Basis von Gießprozessen im Automobilbau ist in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Komplexität kann in diesem Zusammenhang als Überlagerung von Unsicherheit (etwa über neue Fehlerbilder durch ein stetiges Ausreizen von Prozessgrenzen), Dynamik (sich ständig verändernde Planungsgrundlagen) und Vielfältigkeit (Variantenvielfalt und Produktmix pro Anlage) beschrieben werden. Auch der Betrachtungsgegenstand der Komplexität ist mehrschichtig. So zeigen sowohl Produkte als auch Prozesse aber auch die Organisation über mehrere Unternehmen oder einzelne Abteilungen eines Unternehmens gerade im Zusammenspiel mit Folgeprozessen signifikante Komplexitätsmerkmale auf.

Die Integration von Standards hat im Hinblick auf die Wirkrichtung zur Beherrschbarkeit von komplexen Prozessketten im Gießereiumfeld zwei wesentliche positive Charakteristika:

Erstens kann über eine Anwendung der klassischen „Lessons-learned-Systematik“ Bezug genommen werden auf vergleichbare Szenarien, die über Standardisierung, etwa einen identischen Anlagenaufbau in zwei Werken eines Unternehmens, ermöglicht werden. Denkbar ist neben der beschriebenen Anlagentechnik auch die Prozessauslegung (z.B. über Taktzeitstandards), die Auswahl von Werkstoffen, strategische projektübergreifende Allianzen zwischen einzelnen Zulieferern und die Nutzung einheitlicher Begrifflichkeiten bei neuen bzw. zunehmend relevanter werdenden Phänomenen (z.B. beim Umgang mit Blistern oder im Verzugsmanagement).

Zweitens kann die Umsetzung von Standards in Gießereien auch wesentlich dabei unterstützen, eine strukturierte Lösungsfindung oder allgemein eine systematische Verbesserungslogik effizient und wirksam zu etablieren. Es ist heute Standard in vielen Gießereien, dass gegossene Bauteile unmittelbar nach dem Gießen mit einem Data-Matrix-Code (DMC) versehen werden. Ohne dass zu Beginn eines herausfordernden Projektes klar ist, welche Charakteristika eines Tages dabei helfen können, die Effizienz und die Qualität der Produktion zu stabilisieren oder zu optimieren, werden durch eine theoretisch lückenlose Rückverfolgbarkeit schnell Ansatzpunkte geschaffen, um schnellzyklische Datenkreisläufe zu installieren, Qualitätsthemen aktiv zu bearbeiten und den Prozess insgesamt transparenter zu gestalten.

Neben den positiven Aspekten der Standardisierung in Planung und Produktion muss letztendlich auch immer der Aufwand zur Integration prinzipiell wünschenswerter Standardisierungselemente betrachtet werden. Die Praxis zeigt, dass die komplexen Prozessketten zur Herstellung und Bearbeitung komplexer Strukturbauteile höchst individuell ausgelegt werden, um einen optimalen Zielkorridor aus Investitionsschonung und einem Minimum an laufenden Kosten zu erreichen. Dennoch werden zunehmend Standards (sowohl unternehmensintern als auch übergreifend) herangezogen, wenn zumindest langfristig erkennbar ist, dass ein entsprechender Nutzen erreicht wird.

Zunehmend wird in der industriellen Praxis versucht, Standards etwa der Anlagentechnik so modular zu gestalten, dass sowohl wünschenswerte Elemente der Standardisierung als auch individuelle produktspezifische Ausgestaltung vereint werden können. In diesem Zusammenhang können Elemente der Digitalisierung helfen, um über die Auswertung archivierter Daten Verhaltensweisen bzw. Ursache-Wirkungs-Relationen von Prozessen und Anlagen erkennbar und nutzbar zu machen. Auch in der Kommunikation zwischen Produktion und Entwicklung werden in zunehmendem Maß bei der Neuplanung von Projekten Standards etwa auf der Basis von Vorgängerprodukten oder bei Lieferanten-Konzept-Wettbewerben vor Nominierung herangezogen, die dann individuell ausgestaltet werden.

Diese Ausführungen zeigen, dass über die Vernetzung von Informationen und konsequente Ableitung von Standards sowohl im Unternehmen als auch darüber hinaus Potenziale existieren, um das heute bereits attraktive Konzept gegossener Fahrwerkskomponenten weiter zu stärken.

Um besser einordnen zu können, in welchem Status sich aktuell das Druckgießen von Aluminium-Strukturbauteilen im Fahrwerksbereich befindet, soll im Folgenden das Modell der „Fünf Innovationsphasen nach Rogers“ herangezogen und diskutiert werden.

2. Marktbezogene Einordnung des Druckgießens von automobilen Strukturbauteilen

Eines vorweg: Eine klare und eindeutige Einordnung des aktuellen Status der Technologie Druckgießen von Fahrwerkskomponenten ist per se weder vollständig noch belegbar möglich. Dennoch soll in diesem Kapitel versucht werden, die Zusammenhänge zur Statusbewertung der Technologie „Gießen von automobilen Strukturteilen“ zu beleuchten, um daraus Erkenntnisse für mögliche weitere Entwicklung und die Rolle von Standardisierungselementen ableiten zu können.

Als Modell zur Betrachtung der Situation soll das im Jahr 1962 erstmals von Rogers vorgestellte [1] und seitdem kontinuierlich weiterentwickelte Modell der „technology adoption“ herangezogen werden. Die Zusammenhänge dieses Modells sind schematisch in Bild 1 dargestellt.

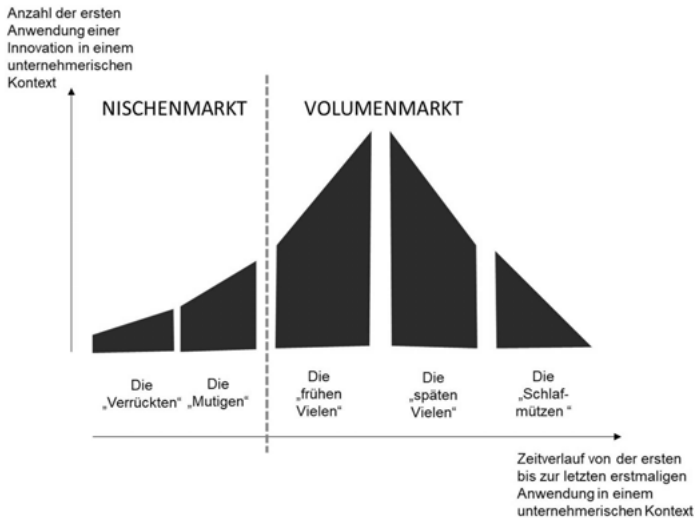


Bild 1: Schematischer Zusammenhang zwischen Nischenmarkt und Volumenmarkt angelehnt an Rogers [1]

Ein wesentlicher Aspekt dieses Modells ist durch die retrospektive Vervollständigung gekennzeichnet. Das heißt, letztendlich kann erst nach letzter erstmaliger Umsetzung einer Technologie in einem unternehmerischen Kontext festgehalten werden, wie sich die prozentuale Aufteilung der zeitlichen Phasen von der ersten bis zur letzten Anwendung zeigt. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass es unmöglich ist, während des fortlaufenden Anstiegs erstmaliger Anwendungen eine exakte Prognose zu geben, einerseits wie viele weitere erste Anwendungen noch folgen werden, andererseits deren zukünftige zeitliche Verteilung festzustellen. In Bild 2 soll gezeigt werden, wie unklar zum einen eine exakte Positionsbestimmung des Marktanteils von gegossenen Strukturbauteilen im Automobilbereich derzeit umzusetzen ist, zum anderen die potenziellen Veränderungen, die durch eine Zunahme des Anteils aber auch durch eine Zunahme des Gesamtvolumens beschrieben ist.

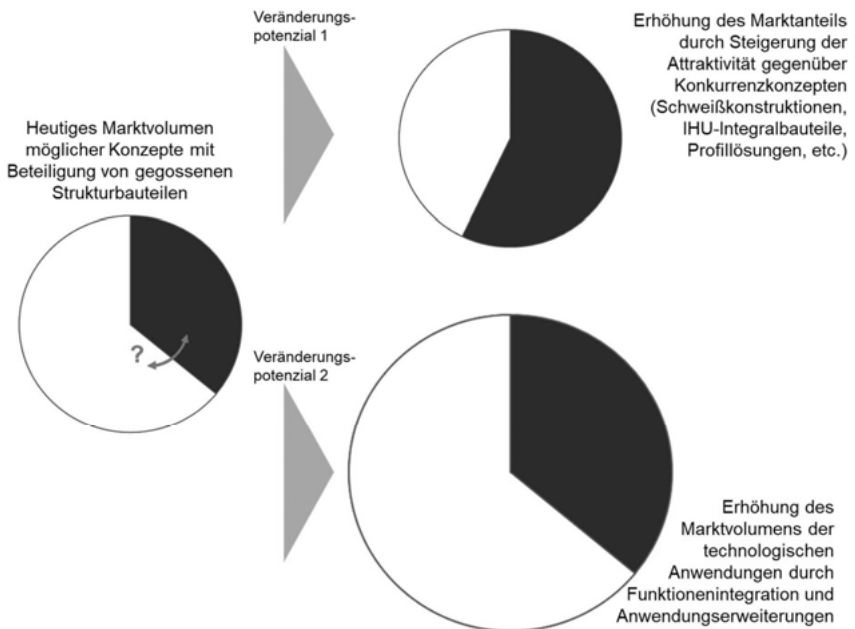


Bild 2: Darstellung der drei Unsicherheiten der Marktentwicklung von gegossenen Strukturbauteilen im Automobilbereich: Positionsbestimmung, Anteilserhöhung, Marktveränderung

Das komplexe technische System Fahrzeug bedingt es, dass es oftmals schwierig ist, eindeutige Schnittstellen zwischen einzelnen Subsystemen des Fahrzeugs zu definieren. Etwa ein zunächst eindeutig dem Fahrwerk zuordenbarer Bauteil „Längsträger“ kann durchaus Funktionen des Interieurs (etwa die Anbindung der Fixierung von Kindersitzen) oder des Exterieurs (etwa durch von außen sichtbare Komponentenbestandteile) übernehmen. Gerade durch die grandiosen Möglichkeiten der Erschaffung von komplexen Strukturen durch das Gießen werden auf diese Weise stetig neue Funktionen auf ihre Integrierbarkeit in gegossene Bauteile hin überprüft und auch umgesetzt. Dies zeigt auf, dass eine direkte Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen, konkurrierenden Konzepten für die Herstellung von Fahrwerkskomponenten nicht immer gegeben ist. Unklar ist des Weiteren, wie denn eigentlich die Gesamtmenge aller potenziell zu gießenden (oder irgendwann auch wirklich einmal gegossenen) Bauteile fol-

gend der Argumentation des Modells von Rogers [1]) Bauteile festzulegen ist. Diese Ungewissheit ist in Bild 2 mit der pfeilartigen Kreisbogensegment skizziert. Ganz praktisch gedacht ist es zudem nicht eindeutig, was denn überhaupt der Bezugsrahmen für den Einsatz von gegossenen Strukturbauteilen ist.

Zieht man etwa sämtliche Modelle aller weltweiten Fahrzeugflotten als Basis heran, so ist der Anteil an gegossenen Aluminium-Strukturbauteilen minimal gegenüber den noch immer dominierenden umgeformten und verschweißten Stahl-Blech-Lösungen. Fokussiert man in Bezug auf den Betrachtungsrahmen lediglich auf die stückzahlbezogen niedrigen Modelle einer Fahrzeugflotte, die hochpreisig angeboten werden und hinsichtlich Gewichtsreduktion und Komfort höchsten Kundenansprüchen genügen müssen, wird man einen signifikant hohen Anteil an bereits umgesetzten Konzepten von gegossenen Strukturbauteilen im Fahrwerk feststellen.

Als letzter Aspekt zu dieser Überlegung soll das zunehmende Bestreben der Automobilhersteller hin zu Mischverbindungen und Materialmix im Karosseriebau betrachtet werden. Um ein Optimum des Verhältnisses zwischen Funktion, Herstellbarkeit und Gewicht im Gesamtkontext einer Karosserie zu erreichen, gibt es unterschiedliche Ausprägungen aber doch ein klar feststellbares Bestreben, unterschiedliche, in Konkurrenz stehende Technologien in Einklang zu bringen [2]. Insofern ist quasi kontraproduktiv, wenn gegossene Aluminium-Komponenten 100% eines Automobil-Fahrwerks beinhalten, da somit die strategische Ausrichtung zu einem idealen Materialmix konterkariert wird [3].

Insofern ist es ratsam, das Model nach Rogers für den jeweilig zu betrachtenden technologischen Anwendungsfall, das Bauteilvolumen und das (echte) potenzielle Marktvolumen zu definieren und dann eine Einordnung in die Phasen des Innovationszyklus vorzunehmen. Es ist die Meinung der Autoren, dass die sich die derzeitige Anwendung des Gießens von komplexem Aluminium-Strukturbauteilen im Fahrwerk aktuell bereits im Volumenmarkt, etwa im Übergang von „frühen und späten Vielen“ gemäß Bild 1 befindet. Dies ist allerdings nicht als Makel zu sehen, sondern im Gegenteil ermöglicht dies eine Fokussierung auf neue Anwendungen und die Definition neuer technologischer Lösungen im Umfeld der Gießtechnik, die sich derzeit noch im Bereich der absoluten Nischen befinden. Es kann in diesem Zusammenhang beobachtet werden, dass Standardisierung eine wesentliche Rolle spielt und als Querschnittsfunktion den Fortgang der Innovationen und eine Erhöhung der jeweiligen Reifegrade fördert. Dies soll im folgenden Kapitel verdeutlicht werden.

3. Die Rolle der Standardisierung zur Intensivierung der Anwendbarkeit

Folgt man der Argumentation des Modells von Rogers, so kann eine Verbreitung einer Technologie beschleunigt werden, wenn die jeweiligen Barrieren im Übergang von einer absoluten „Exotentechologie“ bis hin zu einem Volumenlösungsansatz so schnell wie möglich überwunden werden können. Standardisierung bietet in den unterschiedlichsten Phasen Möglichkeiten, um den jeweiligen Stakeholdern zur Entscheidung für eine Technologie die Attraktivität einer Lösung gegenüber Alternativen entsprechend darzulegen. Im Folgenden soll anhand unterschiedlicher Beispielszenarien dieser Zusammenhang aufgezeigt werden.

- **Standardisierung verringert Komplexität.**

Komplexität, also das Produkt aus Unsicherheit, Vielfalt und Dynamik, ist ein großes Hemmnis für unternehmerische Entscheidungen [4]. Im Vergleich zu Anwendungen von Fahrwerksteilen auf der Basis von Umform- und Schweißtechnikbestandteilen beinhaltet die Umsetzung der Technologien zur Herstellung von gegossenen Strukturbauteilen hohe Komplexität auch in einer Phase der Serienfertigung. Im Gegensatz dazu sind Umformprozesse nach einer Phase der Ertüchtigung mit entsprechenden Instrumenten einer Prozessfähigkeit deutlich besser steuerbar und stabiler als Gießprozesse in Verbindung mit Folgeprozessen. Standardisierung kann hier ansetzen, um auf der Basis vorhandener Daten Standards zu schaffen, mit Hilfe welcher in Analogie zu Prozessfähigkeitsbetrachtungen Eingriffsgrenzen unterschiedlicher Parameter über die gesamte Prozesskette hinweg identifiziert und genutzt werden können. Dadurch werden Verbesserungen messbar und Einflüsse etwa auf Ausschuss können kontinuierlich attackiert werden.

Komplexität kann außerdem durch die Verringerung der Anzahl proprietärer Teillösungen in der Prozesskette reduziert werden. Hierbei kann als Beispiel eine universelle Auslegung einer Folgeprozesskette nach dem Gießen gelten. Wie in Bild 3 dargestellt, kann eine Linie für eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauteilen durch vielseitig einsetzbare Greiferlösungen und Bearbeitungsaufnahmen standardisiert ausgelegt werden. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit der Anlage durch eine kontinuierliche Auslastung unterschiedlicher gegossener Bauteile und die Planbarkeit.

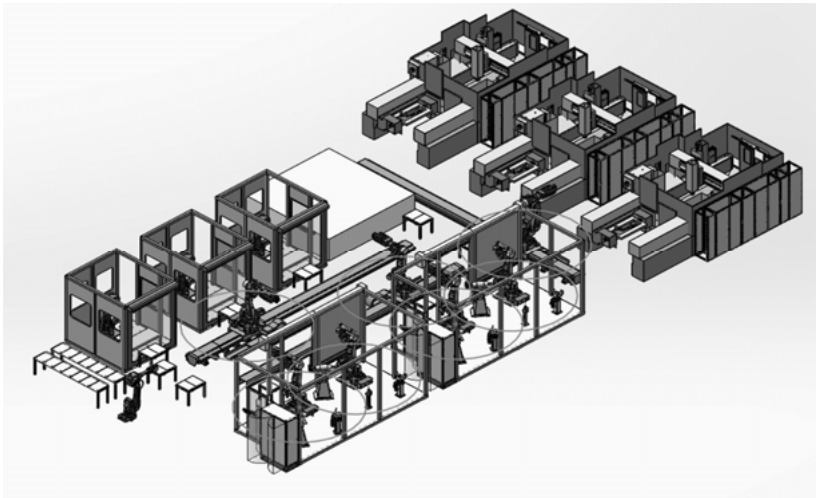


Bild 3: Aufbau einer prototypischen Anlagenkonzeption zur beispielhaften Anordnung standardisierter Folgeprozessanlagen nach dem Gießen in veränderlicher Materialflussführung (von links unten nach rechts oben: drei Richtanlagen für insgesamt acht verschiedene Bauteiltypen, zwei modulare gespiegelte universelle Schleifzellen mit automatischem Greiferwechselsystem, Entkoppelungsmodul für optionalen Richtprozess inkl. optischem Messsystem drei integrierte Einzelspindler mit doppeltem Bearbeitungszentrum für taktzeitneutralen Bauteilwechsel)

So kann Standardisierung helfen, langfristig Komplexität von Prozessketten zur Herstellung von gegossenen Fahrwerkskomponenten zu verringern.

- **Standardisierung erhöht die Planbarkeit und die Qualität der Planungsaussagen in frühen Phasen der Produkt- und Prozessauslegung**

Gerade die Planbarkeit ist ein hohes Gut und bei vielgliedrigen Prozessketten zur Erzeugung von gegossenen Fahrwerkskomponenten ist Zeit- und Kostenplanung stark abhängig von Bauteilcharakteristika. So werden üblicherweise bei Anbietern von komplexen Strukturbauteilen (zurecht) diverse Risikozuschläge in Kalkulationen einbezogen, da häufig zu einem frühen Zeitpunkt nicht offensichtlich ist, welche Mehrungen an Zeit und Kosten durch unvorhersehbare Ereignisse oder eine Änderung der Rahmenbedingungen entstehen. Auch hier bietet sich ein Vergleich zum Konzeptwettbewerber Umformen und Schweißen an. Es ist auf Basis dieses Konzeptes oft frühzeitig klar, wie

eine Produktänderung im Aufbau einer Serienfertigung im wahrsten Sinne des Wortes „einzupreisen“ ist. Dies ist bei Gießprozessen inkl. aufwendiger Wärmebehandlung und eventuell Richtprozessen und entsprechender mechanischer Bearbeitung meist deutlich schwieriger umzusetzen. Hier können Standards zur Bewertung von Änderungen über die Grenzen der Unternehmen zwischen Zulieferer, Anlagenbauunternehmen und Automobilhersteller helfen, um insgesamt die Kosten für die Konzepte zu verringern und die Attraktivität der Technologie zu erhöhen.

- **Standardisierung verbreitert den Anbietermarkt und ist Wegbereiter für Kosten- und Preissenkungen.**

Es liegt in der Natur der Sache, dass die ersten Schritte eines Lösungsanbieters auf dem Markt von Skepsis hinsichtlich eines potenziellen Wissenverlustes geprägt sind. Der Schutz des Wissens ist berechtigtes Interesse eines Marktpioniers, jedoch ist seitens des Nachfragemarkts aus vielen Gründen dieser Zustand nur zeitlich begrenzt wünschenswert. Neben der wirtschaftlichen Attraktivität ist ein Anbieterwettbewerb für den Kundenkreis auch hinsichtlich einer Risikominimierung essenziell. Aus diesen Gründen kann es unter Umständen dazu führen, dass sich einzelne technische Lösungsanbieter in einem (überschaubaren) Wettbewerb wohler fühlen als in der Rolle eines Einzelkämpfers. Dadurch sinkt zwar die erzielbare singuläre Marche, allerdings steigt die Akzeptanz der Konzepte und dadurch das Volumen entsprechend. Gerade im Umfeld der vielen neu entstandenen Sonderlösungen zur Herstellung von gegossenen Strukturbauteilen im Fahrwerk konnte dieser Effekt an einigen Stellen in den Jahren seit etwa 2011 beobachtet werden. Die Basis der Verbreiterung eines Anbietermarktes ist allerdings die formale Definition dessen, was als Leistung zu beschreiben ist. Hier muss, etwa in Form eines Lastenheftes standardisiert beschrieben werden, was den entsprechenden Leistungsumfang beinhaltet. Insofern ist Standardisierung hier in einer sehr frühen Phase ein wichtiges Element, um überhaupt nach dem Modell von Rogers in einen Volumenmarkt eintreten zu können. Dieser Effekt ist sowohl bei Anlagenherstellern, als auch bei Gießereien aber auch bei Automobilherstellern zu beobachten.

- **Standardisierung erleichtert die Kommunikation über die gesamte Prozesskette und unterschiedliche Unternehmen hinweg.**

Gerade technisch komplexe Neuerungen erfordern einen intensiven Austausch aller Beteiligten, um über Unternehmensgrenzen hinweg zielgerichtete Lösungen umzusetzen. Auch scheinbar einfache Zusammenhänge können bei nicht geklärten Begrifflichkeiten oder Anforderungen unter dem Zeitdruck einer Produktion, Bauteile liefern zu müssen, zu unüberbrückbaren Hindernissen werden. Um präventiv Missverständnissen vorzubeugen und rare Kapazitäten und Ressourcen auf lohnende Aufgaben zu lenken, können entstehende Lücken im Verständnis durch Standards gefüllt werden. So wurde etwa zu Beginn des Jahres 2017 am Technologiezentrum der Hochschule Landshut in Dingolfing unter Koordination der Autoren eine Richtlinie zur standardisierten Beschreibung von Blistern im Rahmen der Herstellung komplexer Strukturbauteile sowie eine Klassifizierung von Anforderungen und Nacharbeitungsmöglichkeiten diesbezüglich erstellt. Dies erleichtert den Austausch von Anforderungen und die Problemlösung bei aufgetretenen Unstimmigkeiten enorm. Aktuell wird die Richtlinie bereits in der Praxis angewendet und findet derzeit Einzug in diverse Normen.

- **Standardisierung ermöglicht Bewertbarkeit und die Einführung von Regelkreisen zur Verbesserung**

Anlagen- und Prozessstandards zwischen einzelnen Werken eines Unternehmens an der Schnittstelle zu den Kunden sind wesentliche Triebfeder für die Schaffung von Transparenz und damit für Verbesserungen. Daneben ermöglicht eine standardisierte dokumentierte Auslegung von Prozessen und die Beschaffung etwa von Anlagen die Integration von Erfahrungswissen aus ähnlichen Projekten. Durch den Einsatz von Data-mining-Ansätzen können Potenziale identifiziert werden, wie Prozessparameter eingeordnet und systematisch analysiert werden können. Hierin liegt ein großes Potenzial, um langfristig durch „Lessons-learnt-Ergebnisse“ die Bewertbarkeit von Prozessen zu verbessern und über Analogiebetrachtungen künftige Auslegungen zu optimieren. Daneben können auch in der laufenden Produktion Verbesserungspotenziale realisiert werden, idealerweise sogar selbststeuernde Regelkreise, etwa in Zusammenhang mit den Parametern einer Schleifzelle, die neben der Hauptnutzung zur Messung der Rauheit des Bauteils zur Bestimmung der Abtragungstiefe Erkenntnisse zum Verschleißzustand des Gießwerkzeugs liefern kann und so ein wichtiger Indikator zur noch verfügbaren Standzeit generiert werden kann.

Die Zusammenstellung dieser beispielhaften Einflüsse zeigt, an welch vielfältigen Stellen den jeweiligen Hemmnissen einer Entscheidung für eine Technologie durch Standardisierung begegnet werden kann. Im Folgenden soll im Rahmen eines Fazits dieser Überlegungen eine potenzielle Fortführung dieser Entwicklung dargestellt werden.

4. Fazit und Prognose

Dass die Gießereitechnik einem steten Wandel an Anforderungen und Möglichkeiten unterworfen ist und dadurch sich auch ständig neu erfinden kann und muss, ist im Rahmen der etwa 3.000 jährigen Geschichte an vielen Stellen deutlich geworden.

Ein Bruchteil dieser Geschichte ist durch das Gießen komplexer Fahrwerkstrukturen beschrieben. Ob diese spezifischen Umfänge bereits einen Sättigungsgrad hinsichtlich technologischer Weiterentwicklung und Verbreitung der Anwendung gefunden haben, ist ungewiss. Die Autoren legen sich aber fest, dass dies gar nicht der entscheidende Aspekt ist. Vielmehr ist es entscheidend, wie die Grenzen der jeweiligen Betrachtungsmodelle definiert sind.

So ist es gewiss, dass durch eine Marktetablierung von stabilen Prozessketten für ein Bauteilsegment, etwa Federbeinstützen, unweigerlich neue Anforderungen, etwa an komplexere Strukturen (z.B. Längsträger) oder die Integration weiterer Funktionen in den Bauteilbereich geweckt werden, die wiederum zu neuen Technologieanwendungen führen.

Insofern unterstützt das Streben nach Standardisierung weitere Innovationen, also wirtschaftlich nutzbare Anwendungen neuer Erfindungen, sowohl im Rahmen eines noch weit von der Sättigung entfernten Anwendungsbereiches, als auch gegen Ende einer Sättigungskurve, um Innovationskraft und Anforderungen auf neue Anwendungen zu konzentrieren.

Gewissermaßen kann das Streben nach Standardisierung so als Innovationsmotor gelten. Auch wenn dadurch partiell eine Verschiebung von Marktanteilen und singulär auch wirtschaftliche Risiken verbunden sind, ist die sich dadurch eröffnende Chancenvielfalt zur Begegnung der Anforderungen von Morgen unbedingt positiv zu sehen und ermöglicht einen wirtschaftlichen Selektionsprozess der besten Lösungsanbieter. Hierbei ist es individuell zu entscheiden, in welchem Ausmaß sich ein aktuell auf dem Markt befindlicher Anbieter über die Grenzen seines Unternehmens und seines aktuellen Geschäftsgegenstandes öffnet. Festgestellt werden kann allerdings, dass nicht erst seit der Diskussion über die Einflüsse digitaler Werkzeuge im Rahmen der Industrie-4.0-Betrachtung die größten Chancen in der Beherrschung von Prozessketten und Gesamtkonzepten eben genau über die Grenzen einzelner Unternehmen, Prozesse, Konzepte, ja ganzer Branchen hinweg liegen. Daher wird nach Meinung der Autoren auch die Zukunft erfolgreicher Gießereitechnik nicht zwischen „Schmelztiegel und Stanze“ lie-

gen, sondern in einem agilen, chancensuchenden Miteinander von technologisch kompetenten Partnern, welche ihren Beitrag liefern, um mit Zug zu standardisierten Lösungen für die Anforderungen von Endkunden Mehrwert zu schaffen.

- [1] Rogers, Everett: Diffusion of innovations (5. Auflage). New York: Free Press Simon&Schuster, 2003.
- [2] Siebenpfeiffer, Wolfgang: Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung – Konzepte. Berlin: Springer, 2013.
- [3] Pfitzer, Marcel: Einsatz von Aluminium-Strukturussteilen in weltweiten Fahrzeugprojekten bei Mercedes Benz. Konferenzbeitrag: VDI Fachtagung „Gießen von Fahrwerks und Karosseriekomponenten“. Kassel 17.02. – 18.02.2016, VDI-Verlag 2016.
- [4] Roeren, Sven; Wagensoner, Matthias; von Kuepach, Severin: Dealing with the Complexity to Stabilize a Process Chain of High-Pressure Aluminum Die Casting of Automotive Structural Components. In: Proceedings of 2016 Development Forum on Non-ferrous Alloys and Special Castings. Peking: Chinese Mechanical Engineering, 2016, S. 235-240.