

Bildquelle: VW AG

10. VDI-Tagung

Gießtechnik im Motorenbau 2019

Branchentreff der Gießer und Motorenbauer

1. VDI-Tagung

Gießen von Groß- und Nutzfahrzeugmotoren 2019

– neuer Treffpunkt für Motorenexperten der Off-Highway- und Transportindustrie –

Magdeburg, 29. und 30. Januar 2019

VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

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

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

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 Manuscriptdruck.

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 978-3-18-092339-0

Inhalt

Gießtechnik im Motorenbau 2019

► Keynotes

Powertrain 2030 – Driven by Diversification	1
A. Pfeifer, MAHLE GmbH, Stuttgart	
The future of large and commercial engines – The next milestones in engine development for cpt.	5
P. Heuser, FEV Group GmbH, Aachen	

► Zukunft des Verbrennungsmotors

Methodische Integration der virtuellen Versuchsplanung in die schwingfeste und robuste Auslegung von hochbelasteten Aluminiumgussteilen	23
M. Weidt, C. Thomser, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen	
Traceability als Erfolgsfaktor – Industrie 4.0 in der Großserienproduktion von Aluminium-Druckguss-Zylinderkurbelgehäusen	39
F. Loerwald, Martinrea Honsel Germany GmbH, Meschede	

► Innovative Produktion: Verfahren – Werkzeuge – Werkstoffe

Technologietreiber Motorsport – Qualitätssicherung von additiv-gefertigten Komponenten aus der Formel 1	49
G. Mäurer, N. Schott, YXLON International GmbH, Hamburg	
Das intelligent agierende Werkzeug – Sensorik und Aktorik im modernen Werkzeug für eine flexible Produktion	61
J. Titze, R. Brühl, KRÄMER+GREBE GmbH & Co. KG, Biedenkopf-Wallau	
Gießen von Al-Zylinderkurbelgehäusen – Herausforderung Zylinderlauffläche	67
F. J. Feikus, L. Kniewallner, Nemak Europe GmbH, Frankfurt am Main;	
T. F. Linke, Nemak Dillingen GmbH;	
M. Lewandowski, B. Dybowski, Nemak Poland Sp.z.o.o.	
Die neue Vierzylinder-Dieselmotorengeneration von Volkswagen – höchstentwickelte Gießtechnik für maximale Effizienz	81
M. Köhne, C. Wagner, A. Schüller, Volkswagen AG, Wolfsburg	

► Zukunft des Verbrennungsmotors

- Grey cast iron as cylinder-block material for range extender engines –
A serious alternative?** 99
M. Souren, T. Uhlmann, J. Slotman, FEV Europe GmbH, Aachen

- Hocheffiziente Fertigung von Druckgussmotorblöcken am Beispiel eines
Großserien-Vierzylinderblocks.** 119
H. Fuchs, A. Ferreira, H.-J. Spychala, Martinrea Honsel Germany GmbH, Meschede

- Der neue Zylinderkopf BMW M4 – Serieneinsatz von Additive Fertigung von Kernen** 129
J.-M. Ségaud, BMW AG, Leichtmetallgießerei, Landshut; J. Pollack, BMW M-GmbH, München

► Additive Verfahren in der Gussfertigung

- 4S – gegossene Prototypen vom Seriengießer in 2 Wochen.** 131
U. Schliephake, Josef Brechmann GmbH & Co. KG, Schloß Holte-Stukenbrock

- 3D printing in the foundry industry – The optimal alternative to direct metal printing** 149
M. Steinbusch, voxeljet AG, Friedberg; J. Hülsmann, Lütgemeier GmbH, Steinhagen

► Keynote

- Industrialisierung der additiven Fertigung bei der BMW Group** 151
R. Ramakrishnan, BMW Group, Werk Landshut

Gießen von Groß- und Nutzfahrzeugmotoren 2019

► Keynotes

Substitution of cast iron engine components with aluminium alloys: A life cycle perspective	153
---	-----

M. R. Jolly, K. Salonitis, E. Pagone, M. Papanikolaou, Cranfield University, Cranfield, United Kingdom

Integration gießtechnischer Aspekte in die Entwicklung Großmotor – Gusskomponenten	169
--	-----

J. Heger, Heger Group Enkenbach-Alsenborn;
G. Hartmann, M. Bodenburg, MAGMA, Aachen

► Werkstoffe und Turbolader im Groß- und Nutzfahrzeugmotorenbau

GJV 500Si5: Der Werkstoff für kommende Nutzfahrzeugverbrennungsmotoren?	183
---	-----

M. Walz, Fritz Winter Eisengiesserei GmbH & Co.KG, Stadtallendorf

Leichtbau bei Großmotorenblöcken.	187
---	-----

A. Wenz, R. Möller, R. dos Santos, Gienanth GmbH, Eisenberg

Kosten- und Bauraumeinsparungen durch frühzeitige gemeinsame Entwicklung mit dem	197
--	-----

Kunden von funktionsintegrierten Aluminium Sandgussteilen	197
---	-----

P. A. G. M. Dings, MGG Netherlands, Tegelen, Niederlande

► Gießgerechtes Konstruieren – Best Practices

Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Gusseisen im Motorenbau durch methodische	205
---	-----

Integration der virtuellen gießtechnischen Optimierung in die Bauteilentwicklung.	205
---	-----

M. Bodenburg, J. C. Sturm, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

► **Gießgerechtes Konstruieren sowie Modell- und Werkzeugbau als Schlüssel im Groß- und Nfz-Motorenguss**

Fatigue estimation on cast-iron crankshafts considering residual stress from heat treatment	221
T. Winter, Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG, Ruhstorf a. d. Rott;	
C. Thomser, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen	
Präzise Werkzeuge für exzellenten Guss – Konstante Kerne aus ökonomischen Werkzeugen	235
D. Smolny, Lahnwerk GmbH, Biedenkopf	

Powertrain 2030 – Driven by Diversification

Dr. Andreas Pfeifer, MAHLE GmbH, Stuttgart

Abstract

Globaler Temperatur- und CO₂-Anstieg sowie das Bevölkerungswachstum verändern zunehmend die Lebensbedingungen der Weltbevölkerung. Am 12.12.2015 wurde auf der UN-Klimakonferenz in Paris ein Abkommen ratifiziert, das eine Begrenzung der anthropogenen Erderwärmung auf unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten vorsieht. Studien legen nahe, dass bereits das 2 °-Ziel nicht ausreichen könnte, um irreversible Rückkopplungen zu verhindern, die das Erdklima in eine Heißzeit mit unübersehbaren Konsequenzen überführen würden. Zur Einhaltung des 2 °C-Ziels sind sinkende CO₂-Emissionen bereits ab Mitte des nächsten Jahrzehnts und negative CO₂-Emissionen Ende dieses Jahrhunderts notwendig. Vor diesem Hintergrund sind alle CO₂-Emittenten gleichermaßen gefragt, ihre absolut-Emissionen signifikant und umgehend zu reduzieren, um so auch ein Überschwingen der Globaltemperatur mit einer Annäherung von oben an das langfristige Erderwärmungsziel deutlich unter 2 °C zu vermeiden. Für den Verkehrssektor und damit auch für die Automobilindustrie kann das nur bedeuten, gleichzeitig alle technisch möglichen Register bei der Reduktion von CO₂ zu ziehen. Herausfordernd dabei ist, dass das vor dem Hintergrund eines weiter wachsenden Marktes und auch Bestands an Fahrzeugen erfolgen muss. In 2030 werden rund 1,5 Mrd. Fahrzeuge (Pkw) zugelassen sein. Setzen wir ein globales, aggressives „Green Planet“ Szenario an, bei dem der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) progressiv auf 50 % und jener der Hybridfahrzeuge auf weitere 25 % der neu zugelassenen Fahrzeuge im Jahr 2030 ansteigt, so besitzt im Jahr 2030 nur ein Anteil von rund 25 % der Flotte einen alternativen Antrieb, in Zahlen 210 Mio. BEV und 177 Mio. Hybride. Würden die 210 Mio. BEV ausschließlich mit regenerativem Strom betrieben werden, würde sich im Vergleich zu einem Betrieb mit konventionellem Antrieb und fossilen Kraftstoffen eine CO₂-Einsparung von rund 520 Mio. t/a einstellen. Ein Effekt in gleicher Größenordnung wäre bei Substitution von 19 % des fossilen durch regenerativ –und somit CO₂-neutral - hergestelltem Kraftstoff im Bestand der 1,1 Mrd. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor möglich.

Will man den Aufwand für negative CO₂-Emissionen zu Ende dieses Jahrhunderts (beispielsweise durch CCS, carbon capture and storage) in einem begrenzten Rahmen halten und hat man die Unwägbarkeiten einer irreversiblen Klimaveränderung (Stichwort Heißzeit) vor Augen,

ist es offensichtlich, dass es jetzt Zeit ist zu handeln und aufgrund der Nutzungsdauer von Bestandsfahrzeugen die ausschließliche Fokussierung auf eine möglichst rasche Verbreitung von Neufahrzeugen mit batterieelektrischen Antriebsträngen zu kurz greift. Als Steuerimpuls sollte daher die gegenwärtige „Tank-to-wheel“ Betrachtung in einem ersten Schritt um eine „Well-to-tank“ Bilanzierung erweitert werden, in einem zweiten Schritt wird dann sinnvollerweise die Produktion und das Recycling der Fahrzeuge und Batterien mit berücksichtigt.

Doch woher soll der regenerativ hergestellte Kraftstoff kommen? Hier bietet sich Überschussstrom aus regenerativen Quellen an. Auch wenn der Anteil des regenerativen Stroms an der Gesamtmenge in Deutschland im Mittel bei etwa 30 % liegt und im Ausblick 2050 bei über 85 %, ist die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien vor allem durch Wetterphänomene großen Schwankungen unterworfen. Eine direkte elektrische Einspeicherung der Überschussenergie ist stark limitiert, daher ist es sinnvoll, mit regenerativ erzeugten gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen durch Sektorkopplung die Defossilisierung des Verkehrssektors weiter voranzutreiben (sog. Power-to-X Kraftstoffe (PtX)). PtX stellen als chemischer Energiespeicher eine attraktive Möglichkeit dar, die Fluktuationen regenerativer Quellen auszugleichen, und können teilweise auf vorhandene Infrastruktur zurückgreifen (Erdgasnetz). Die erforderlichen Investitionen müssen jetzt ausgelöst werden, um den Hebel, den diese Kraftstoffe in der Fahrzeugflotte haben können, auch zu ermöglichen. Eine reine Fokussierung der Verwendung von PtX für Luft- und Seefahrt erscheint nicht zweckmäßig, sondern sollte auch in den Straßentransport einfließen. Die von der deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) vorgestellte Studie zu E-Fuels hat gezeigt, dass vergleichbare Kraftstoffkosten für die Pfade rein-elektrisch-regenerativ und regenerative Kohlenwasserstoffe für Verbrennungsmotoren realisiert werden können. An Beispielen für die effiziente Anwendung regenerativ erzeugter Kohlenwasserstoffe in Verbrennungsmotoren mangelt es nicht; diese reichen vom monovalenten Gasmotor (100 % kompatibel) bis zu Zumischungen von Dimethylcarbonat (DMC) zu Ottokraftstoff und Oxymethylester (OME) bei Dieselkraftstoff.

Mit Einführung der Emissionsnorm EU6d und RDE in 2020 wird der Verbrennungsmotor kennfeldweit emissionsarm betrieben. Für den Ottomotor bedeutet dies einen Verzicht auf die Volllastanfettung und kennfeldweiten stöchiometrischen Betrieb. Dadurch steigen die Spitzendrücke und -temperaturen an und erfordern eine entsprechende Anpassung der Kolbengruppe (PCU), Kurbelgehäuse und besonders des Zylinderkopfs. Gießtechnische Maßnahmen, die bisher Hochleistungs- Ottomotoren und -Dieselmotoren vorenthalten waren, wie etwa Horizontalgießen um die Dendritenbildung in kritischen Bereichen wie Lagerstuhl und Blockoberseite aktiv zu steuern, werden auch ihren Weg im Standardottomotor finden. Bei Zylinderköpfen wird

die Komplexität der Gussstruktur weiter zunehmen, um einerseits neue Bauteile wie Vorkammern oder zusätzliche Wasserinjektoren im Zentrum des Ventilsterns zu integrieren und anderseits gleichzeitig die Kühlung des Flamedecks, speziell des Ventilstegs, für die höheren Bauteiltemperaturen zu optimieren.

Neben regenerativen Kraftstoffen und alternativen Antrieben ist die Fahrzeuggröße und -masse ein weiterer Hebel, die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen weiter zu senken. Wenn auch aus Klimagesichtspunkten kleine Fahrzeuge vorteilhaft sind, stehen insbesondere große Fahrzeuge und SUV hoch in der Käufergunst. Zusammen mit der Forderung nach einer uneingeschränkten Langstrecktauglichkeit stellt sich hier die Frage nach dem idealen Antriebsstrang. Unter Berücksichtigung gegenwärtiger CO₂-Gestaltungsemissionen der Batterieproduktion erscheint hier der Plug-in Hybrid das Mittel der Wahl zu sein, da er aufgrund moderater Batteriegröße und effizientem Verbrennungsmotor das Beste aus beiden Welten kombiniert. Weitere Verbrauchspotenziale lassen sich durch eine Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors und Fokussierung auf die Betriebsbereiche höchster Wirkungsgrade erzielen. In Ergänzung zur weiteren Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs kommt der Senkung des Energiebedarfs weiterhin ein hoher Stellenwert zu. Leichtbau lohnt sich doppelt, da er den Energiebedarf senkt und so die Reichweite und den Fahrspaß gleichermaßen erhöht.

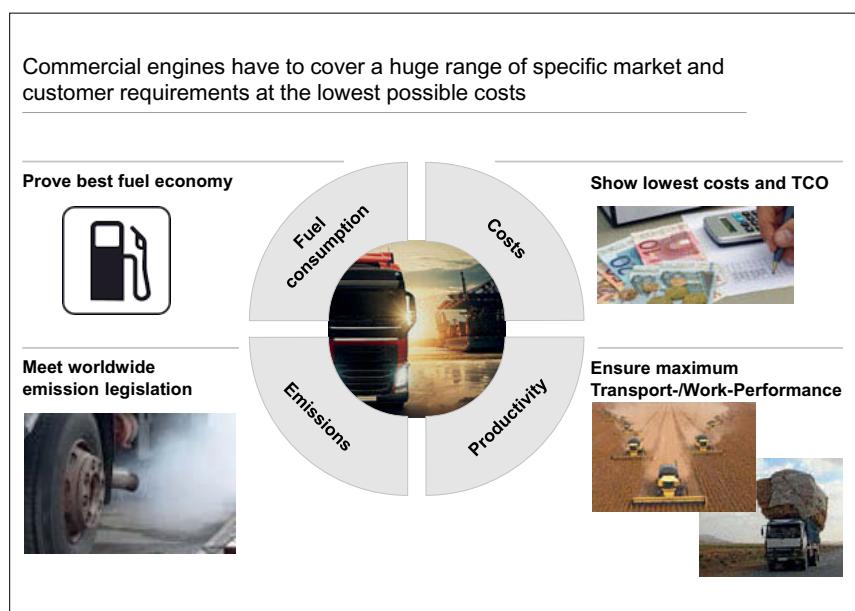
Mittelfristig wird eine weitere Diversifizierung hin zu angepassten und für die jeweilige Transportaufgabe optimierten Lösungen stattfinden. Das schließt batterieelektrische Fahrzeuge für den urbanen Verkehr genauso ein wie effiziente und hybridisierte Verbrennungsmotoren für Transportaufgaben, die einen hohen Energiebedarf aufweisen.

Ich wünsche einen erfolgreichen Gedankenaustausch von Gießexperten, Konzeptentwicklern und Entwicklungingenieuren mit der Zielsetzung, erfolgreiche Lösungen zur weiteren CO₂-Senkung bei Herstellung und Betrieb von Kraftfahrzeugen zu identifizieren und erfolgreich umzusetzen.

The Future of Large and Commercial Engines

The Next Milestones in Engine Development for CPT

Dr. Peter Heuser, FEV Group GmbH, Aachen



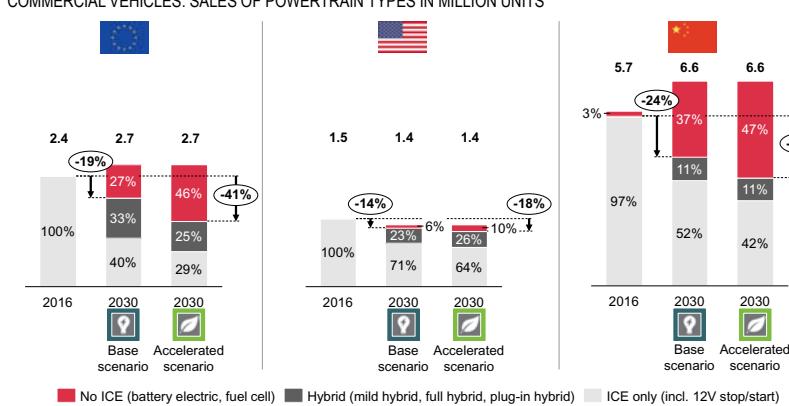
Agenda

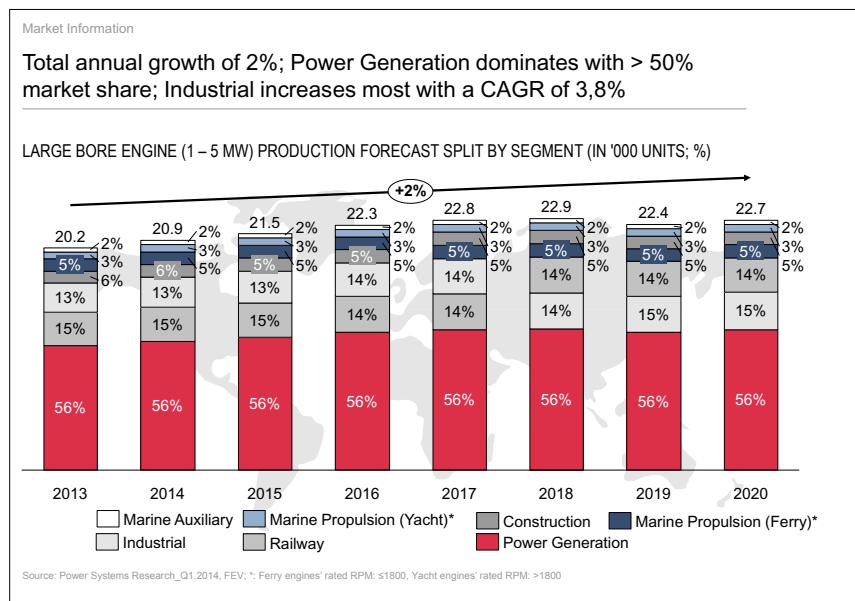
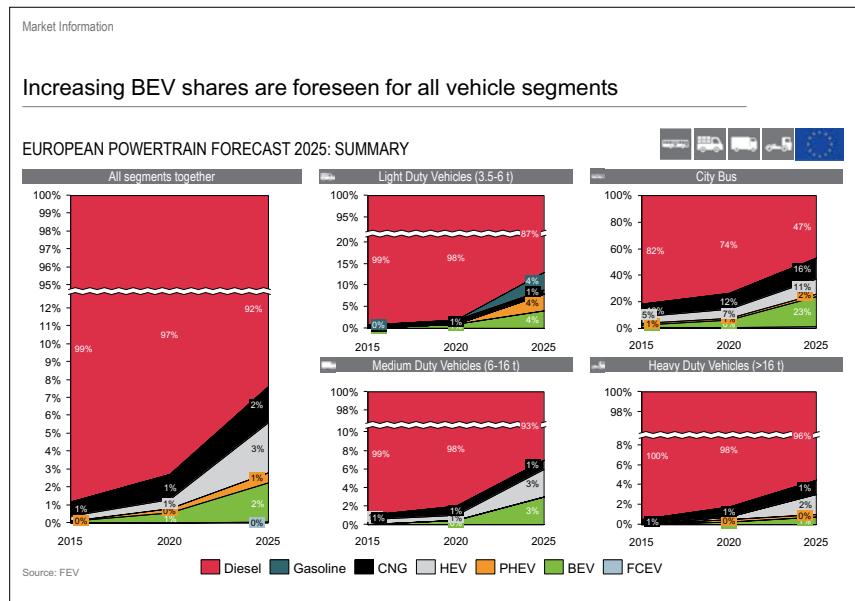
- Market Information
- Legislation
- Technology roadmaps
- Technologies trends
- Powertrain electrification
- Fuels
- Development process
- Summary

Market Information

Driven by electrification in LCV segment, sales of combustion engines are expected to decline by 2030 in all three markets Europe, USA and China

COMMERCIAL VEHICLES: SALES OF POWERTRAIN TYPES IN MILLION UNITS





Market Information

Chinese IWT contributes with a considerable proportion to the air pollution
The required transfer to a green shipping fleet is challenge for next years



Source: CIMAC WG19, 29.10.2015

¹⁾ Data from 2014

■ Total population of vessels (IWT/coastal): 170,000

■ 9,000 Ships registered in CCS (Chinese Classification Society) with a GT of ≥ 300

■ Each year 700-800 new buildings expected

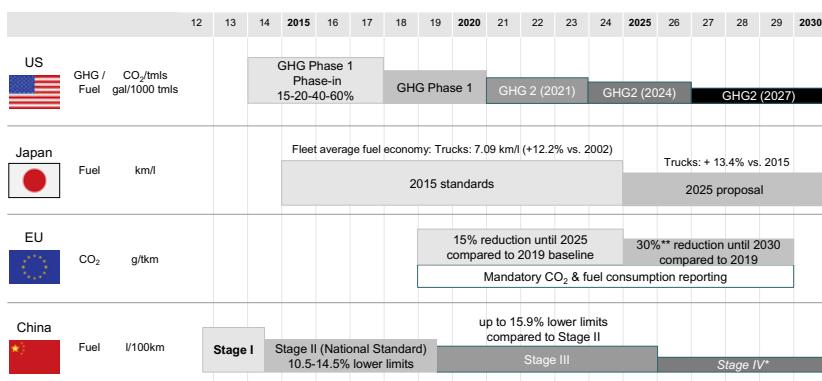
Backside

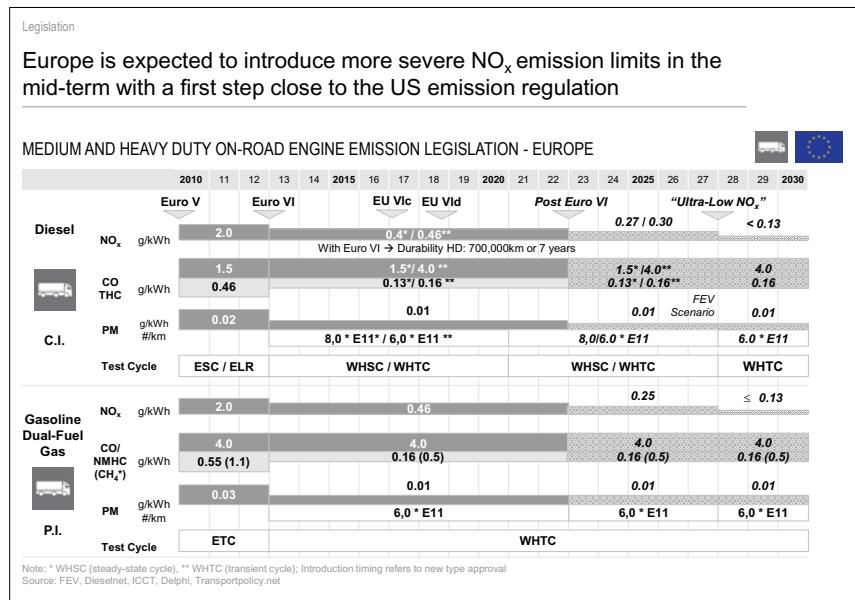
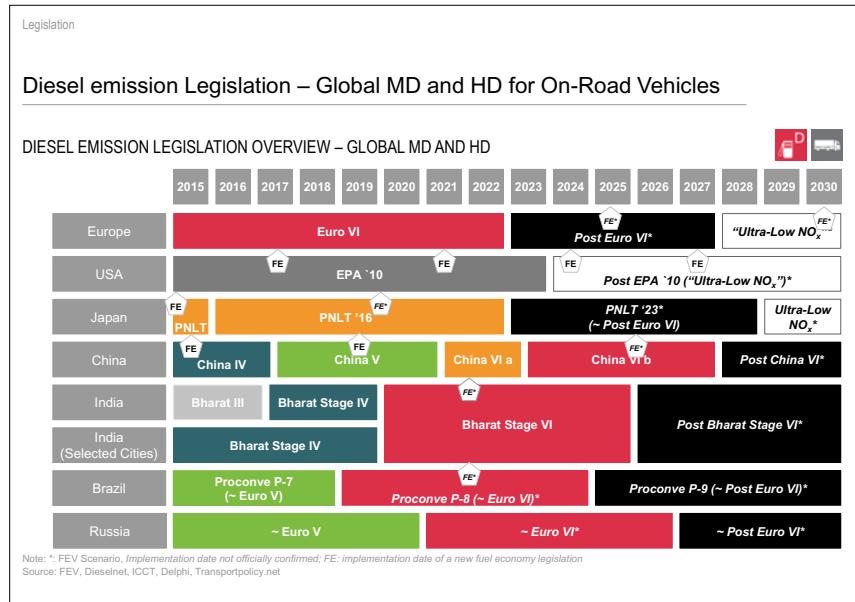
Up to 700,000 tons NO_x/a
Up to 60,000 tons PM/a
100,000 tons SO_x/a

Legislation

Fuel economy / CO₂ regulation already in force for US, Japan and China – Europe to follow with a 15% reduction target until 2025 compared to 2019

COMMERCIAL VEHICLE FUEL ECONOMY REGULATION - OVERVIEW

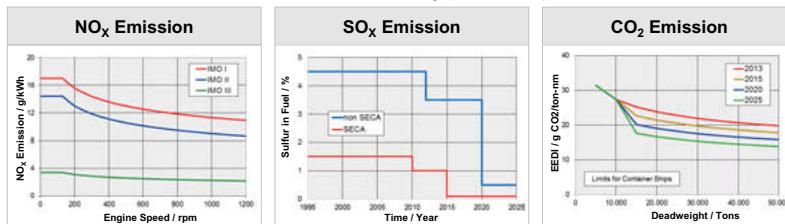




Legislation

Marine Emission Legislation

Annex VI of IMO's Pollution Prevention Treaty (MARPOL)



Required Emission Reduction since 2000

	NO _x	SO _x	CO ₂
non ECA	-20 %	-22 %	-20 %
ECA	-80 %	-93 %	-20 %

ECA: Emission Control Area, SECA: Sulphur Emission Control Area, EEDI: Energy-Efficiency Design Index

Technology roadmaps

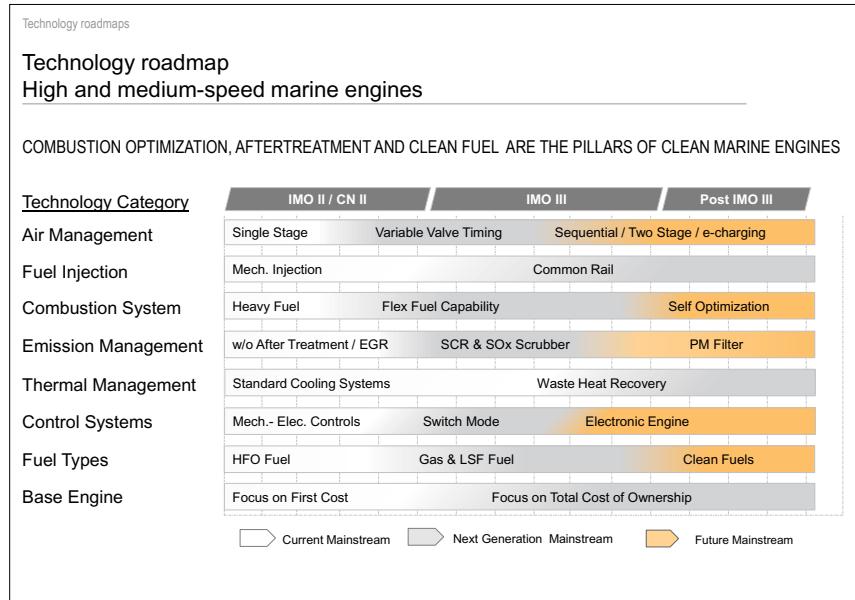
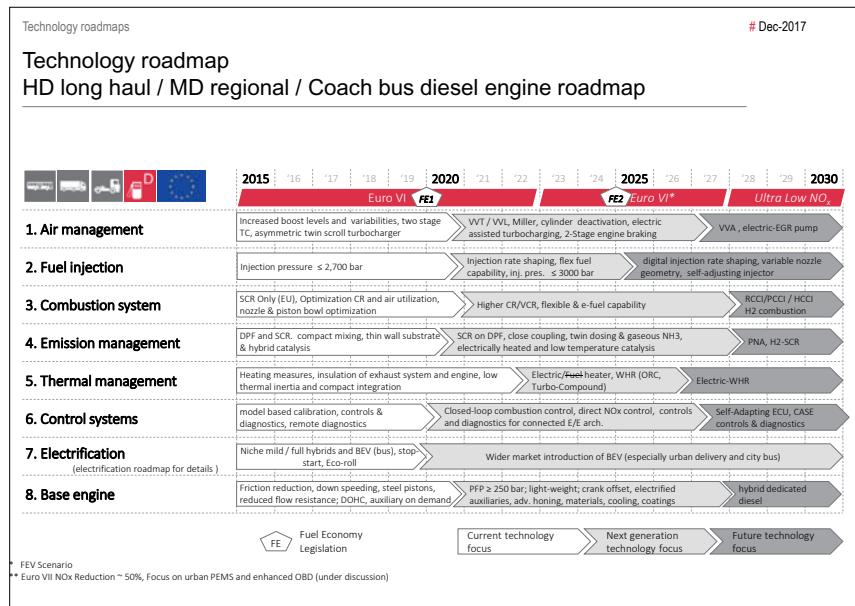
To achieve future fuel efficiency targets as required for the US Supertruck program a stronger focus has to be put on the complete system

FUTURE R&D TRENDS (FEV ESTIMATION ON FOCUSED DEVELOPMENT FIELDS)

Class 8 (Tractor/highway focus)	Short-/mid- term (2024)	Long term (2027+)	
ICE/TM	●	●	<ul style="list-style-type: none"> Short-/midterm focus on engine efficiency improvements until further enhancements become too costly Introduction of advanced automated TMs (DCTs and AMTs) for increased fuel efficiency and convenience
Electrification	●	●	<ul style="list-style-type: none"> Electrification of accessories in the first step Mild electrification for well-fitting drive cycles (e.g. hilly areas, refrigerator truck) expected in the long term
Weight reduction	●	●	<ul style="list-style-type: none"> Weight reduction by intelligent design and new materials Compensate additional weight caused by new technologies and electrification
Aero drag reduction	●	●	<ul style="list-style-type: none"> Continuous improvement and streamlining expected Application of more advanced active aero measures
ADAS/AD*	●	●	<ul style="list-style-type: none"> Several OEMs participate in numerous research programs Strong long- term focus expected due to increased efficiency and safety

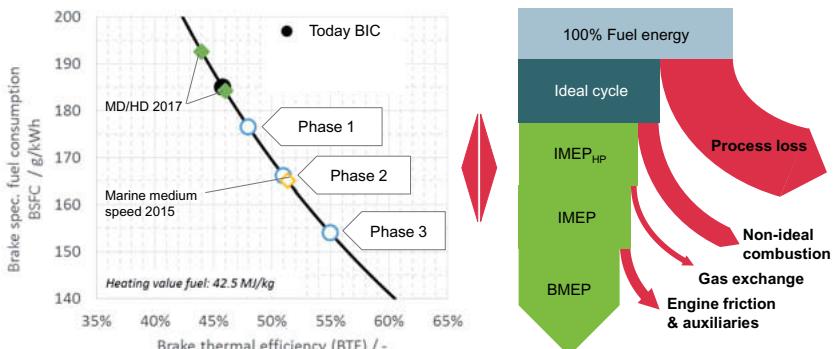
Legend: ● less focused ● strongly focused

*Autonomous driving; Source: FEV



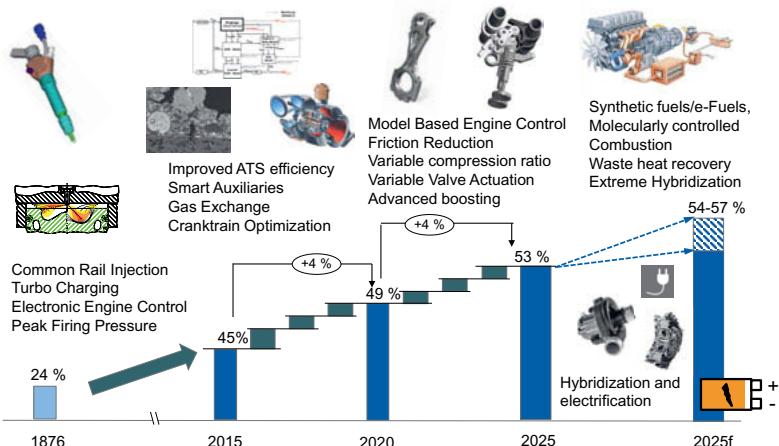
Technologies trends

Future CO₂ and emission legislations require full process optimization to maximize both engine efficiency and EATS conversion efficiency



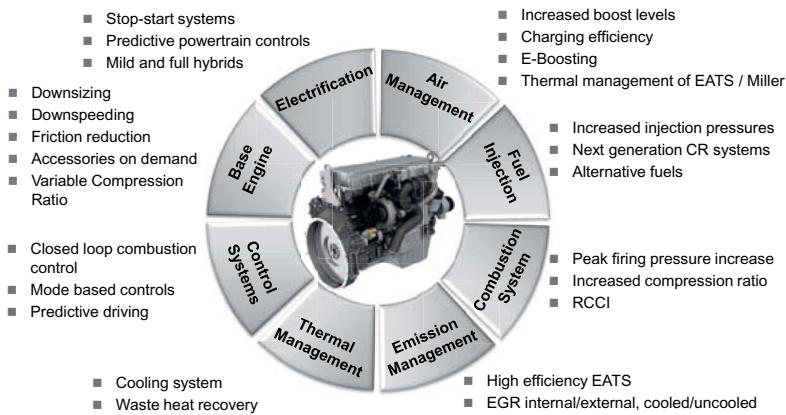
Technologies trends

The internal combustion engine for commercial applications has a high potential for further increase of efficiency



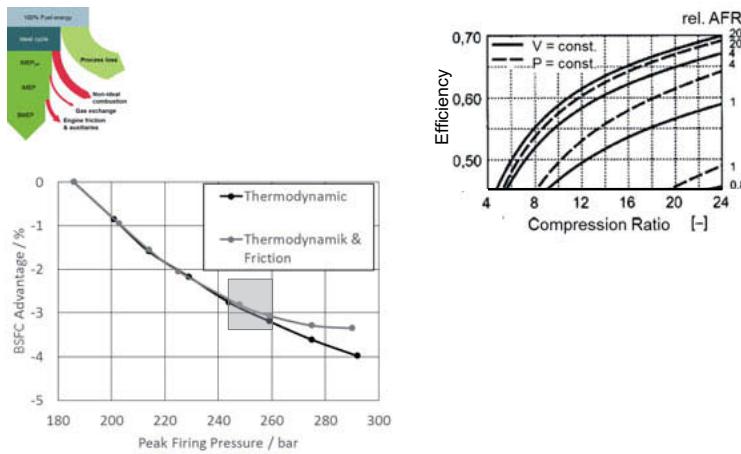
Technologies trends

The next generation of commercial powertrains requires a high degree of system optimization and new approaches to meet legislation requirements



Technologies trends

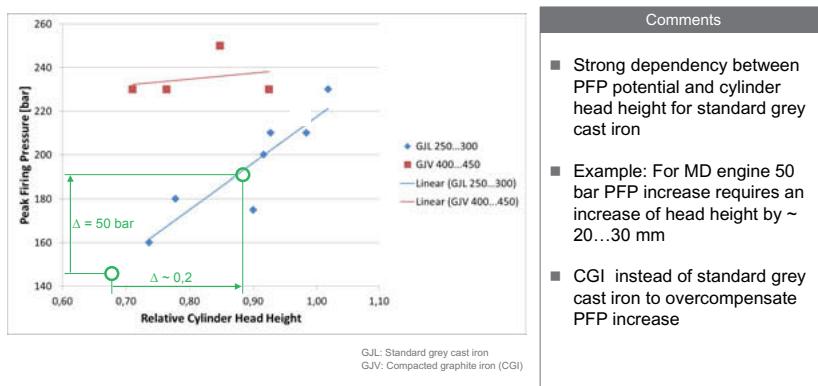
Increased compression ratio and PFP together with combustion rate shaping enable optimized process parameters & control



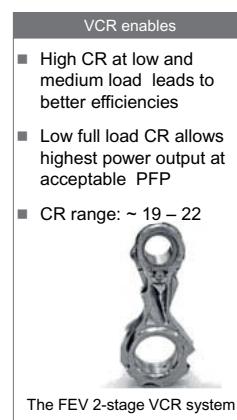
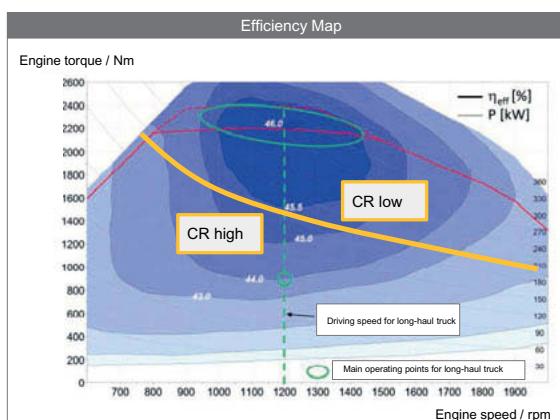
Technologies trends

CGI instead of standard grey cast iron for the cylinder head can be used to reduce cylinder head height and weight, but increases costs

RELATION PEAK PRESSURE POTENTIAL VS. CYLINDER HEAD HEIGHT (MD AND HD ENGINES)



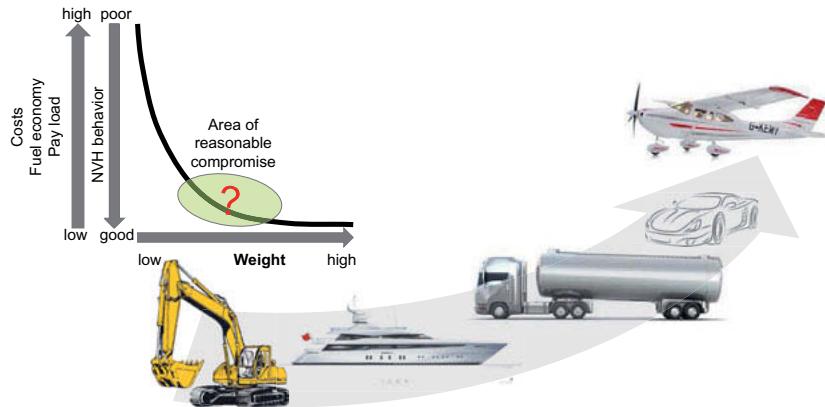
Technologies trends

Application of the FEV 2 Stage VCR system for truck engines
Schematic view on VCR switching strategy

Technologies trends

The request for weight reduction differs for each application according to the related benefits and impacts, but is a fixed target for new developments

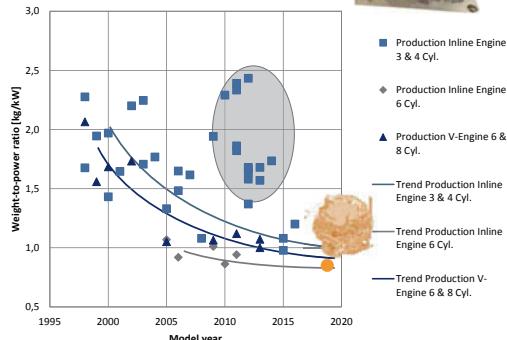
IMPORTANCE OF LOW ENGINE/POWERTRAIN WEIGHT



Technologies trends

PC and LCV Applications: New Architectures enable higher power outputs and drive the specific engine weight by tendency below 1.0 kg/kW

WEIGHT-TO-POWER RATIO VS. MODEL YEAR



Trend over time

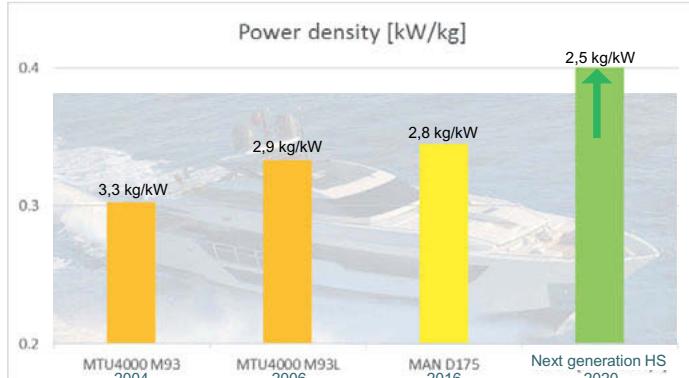
- Reduction of weight-to-power ratio during the last 15 years
- Current engine concepts follow a trend of ~1 kg/kW
- Trend of light engine structures continues and converges between 0.85 – 1.10 kg/kW
- Engines in the grey marked area are either 3 cylinder engine or small displacement 4-cylinder engines as entry version of an engine family
- Latest FEV 6-Cylinder in-line design

Source: FEV

Technologies trends

The next generation of high speed engines will show a significant increase in power density requiring both high specific power and weight reduction

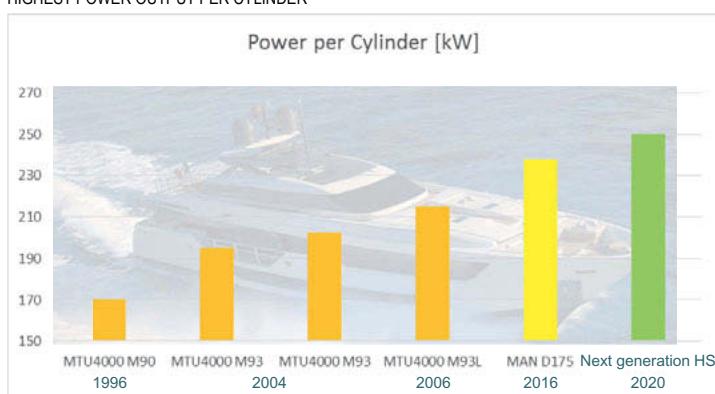
REVOLUTION REPLACES EVOLUTION



Technologies trends

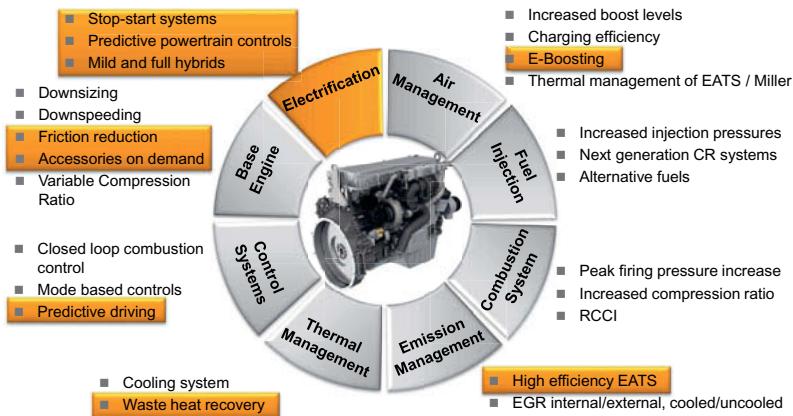
250kW/cylinder will be benchmark for next generation of HS engines requiring to extend the limits for PFP, boosting pressure and piston speed

HIGHEST POWER OUTPUT PER CYLINDER



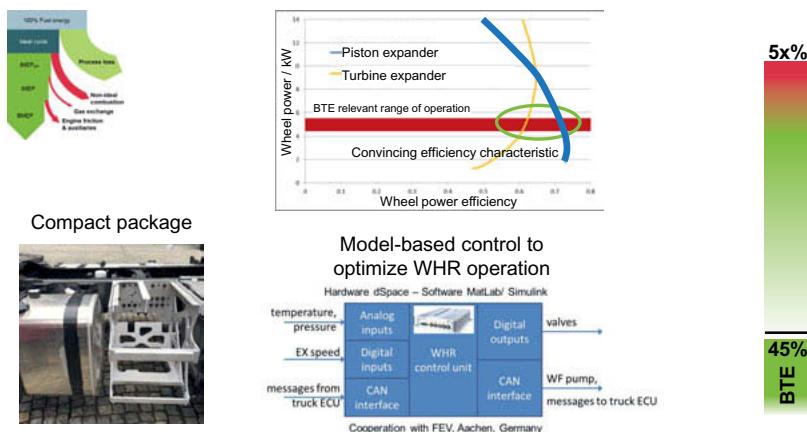
Powertrain electrification

Certain engine technology trends are - directly or indirectly – connected with electrification of commercial powertrains



Powertrain electrification

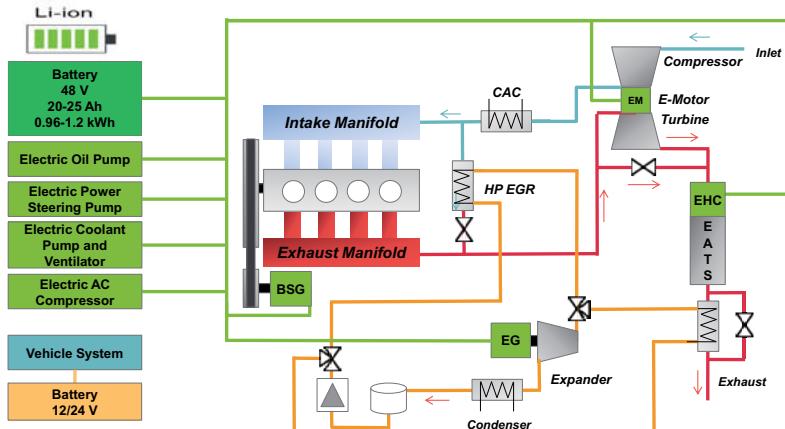
A high efficient system layout together with a model-based control ensures 3-5% benefit with a WHR system



Source: Mahle, Borg Warner

Powertrain electrification

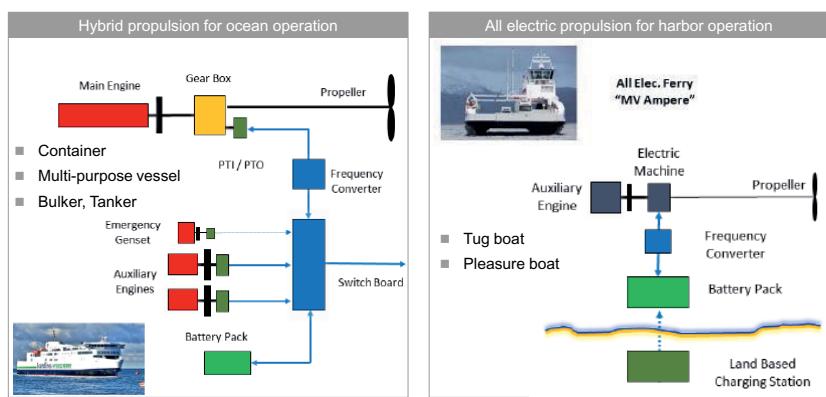
48V Electrification architecture including a WHR system to increase combustion engine efficiency well combinable with hybrid powertrain



Source: EEW

Powertrain electrification

Future marine propulsion technology examples: Hybridized and electrified propulsion systems

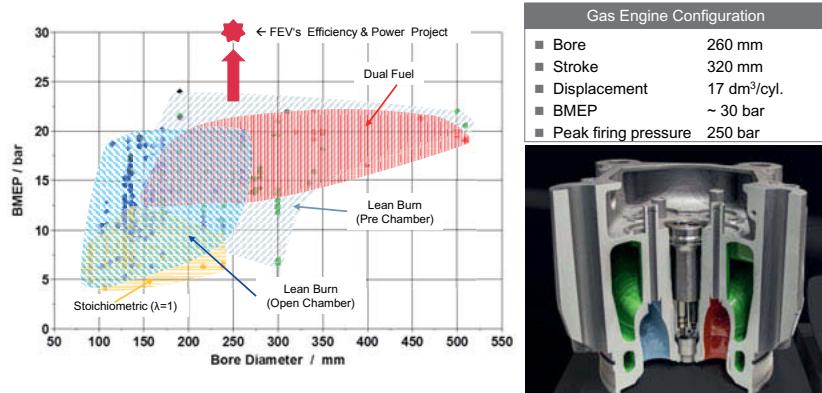


PTO: Power Take Off, PTI: Power Take In

Fuels

Future marine propulsion technology examples: High performance pre-chamber gas engine

FEV PRE-CHAMBER GAS ENGINE FOR HIGHEST POWER OUTPUT AND EFFICIENCY



Source: FEV

Fuels

Future marine propulsion technology examples: Variable compression ratio system VCR

Connecting rod design



Source: FEV

Dual Fuel engines

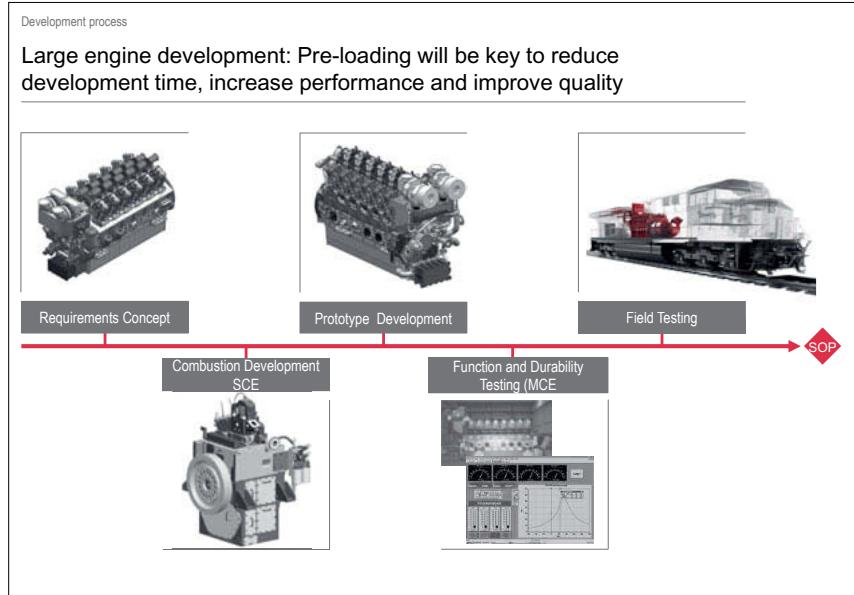
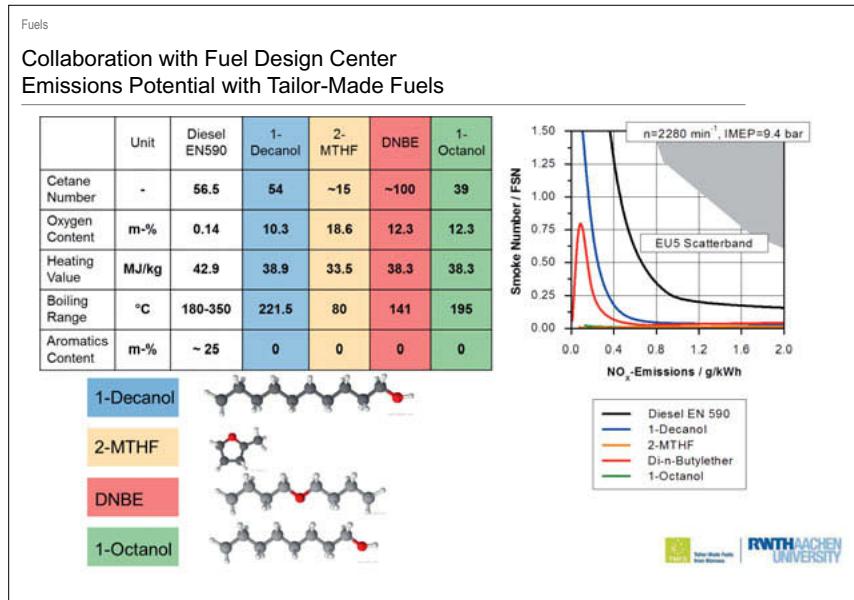
Current DF engine layouts:

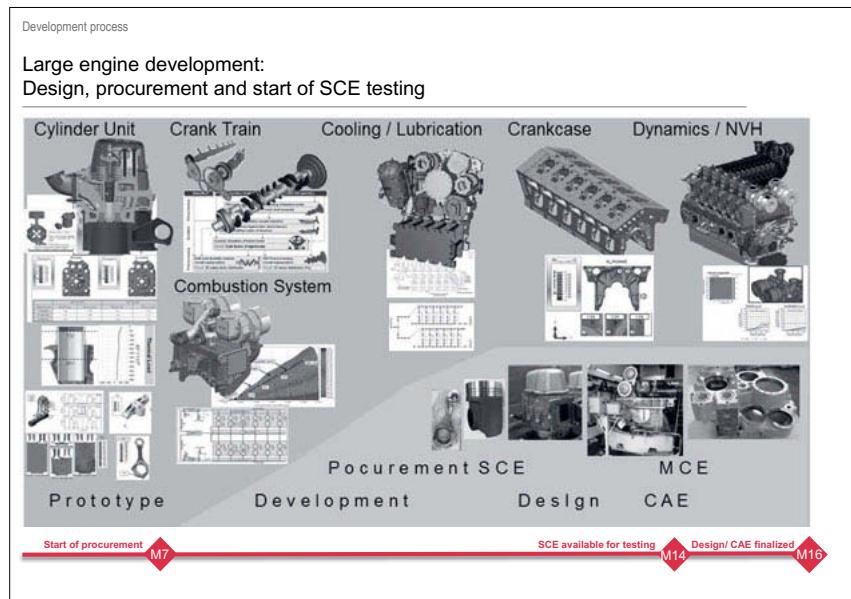
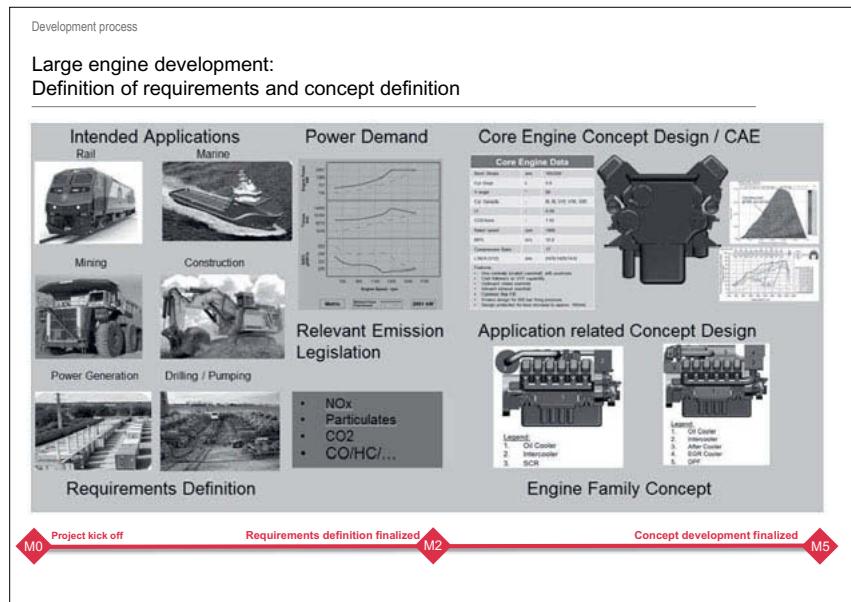
1. Diesel engine operated with Natural Gas
 - Compression ratio ~ 16
 - Full load: 10% natural gas/ 90% Diesel

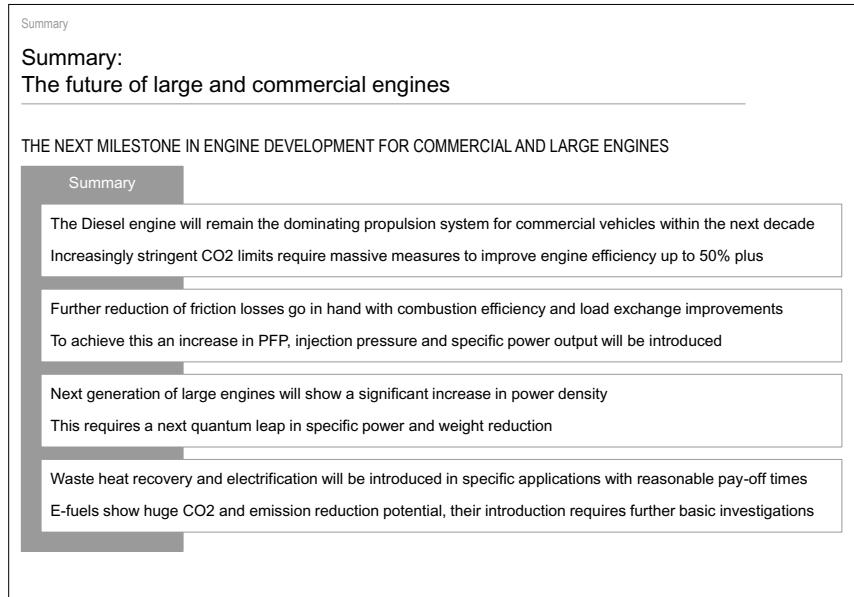
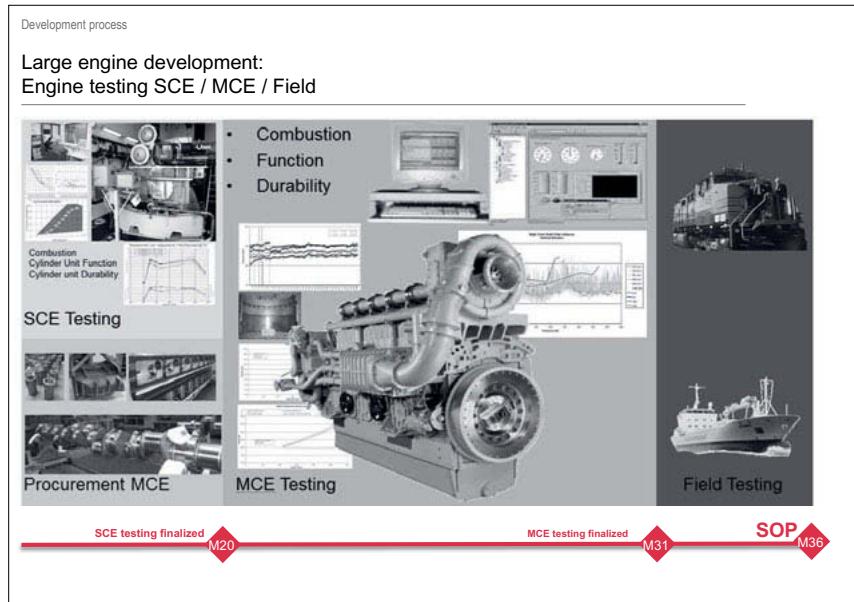
→ **knock limited at rated power**
2. Gas operation optimized dual fuel engine
 - Compression ratio ~12
 - 1% Diesel / 99% natural gas

→ **Low Diesel operation efficiency**

→ **VCR will solve this compromise**







Methodische Integration der virtuellen Versuchsplanung in die schwingfeste und robuste Auslegung von hochbelasteten Aluminiumgussteilen

Methodological integration of the virtual foundry optimization in the fatigue proof and robust component design of highly stressed aluminium castings

M.Sc. Moritz Weidt, Dr.-Ing. Corinna Thomser,
MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Kurzfassung

Robuste Entscheidungen für hochbelastete Motorenkomponenten im Rahmen einer virtuellen Produktfreigabe bedingen die Berücksichtigung von Informationen aus der Funktions- und der Fertigungssimulation. Konstruktionsentscheidungen zur Erfüllung der Funktionsanforderungen sind eng mit der fertigungstechnischen Machbarkeit und den tatsächlichen lokalen Eigenschaften eines Gussteils verknüpft. Die lokale Betriebsfestigkeit eines Gussteils wird neben der Geometrie des Bauteils durch zwei Haupteinflussfaktoren bestimmt: die fertigungs-abhängigen Eigenschaften des Gefüges sowie lokale Defekte beispielsweise in Form von schädlichen Phasen oder Mikroporosität. Die quantitative Vorhersage beider Einflussgrößen und ihre Berücksichtigung in der Funktionsauslegung erlaubt die Berücksichtigung der lokalen Betriebsfestigkeit im Bauteil. Zusätzlich verändert der unvermeidliche Eigenspannungszustand des Gussteils die ertragbare Last. Zusammen mit der virtuellen Versuchsplanung des Gießprozesses können so Haupteinflussgrößen aus dem Prozess auf das Werkstoffverhalten quantifiziert und Potenziale für den Leichtbau besser genutzt werden. Die Grundlagen hierfür wurden in einem Forschungsprojekt ermittelt („Integration der Gießsimulation in die betriebs-feste Bauteilauslegung von Aluminium-Gussbauteilen“; COMET K2; Projekt A1.20) und am Beispiel eines Aluminium-Zylinderkopfs vorgestellt. Die neuen Entwicklungen und die methodische Vorgehensweise zur Integration der Fertigungssimulation in die Funktionssimulation werden diskutiert.

Abstract

Robust decisions for highly stressed engine components within the framework of a virtual product release require the consideration of information from both application simulation and manufacturing simulation. Design decisions to meet functional requirements are closely linked to the manufacturing feasibility and actual local properties of a casting. The local fatigue strength of a casting is determined by two main influencing factors in addition to the geometry of the component: The production-dependent properties of the microstructure as well as local defects, for example in the form of harmful phases or microporosity. The quantitative prediction of both influencing variables and their integration into the functional design allows the consideration of the local fatigue strength in the component. In addition, the residual stress state of the casting changes the bearable load in use. Coupled with the methodology of the virtual test planning of the casting process, main influencing variables from the process can be quantified on the material behaviour, and potentials for lightweight construction can be better used. The basis for this was established in a research project ("Integration of the casting simulation in the operational design of aluminium cast components"; COMET K2; Project A1.20). The approach developed will be presented using the example of an aluminium cylinder head, the new developments and the methodological approach for integrating the two worlds will be discussed.

1. Motivation und Hintergrund

In Motoren werden hohe lokale, statische und dynamische mechanische Eigenschaften auch bei höheren Temperaturen benötigt. Gussteile haben fertigungsbedingt lokale Gussteileigenschaften. Um den wachsenden Ansprüchen an die gewichtsoptimierte und dauerfeste Auslegung von Aluminiumgussteilen gerecht werden zu können, müssen daher in steigendem Maße auch die lokalen Materialeigenschaften bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden. Diese werden jedoch durch die in der Auslegung festgelegte Bauteildimensionierung bereits maßgeblich beeinflusst. So führen reduzierte Wanddicken zu höheren Erstarrungs- und Abkühlraten im Gießprozess, was zunächst einen vorteilhaften Effekt auf die erzielbaren mechanischen Eigenschaften verspricht. Gleichzeitig können Veränderungen der Dimensionierung oder Prozessführung auch negative Auswirkungen auf die lokale Materialqualität haben, beispielsweise eine erhöhte Mikroporosität, ein vergrößertes Gefüge, der Eintrag von Oxiden und Einschlüssen oder die vermehrte Bildung von Al-Fe-Phasen. Weiterhin führen thermische Gradienten und Abkühlgeschwindigkeiten zu Eigenspannungen, die je nach Vorzeichen die ertragbare Last im Betrieb vermindern oder auch erhöhen können. In jedem Fall bestehen in einer frühen Designphase noch große Unsicherheiten bezüglich der genauen Prozesspara-

meter wie Zykluszeit, Werkzeugtemperierung, Platzierung von Kühleisen bis hin zum Prozessfenster der verwendeten Legierungszusammensetzung. Um in dieser Phase bereits eine robuste Aussage über lokal erzielbare mechanische Kennwerte zu treffen, ist folglich die Abdeckung eines mehrdimensionalen Raums von Einflussparametern notwendig. Nur so können das Prozessfenster abgesichert und Positiv- und Negativszenarien frühzeitig abgeschätzt werden. Basierend auf diesen Informationen kann die konsequente Nutzung der Informationen aus der Funktionssimulation im Designstadium Materialpotentiale heben und Entwicklungszeit verkürzen.

Bisher werden weitgehend konstante Materialeigenschaften für die zyklische Funktionssimulation verwendet. Seit langem ist auch die Nutzung von Hilfsgrößen wie der lokale Dendritenarmabstand (DAS) etabliert, aus dem lokale Festigkeiten simulativ vorhergesagt und genutzt werden können. Der Einsatz von konstanten Materialeigenschaften verhindert, dass lokal defektbehaftete Zonen ausreichend zielgerichtet dimensioniert, beziehungsweise dass lokal defektarme Regionen ausreichend belastet werden. Eine optimierte Bauteilauslegung ist nicht möglich und Sicherheitsfaktoren müssen unnötig groß gewählt werden. Der zweite Ansatz erweitert den Auslegungsprozess über eine erste mikrostrukturelle Kenngröße (DAS), was lokale Materialunterschiede besser wiederspiegelt. Die Korrelation zwischen sekundärem Dendritenarmabstand und zyklischer Festigkeit ist jedoch nur indirekt und nicht in jedem Fall gegeben. So wie die lokale Abkühlgeschwindigkeit steigt, sinkt der lokale DAS und die Gefügefinitheit nimmt zu, was mit einer Verkleinerung oder Reduzierung von typischen Defekten einhergeht. Das Resultat sind gesteigerte zyklische Festigkeiten. Dieser Zusammenhang wurde bereits mehrfach in der Literatur vorgestellt und diskutiert [1]. Um darüber hinauszugehen, sind zum einen detaillierte Informationen über die Eigenschaften der Mikrostruktur notwendig, des Weiteren sollte der Eigenspannungszustand des Bauteils bekannt sein. Nicht zuletzt ist auch eine genaue Kenntnis über den größten kritischen lokalen Defekt im Werkstoff unabdingbar. Ein zentraler Aspekt in dieser Kette der Vorhersage der lokalen zyklischen Materialeigenschaften ist die Porosität. Makroporosität (Makrolunker), meist lokalisiert in Bereichen letzter Erstarrung (Wärmezentrum), ist in statisch wie zyklisch hochbelasteten Regionen in den meisten Fällen nicht tolerierbar. Mikroporosität auf der anderen Seite ist ebenfalls unerwünscht, in den meisten technischen Prozessen jedoch nicht völlig vermeidbar. Eine Mikropore, die lokal den größten Defekt im Gefüge darstellt, bestimmt die zyklische Lebensdauer eines Bauteils [2 und 3]. Aus diesem Grund ist das Wissen über die Größe der Mikroporen und ihre Morphologie essenziell für eine realistische Schwingfestigkeitsauslegung.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Mikroporositätscharakteristika basieren auf einer Vielzahl von Mikro-Röntgen-Computertomographieanalysen (XCT). Ziel der Arbeit war, die Zusammenhänge zwischen Porosität und Defektgröße zu ermitteln und damit quantitative Zusammenhänge zwischen der lokalen Mikroporosität im Gussteil und der Ermüdungsfestigkeit des Bau- teils im Betrieb herzustellen. Bild 1 zeigt den beschriebenen Weg.

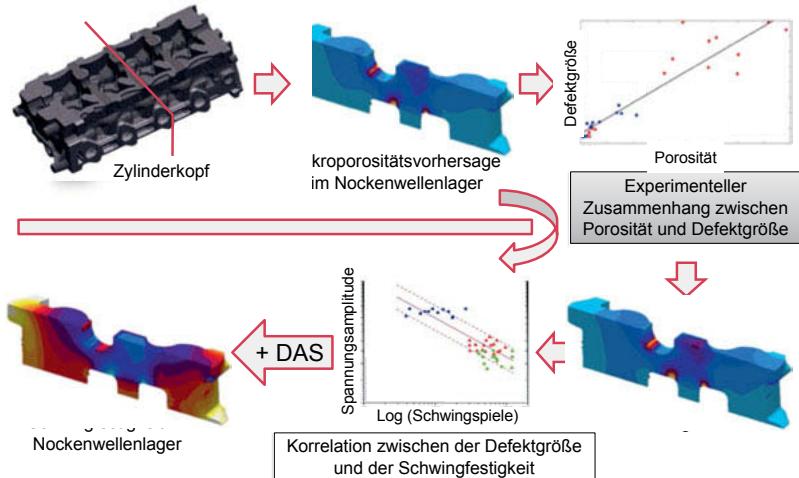


Bild 1: Vorgehensweise für die Vorhersage der lokalen Schwingfestigkeit im Nockenwellenlager, über die lokale Defektgröße und die Gefügefinitheit.

Hierfür wurden XCT-Porositätsanalysen an drei unterschiedlich schnell erstarrenden Positionen, sowie für mehrere Zylinderköpfe der Legierungen AlSi7Cu0.5Mg und AlSi8Cu3 durchgeführt. Der maximale Umhüllendendurchmesser der größten Pore wurde als charakteristische Defektgröße innerhalb einer jeden Probe definiert. Details der XCT-Messungen und -Analysen sowie die Eignung der XCT-Strahlungsquelle, der erforderlichen räumlichen Auflösung, der erforderlichen Größe des gescannten Volumens und der Datenverarbeitungstechniken werden an anderer Stelle von Garb et al. [4] diskutiert. Der entwickelte Zusammenhang zwischen Porosität und Defektgröße wurde verwendet, um zusammen mit der Kenngröße DAS die Ermüdungsfestigkeit eines Nockenwellenlagerbereichs vorherzusagen. Parallel hierzu wurde der Eigenspannungszustand des wärmebehandelten Zylinderkopfs berechnet, um das reale zyklische Versagensverhalten bestmöglich abilden zu können. Die beschriebene Vorgehens-

weise ist ein deutlicher Schritt hin zu einer geschlossenen Simulationskette („Integrated Computational Materials Engineering“), um die schwingfeste Konstruktion neuer Gusskomponenten zu ermöglichen.

2. Gussprozess

Aus den Zylinderköpfen wurde an drei unterschiedlich schnell erstarrenden Teilbereichen Probenmaterial entnommen. Hierbei handelt es sich um Brennraum, Zwischendeck und Nockenwellenlager. Ziel der Auswahl war, ein breites Feld an Erstarrungszeiten abzudecken. Der Zylinderkopf ist repräsentativ für ein breites Spektrum von Aluminiumgussteilen, die im Kokillengussverfahren hergestellt werden. Er wurde von Nemak Linz (Österreich) im Rotacast®-Verfahren gegossen [5]. Das Rotacast®-Verfahren bietet eine ausgezeichnete Flexibilität und wird zur Herstellung hochwertiger Gussteile eingesetzt. Durch den Einsatz der aktiven Kühlung in bestimmten Bereichen der Form können lokale Eigenschaften des Gefüges gesteuert und die Prozesszeit reduziert werden. Die Schmelze wird vom Gießofen über einen robotergeführten Löffel in die Gießwanne gefüllt. Die Wanne schwenkt unter die geschlossene Form und wird an die Kokille angedockt. Durch eine kontrollierte Drehbewegung um 180° wird eine gleichmäßige Füllung und eine anschließende natürliche Erstarrung vom Brennraum zum Speiser gewährleistet. Für die Untersuchungen wurden zwei Legierungen vergossen. Die erste Legierung war eine AlSi8Cu3 (korngefeint und Sr-veredelt), die Zweite eine AlSi7Cu0.5Mg mit einem deutlich geringeren Gehalt an Eisen (ebenfalls korngefeint und Sr-veredelt).

3. Mikrocomputertomographie und Datenaufbereitung

Am Materials Center Leoben wurden dreißig Proben (fünf Proben pro Position und Legierung) in einem GE nanotom m micro-XCT gescannt. In Abhängigkeit von der erwarteten Gefügefeinheit wurde entweder eine räumliche Auflösung von 8 µm (langsam erstarnte Proben) oder 3 µm (schnell erstarnte Proben) Voxelgröße verwendet. Bei der Voxelgröße handelt es sich um die Länge in x-, y- und z-Richtung eines würfelförmigen Scancolumens, dem dreidimensionalen Äquivalent zu einem zweidimensionalen Pixel. Das gescannte Volumen beträgt im arithmetischen Mittel über alle Proben ca. 144 und 477 mm³ (3 beziehungsweise 8 µm Scanauflösung). Durch die Festlegung eines selbstbestimmten, konsistenten Schwellwerts im oberen akzeptablen Wertebereich wurde für jeden Voxel bestimmt, ob es sich um Porenvolumen oder dichtes metallisches Gefüge handelt. Die Auflösung der resultierenden Porenvolumina wurde im Anschluss durch digitale Bildnachbearbeitung künstlich erhöht. Dabei wurden nahe zueinander befindliche Porenvolumina "zusammengeführt" und als eine größere Pore analysiert. Kri-

terium für die Zusammenfassung war der Abstand zwischen zwei Poren und deren äquivalenten Kugeldurchmessern: Traf oder unterschritt der kleinere äquivalente Kugeldurchmesser den Porenabstand, wurde die „Porenvereinigung“ vorgenommen. Die Analyseroutine wurde vom Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau der Montanuniversität Leoben in Österreich entwickelt.

In Bild 2 ist eine Pore mit ihrer konvexen Umhüllenden dargestellt. Der Umhüllendendurchmesser wurde mit d_e bezeichnet, der größte Umhüllendendurchmesser als maximaler Umhüllendendurchmesser $d_{e,max}$ gekennzeichnet.

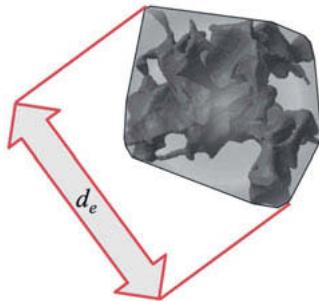


Bild 2: Darstellung des maximalen Durchmessers einer konvexen Porenumhüllenden

4. Ergebnis der Porenanalysen

Tabelle 1 zeigt die minimale sowie maximale Porosität, als auch den minimalen und maximalen Durchmesser der Porenumhüllenden. Es wird deutlich, dass der Porositätsgehalt selbst im Maximum sehr niedrig ist. Die beobachteten Defektgrößen können jedoch gleichzeitig bis zu 4 mm betragen.

Tabelle 1: Liste minimalen und maximalen charakteristischen Porositätskennwerte aller 30 ausgewerteten Proben

	Porosität, g_p (%)	Maximaler Umhüllendendurchmesser, $d_{e,max}$ (μm)
Min	0,003	218
Max	0,392	3.961

Im Bild 3 wird eine Probe der Legierung AlSi8Cu3 aus dem Zwischendeck in 3D dargestellt. Obwohl die Probe lediglich 0,176 % Porosität aufweist, beträgt der maximale Durchmesser der Porenumhüllenden 2,75 mm.

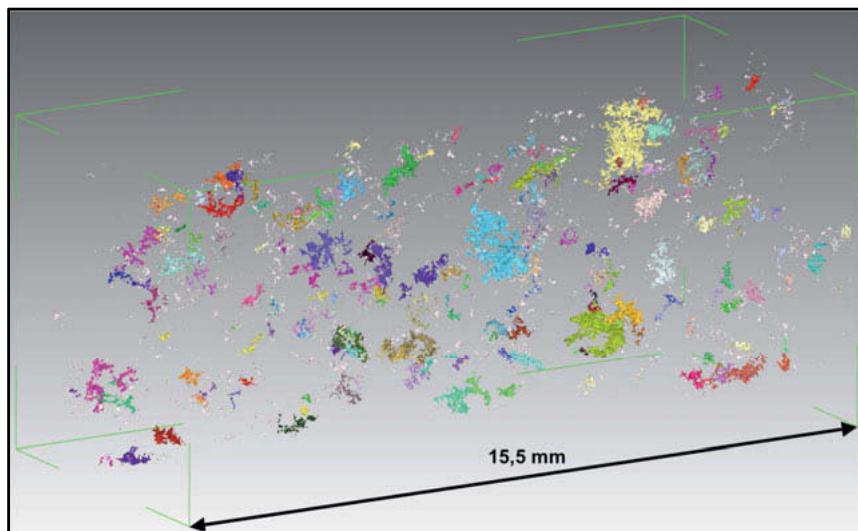


Bild 3: Dreidimensionale Darstellung einer XCT Probe aus dem Zwischendeck eines AlSi8Cu3 Zylinderkopfs. Die Porosität beträgt 0,176 % und der maximale Durchmesser der Porenumhüllenden($d_{e,max}$) 2.753 µm. Die Einfärbung der einzelnen Poren erfolgt zufällig und nur zur besseren Differenzierung der einzelnen Poren.

Mit einem maximalen Defektdurchmesser von 2,75 mm ist damit klar, dass die größte bzw. eine der größten Poren, die bezogen auf die eingeleiteten Spannungen in schädlicher Richtung orientiert ist, zum Versagen der Probe führen muss. Die vorliegenden Poren stellen die mit Abstand größten vorliegenden Defekte im Materialgefüge dar.

Bild 4 zeigt den maximalen Durchmesser der Porenumhüllenden aller 30 gescannten Proben, aufgetragen gegen die Porosität. Die Proben der Legierung AlSi8Cu3 decken die gesamte Bandbreite von beobachteten Porositätsniveaus ab, d. h. sowohl sehr niedrige als auch die höchsten beobachteten Porositätsgehalte. Im Gegensatz dazu befinden sich die Proben der Legierung AlSi7Cu0.5Mg nur in den sehr niedrigen Porositätsregionen. Das allgemeine Verhalten beider Legierungen ist jedoch gleich und zeigt - mit steigender Porosität - eine Zunahme des maximalen Durchmessers der Porenumhüllenden. Dieser Zusammenhang ist in Näherung als linear anzunehmen und als Funktion (Regressionsgerade) mit den entsprechenden Koeffizienten in Bild 4 dargestellt. Die beobachtete Streuung steigt mit zunehmendem Porositätsniveau an.

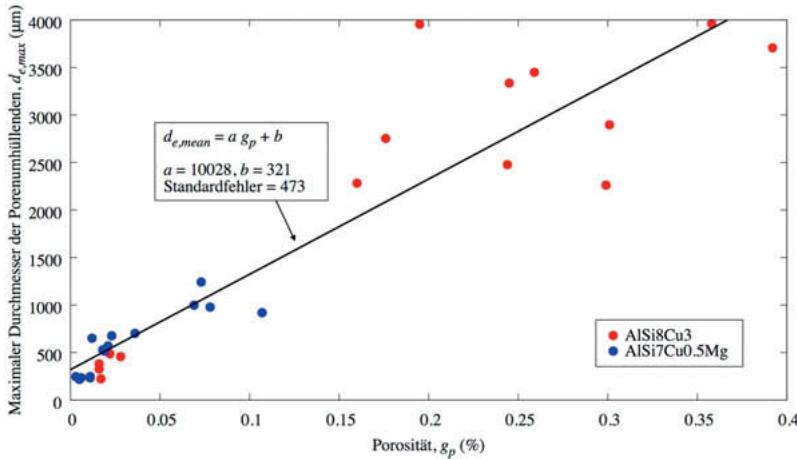


Bild 4: Darstellung des maximalen Durchmessers der Poren umhüllenden, aufgetragen gegen Porosität

Die lineare Korrelation zwischen dem maximalen Umhüllendendurchmesser und der Porosität ist bemerkenswert: Beide Legierungen weisen ca. 2,5 Gew.- % Unterschied im Kupfergehalt und ca. 1 Gew.-% im Siliziumgehalt auf. Zudem sind innerhalb einer Legierung drei deutlich unterschiedlich schnell erstarrende Probenregionen vorzufinden. Trotzdem folgen alle Proben demselben prinzipiellen linearen Trend. Dies ist ein Hinweis auf eine grundlegendere Charakteristik von Porosität in diesem Legierungssystem.

Das im Maximum höhere Porositätsniveau, der AlSi8Cu3 Proben kann hauptsächlich durch den höheren Kupfergehalt erklärt werden. Kupfer ist bekannt dafür, dass es in Aluminium-Silizium-Gusslegierungen zu einer Destabilisierung der eutektischen Erstarrungsfront führt und damit zu einer eutektischen, breiartigen, zuletzt erstarrenden Zone [6]. Als Resultat kann eine reduzierte Permeabilität der erstarrenden schwammartigen Mikrostruktur angenommen werden, was zu einer früheren Abschnürung von flüssigen Bereichen führt und damit das Potential für die Entstehung von größerer Porosität bildet. Dies ist jedoch nicht notwendigerweise der Fall. Sollte während der Erstarrung ein ausreichend hoher lokaler Temperaturgradient vorherrschen, kann eine lange und ausgeprägte breiartige Zone verkürzt werden und damit etwaige negative Effekte des erhöhten Kupfergehalts auf die Porosität kompensieren. Darüber hinaus soll Kupfer in Kombination mit dem eutektischen Veredelungsmittel Strontium die Größe der eutektischen Zellen erhöhen [7]. Dies führt zu einer Vergrößerung der flüssigen Restschmelzebereiche und damit zu einem höheren Porositätspotential. Schlussendlich vergrößert

Kupfer das Erstarrungsintervall speziell in der „Terminal Freezing Range“ (TFR₈₅₋₉₅ zwischen 85 % und 95 % erstarrtem Phasenanteil). Die sich am Ende der Erstarrung bildende Phase Al₂Cu hat ein hohes Volumendefizit zwischen dem flüssigen und festen Zustand von ca. 8,4 Vol-%. Der erste Faktor verschlechtert die Speisbarkeit im erstarrnden Gefüge, der zweite Faktor erhöht dagegen den lokalen Speisungsbedarf der erstarrnden letzten Schmelze. Da trotz der vorgestellten Unterschiede beide Legierungen das gleiche grundlegende Verhalten in Bezug auf Porengröße zu Porositätsmenge zeigen, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass - unabhängig von der entstehenden Menge an Porosität - die Porenform unabhängig von der chemischen Zusammensetzung, der Erstarrungsrate oder der Länge der brennartigen, teil-erstarrten Zone ist. Vielmehr scheint die dendritische Struktur ganz allgemein den verfügbaren Raum für Porenbildung vorzugeben.

5. Eigenspannungsverteilung nach der Wärmebehandlung

Der Gussprozess und die Wärmebehandlung von Aluminiumgussteilen können zu erheblichen Eigenspannungen führen. Da sich diese Eigenspannungen zum einen vorteilhaft, zum anderen nachteilig mit den Lastzuständen aus dem Bauteileinsatz überlagern können, müssen sie bereits während der Auslegung des Bauteils berücksichtigt werden. Sollten sich konstruktionsbedingt nachteilige Spannungszustände lokal nicht vermeiden lassen, kann bereits in dieser Phase eine sinnvolle Anpassung entweder der Geometrie oder beispielsweise des Abschreckvorgangs nach dem Lösungsglühen abgeschätzt werden. Für den AlSi7Cu0.5Mg Zylinderkopf wurde diese Eigenspannungsberechnung für eine angepasste T6 Wärmebehandlung durchgeführt (Bild 5).

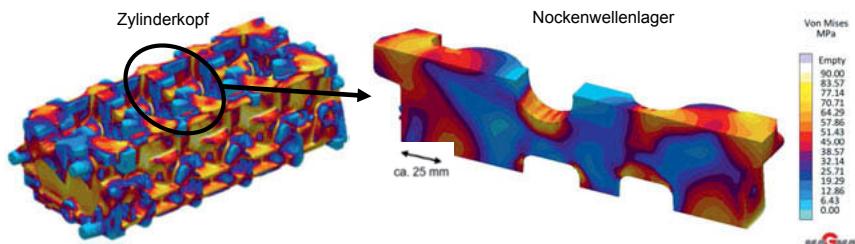


Bild 5: Darstellung der Von Mises Vergleichsspannung im gesamten Zylinderkopf (links) und im Schnitt durch das Nockenwellenlager (rechts) nach einer angepassten T6 Wärmebehandlung

Es zeigt sich, dass nach der Wärmebehandlung signifikante Eigenspannungen im Gussteil vorliegen. Diese erreichen eine Von Mises Vergleichsspannung von über 90 MPa und sind

daher in jedem Fall für eine Funktionssimulation zu berücksichtigen. Die Hauptursache der hohen Spannungen ist dabei die Wasserabschreckung nach der T6-Lösungsglühung. Die Art der Abschreckung ist damit auch der Hauptangriffspunkt für eine Reduzierung des Eigenspannungsniveaus. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang eine Abschreckung durch ein Wasser-Luftgemisch oder durch bewegte Luft.

6. Abschätzung der lokalen Ermüdungsfestigkeit

Wie bereits beschrieben ist es möglich, aus der lokalen Erstarrungszeit den lokalen Dendritenarmabstand (DAS) vorherzusagen. Dies wiederum kann mit der Zugfestigkeit einfach korreliert werden. Bild 6 zeigt die entsprechenden Vorhersagen für das verwendete Nockenwellenlager des Zylinderkopfs (Legierung AlSi7Cu0.5Mg).

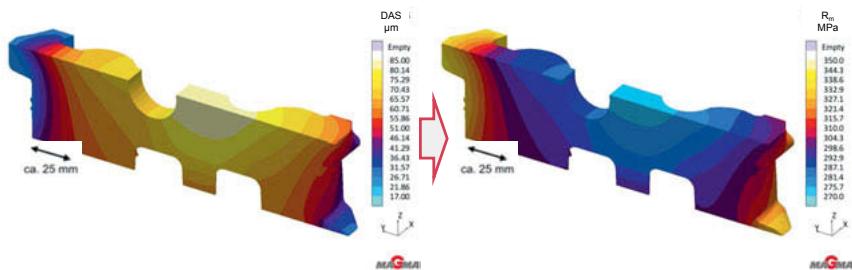


Bild 6: Darstellung des vorhergesagten Dendritenarmabstands (DAS) und der aus Experimenten korrelierten Zugfestigkeit im T6 Wärmebehandlungszustand im Schnitt durch das Nockenwellenlager

Es ist ersichtlich, dass der DAS direkt mit dem Abstand zur Kokille in Verbindung steht. Im Nockenwellenlager tritt - mit zunehmendem Abstand von der Kokillenoberfläche - ein schneller Anstieg des DAS auf. Zugversuche in Zonen mit unterschiedlichen DAS ermöglichen eine Vorhersage der lokalen Zugfestigkeit (R_m). Die Zugfestigkeit kann mittels etablierter Ansätze nun für eine verbesserte Abschätzung der zyklischen Eigenschaften genutzt werden. Es wird klar, dass diese Vorgehensweise lediglich die lokale Erstarrungsrate widerspiegelt und lokale Effekte wie der thermische Gradient oder der Einfluss der legierungsspezifischen Erstarrungsmorphologie keinen Einfluss auf die vorhergesagte Schwingfestigkeit haben können. Damit ist dieser Ansatz zwar eine Verbesserung zu einer Bauteilauslegung mit konstanten Materialeigenschaften, ermöglicht jedoch keine Berücksichtigung lokalisierte Porositätseffekte. Als

Konsequenz sind nach wie vor deutliche Abweichungen zwischen dem erwarteten und dem tatsächlich beobachteten Versagensverhalten zu erwarten.

Im Gegensatz zum gerade beschriebenen Ansatz kann durch eine Vorhersage der lokalen Mikroporosität die lokal vorliegende Defektgröße in Form des maximalen Durchmessers der Porenumhüllenden ermittelt werden. Die Defektgröße und die Mikrostrukturcharakteristik ermöglichen wiederum die Ableitung lokaler Schwingfestigkeit (Bild 7).

Für die Vorhersage der lokalen Mikroporosität wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen vorgeschlagen, hier wird im speziellen auf die Veröffentlichung von Carlson et al. [8] verwiesen. Darauf aufbauend wurde für den Nockenwellenbereich des Zylinderkopfs die lokale Menge an Mikroporosität vorhergesagt (siehe Bild 7). In den meisten Bereichen zeigte sich ein sehr niedriges Porositätsniveau, während lokal jedoch auch deutlich höhere Mikroporositäten vorhergesagt wurden. Diese übersteigen teilweise den abgedeckten Versuchsraum und wurden daher nach oben hin auf 0,5 % begrenzt.

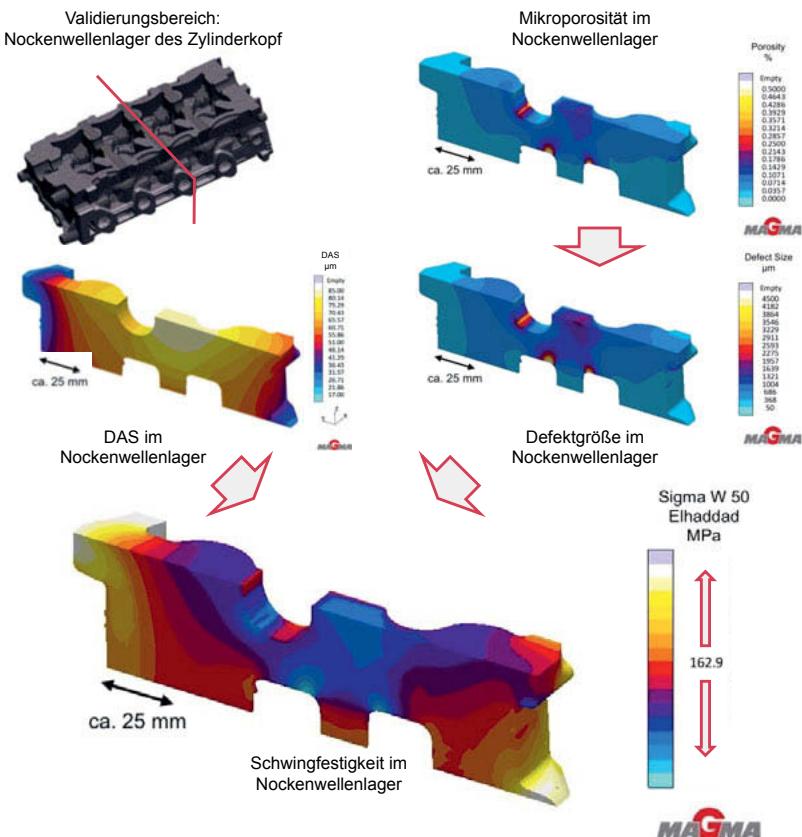


Bild 7: Darstellung der vorhergesagten Mikroporosität, der abgeleiteten lokalen Defektgröße, des lokalen DAS und der lokalen Schwingfestigkeit nach dem El-Haddad Modell. Gezeigt ist jeweils der Schnitt durch den Nockenwellenlagerbereich.

Die Mikroporositätsvorhersage wurde mit Hilfe der in Bild 4 vorgestellten Korrelation in eine lokale maximale Defektgröße überführt. Da es sich lediglich um eine lineare Korrelation handelt, ist die lokale Verteilung des maximalen Durchmessers der Porenumhüllenden in gleicher Form im Nockenwellenlager verteilt (wie Mikroporosität, s. o.). Der mit steigender Porositätsmenge extreme Anstieg der Defektgröße führt in den Bereichen hoher Porosität zur Vorhersage sehr großer Umhüllendendurchmesser. Dabei deckt der beobachtete Versuchsraum nur

Defekte bis zu einem Umhüllendendurchmesser von ca. 4.000 μm ab, weshalb die vorhergesagte Defektgröße auf 4.500 μm limitiert wurde. Eine weitere Extrapolation der Defektgröße scheint auf Basis der durchgeführten Versuche nicht zulässig.

Bild 7 zeigt die lokale Ermüdungsfestigkeit nach dem El-Haddad-Modell. Das Kitagawa-Takahashi-Modell [9] mit der Erweiterung nach El-Haddad [10] berücksichtigt neben der lokalen Defektgröße ebenfalls bruchmechanische Kennwerte wie den Langrisschwellwert $\Delta K_{th,lc}$, einen Geometriefaktor Y und das Schwingfestigkeitsniveau σ_{d0} des defektfreien Materials. Da diese ebenfalls von der lokalen Gefügefeinheit abhängen, beeinflussen sie nicht nur die lokale Defektgröße, sondern auch die lokale Erstarrungsrate in Form des DAS. Es können damit signifikante lokale Unterschiede in der vorhergesagten Ermüdungsfestigkeit, speziell im Vergleich zu einer rein DAS basierten Eigenschaftsvorhersage (siehe Bild 6), festgestellt werden. Diese Unterschiede beruhen sowohl auf lokalen Unterschieden in der Gefügefeinheit als auch auf den lokalen Erstarrungsbedingungen sowie der Legierungscharakteristik. Der genutzte Ansatz für die Schwingfestigkeitsvorhersage wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts („Integration der Gießsimulation in die betriebsfeste Bauteilauslegung von Aluminium-Gussbauteilen“; COMET K2; Projekt A1.20) vom Lehrstuhl für Allgemeine Maschinenbau in Leoben, Österreich, entwickelt. Details hierzu wurden von Garb [11] veröffentlicht.

7. Fazit

Auf der Grundlage von XCT-Analysen für zwei Aluminiumgusslegierungen konnten bisher nicht verfügbare charakteristische Zusammenhänge zwischen der Porositätsmenge und der Porositätscharakteristik ermittelt werden. Der beobachtete lineare Zusammenhang zwischen Porosität und dem maximalen Durchmesser der Poren umhüllenden wurde zur Vorhersage einer lokalen Schwingfestigkeit genutzt. Diese beruht auf einer Berücksichtigung der lokalen Erstarrungsgeschwindigkeit (in Form des DAS), sowie auf einer lokalen Vorhersage der Mikroporosität. Auf diese Weise werden komplexere örtliche Unterschiede im Erstarrungsverhalten sowie Charakteristika der jeweiligen Legierung in der Vorhersage berücksichtigt. Zusätzlich wurde gezeigt, dass Eigenspannungen durch die Gussteilherstellung und -wärmebehandlung nicht vernachlässigt werden dürfen, da sie einen maßgeblichen Faktor für die Ausnutzung der tatsächlich beobachteten Bauteilfestigkeit darstellen können. Der vorgestellte Ansatz ist damit eine deutliche Erweiterung zu bisher beschriebenen und zum Teil etablierten Auslegungsansätzen. Die genannte Vorgehensweise stellt bereits in der Prozessauslegung, zyklische Materialeigenschaften für die Bauteilauslegung mittels Funktionssimulationen bereit. Die systematische Verknüpfung der einzelnen Simulationen in einem virtuellen Versuchsplan (DoE) ermöglicht schon in der Designphase die Abschätzung der Auswirkungen auf die lokalen

Materialeigenschaften. Dies ermöglicht von Produktionsbeginn an eine robuste Prozessführung.

Danksagung

Die Autoren danken Nemak Linz für die Bereitstellung der Gussteile sowie der AVL List GmbH für die beigesteuerte Expertise. Dank geht auch an die Materials Center Leoben GmbH für die Durchführung der CT-Scans. Schließlich wird die finanzielle Projektunterstützung durch die österreichische Bundesregierung (insbesondere durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technik und das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft), vertreten durch die Steirische Forschungsförderungsgesellschaft mbH und die Steirische und die Tiroler Landesregierung, vertreten durch die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH und die Standortagentur Tirol, im Rahmen des COMET-Förderprogramms dankbar gewürdigt.

Literaturangaben

- [1] Q. G. Wang, D. Apelian, und D. A. Lados, „Fatigue behavior of A356/357 aluminum cast alloys. Part II – Effect of microstructural constituents“, *J. Light Met.*, Bd. 1, Nr. 1, S. 85–97, 2001.
- [2] M. J. Couper, A. E. Neeson, und J. R. Griffiths, „Casting defects and the fatigue behaviour of an aluminium casting alloy“, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Bd. 13, Nr. 3, S. 213–227, 1990.
- [3] C. Garb, M. Leitner, und F. Grün, „Fatigue Strength Assessment of AlSi7Cu0.5Mg T6W Castings Supported by Computed Tomography Microporosity Analysis“, *Procedia Eng.*, Bd. 160, S. 53–60, Jan. 2016.
- [4] C. Garb, M. Leitner, M. Tauscher, M. Weidt, und R. Brunner, „Statistical analysis of micropore size distributions in Al–Si castings evaluated by X-ray computed tomography“, *Int. J. Mater. Res.*, Aug. 2018.
- [5] H. Meishner und F. J. Feikus, „Gießverfahren zur Herstellung von Aluminium-Zylinderköpfen und -Zylinderkurbelgehäusen“, *Giesserei*, Bd. 102, S. 34–41, 2015.
- [6] G. Heiberg, K. Nogita, M. Raanes, A. L. Dons, A. K. Dahle, und L. Arnberg, „Effect of magnesium, iron and copper on eutectic solidification of hypoeutectic aluminum-silicon alloys“, *AFS Trans.*, Bd. 110, S. 347–358, 2002.
- [7] S. D. McDonald, A. K. Dahle, J. A. Taylor, und D. H. StJohn, „Modification-related porosity formation in hypoeutectic aluminum-silicon alloys“, *Metall. Mater. Trans. B*, Bd. 35, Nr. 6, S. 1097–1106, Dez. 2004.
- [8] K. D. Carlson und C. Beckermann, „Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion“, *Metall. Mater. Trans. A*, Bd. 40, Nr. 1, S. 163–175, Jan. 2009.
- [9] H. Kitagawa, „Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage“, *Proc 2nd ICM Clevel.* 1976, S. 627–631, 1976.
- [10] M. H. El Haddad, T. H. Topper, und K. N. Smith, „Prediction of non propagating cracks“, *Eng. Fract. Mech.*, Bd. 11, Nr. 3, S. 573–584, 1979.
- [11] C. Garb, „Materialmodellentwicklung für die betriebsfeste Auslegung von Aluminiumgussbauteilen unter Berücksichtigung mikrostruktureller Größen“, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2018.

Traceability als Erfolgsfaktor Industrie 4.0 in der Großserienproduktion von Aluminium- Druckguss-Zylinderkurbelgehäusen

Traceability as a key indicator Industry 4.0 in the large-scale production of aluminium die casting cylinder crankcases

M.Sc. Fabian Loerwald, Martinrea Honsel Germany GmbH, Meschede

1. Einleitung

Ausgelöst durch die steigende Komplexität im Auftragsabwicklungs- und Produktentstehungsprozess sowie die Kundenanforderungen an eine lebenszyklusweite Nachverfolgbarkeit der Bauteile hat die Martinrea Honsel Germany GmbH ein umfassendes Konzept zur Bewältigung dieser Herausforderungen erarbeitet und im Rahmen eines Referenzprojektes am Standort Meschede umgesetzt.

Das Konzept umfasst den Einsatz eines DataMatrix-Codes (DMC) auf Bauteilebene und kombiniert diesen mit den gesteigerten Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) wie der Echtzeit-Datenverarbeitung und der Vernetzung von Mensch, Maschine und System. Herausfordernd ist die Integration dieses Konzepts in die bestehende Prozesslandschaft des Unternehmens. Weiterhin wird erörtert, inwieweit der Einsatz von Traceability im Rahmen der Großserienproduktion von Zylinderkurbelgehäusen als Enabler der Industrie 4.0 dienen kann und die Optimierung und Qualitätsabsicherung der Fertigung unterstützt.

2. Industrie 4.0 und Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS)

Getrieben durch das Internet und richtungsweisende Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie stehen die industrielle Produktion und die Gesellschaft an einem Punkt, an dem die physische und virtuelle Welt zunehmend miteinander verschmelzen. Die Individualisierung der Produkterstellung, zunehmende Kundenorientierung sowie die Flexibilisierung der Fertigung neben globalen Trends wie der Digitalisierung unterstützen diese Entwicklung und den Einzug von Industrie 4.0 in die Fertigung. Der Prozess der betrieblichen Leistungserstellung unterliegt dabei einem disruptiven Wandel. [1], [2], [3]

Auf organisatorischer Ebene wurden in den vergangenen Jahren in zahlreichen Unternehmen Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) zur zielgerichteten Gestaltung der Prozesse einge-

führt. Der Ansatz der Ganzheitlichen Produktionssysteme versucht die unterschiedlichen Rationalisierungsansätze der Vergangenheit in einem System unter Gesichtspunkten des Lean-Managements zu kombinieren. Der Aufbau und die Struktur Ganzheitlicher Produktionssysteme ermöglichen eine geleitete Überführung von Problemstellungen zu Lösungsansätzen. Betroffene Unternehmensprozesse und verfolgte Gestaltungsprinzipien in diesen sind in Bezug auf die Problemstellung zu identifizieren und können bis hin zu Methoden und Werkzeugen zur Lösung dieser heruntergebrochen werden. Gleichzeitig dienen GPS der durchgängigen Gestaltung der Unternehmensprozesse entlang der Wertschöpfungskette zur zielgerichteten und verschwendungsarmen Produktion. Der GPS-Ansatz umfasst neben dem Produktentstehungs- und dem Auftragsabwicklungsprozess weitere Querschnittsfunktionen, bildet das gesamte Unternehmen ab und kann aufgrund der Verbreitung als organisatorischer Standard im produzierenden Gewerbe erachtet werden. Außerdem stellen GPS damit die organisatorische Basis zur Implementierung von Industrie 4.0 Elementen dar. [4], [5], [6], [7] Die Industrie 4.0 ist dabei nicht nur auf die Entwicklung und das Einführen neuer Technologien auf Produktionsebene beschränkt, sondern als Vision für das gesamte Unternehmen mit dem Ziel der Vernetzung der Unternehmensbereiche zur nachhaltigen Veränderung des Unternehmens zu erachten. Entscheidend ist dabei nicht die Technologie selbst, sondern die Prinzipien wie Traceability, Echtzeitfähigkeit oder Transparenz, die sie unterstützt sowie die Kombination und Vernetzung dieser mit weiteren Technologien oder Systemen zur Generierung von Synergieeffekten.

Die Industrie 4.0 kann als „echtzeitfähige, intelligente und digitale Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten zum Management von Unternehmensprozessen und Wertschöpfungsnetzwerken“ [8] aufgefasst werden. Einzelne Objekte werden mit Sensoren und Aktuatoren ausgestattet und werden in die Lage versetzt mit ihrer Umgebung zu kommunizieren und zu interagieren. Die Vernetzung jeglicher Gegenstände über das Internet lässt das Internet der Dinge entstehen. Das Cloud-Computing steht für die flexible sowie bedarfsangepasste Bereitstellung von IT-Ressourcen im Sinne einer Dienstleistung, ohne das dem Nutzer der Standort der in Anspruch genommenen Ressourcen bekannt ist. Die Kombination von eingebetteten Systemen, Sensoren und Aktuatoren zur Verbindung der realen und virtuellen Welt wird als Cyber-Physisches System (CPS) bezeichnet. Durch die Vernetzung der Objekte über das Internet kann eine Kommunikation in Echtzeit erfolgen. Der Mensch ist über angepasste Schnittstellen wie Bildschirme, Datenbrillen oder DMC-Reader in das System integriert. Die Kombination mehrerer CPS lässt ein Cyber-Physisches Produktionssystem entstehen und führt zu dem Aufbau einer Smart Factory. Eine lebenszyklusweite Betrachtung und Dokumentation von

Prozessen und Produkten auf Basis der Vernetzung von Produktionsmitteln, Unternehmensprozessen und bauteilbezogenen Daten ist die Folge. [9], [10]

Die Einführung von Industrie 4.0 Elementen in den organisatorischen Industriestandard der GPS und die damit einhergehende Durchdringung der Produktion mit IKT bringt viele Herausforderungen wie beispielsweise die Schnittstellenproblematik oder Akzeptanzprobleme bei den Mitarbeitern mit sich. Andererseits ergeben sich vielseitige Chancen zur Optimierung der Fertigung durch gesteigerte Transparenz, Qualitätsabsicherung und Reaktionszeiten nahezu in Echtzeit. Eine fallstudienbezogene Analyse der Wechselwirkungen zwischen Ganzheitlichen Produktionssystemen und Industrie 4.0 bestätigt diese These, wobei mit GPS ein strukturierter Ordnungsrahmen etabliert wurde, in dem die einzelnen Elemente der Industrie 4.0 wirken. Industrie 4.0 ist daher nicht als eine Revolution zur Ablösung bisheriger Systeme und Ansätze zu verstehen, sondern als eine Erweiterung dieser.

Während eine einheitliche Strukturierung für die Elemente der Industrie 4.0 fehlt, lassen sich diese dennoch nach ihrer Wirkweise clustern. Einige Elemente der Industrie 4.0 setzen direkt auf der Shopfloor-Ebene an wie beispielsweise der Einsatz von Datenbrillen oder der Bauteil-DMC. Ebenso gibt es systemische Elemente, die übergeordnet auf einer prozessualen Ebene wirken und der Datenverarbeitung im Hintergrund dienen. Zu nennen sind beispielhaft Big Data Analysen, Cloud-Dienstleistungen oder das Echtzeit-Bestandsmanagement.

Zur Gewährleistung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise, der Sicherstellung der Qualitätsanforderungen und kurzer Regelkreise zur Qualitäts- und Prozessverbesserung ist die Integration der gesamten Prozesskette als zentrales Element zu erachten. Dabei ist eine lebenszyklusweite Betrachtung über die Unternehmensgrenzen hinaus notwendig (horizontale Integration). Die Vernetzung von ERP-System und Manufacturing Execution System sowie die Anbindung weiterer Systeme über angepasste und standardisierte Schnittstellen dienen der echtzeitfähigen Vernetzung von Mensch, Maschine und System innerhalb des Unternehmens (vertikale Integration), bietet neue Möglichkeiten auf die veränderten Anforderungen der Kunden und Märkte zu reagieren und erweitert die Ansätze von Lean Production und GPS. [6]

3. Traceability als Enabler der Industrie 4.0

Die Anpassung der bestehenden Systeme und die Integration der Maschinen in die Systemlandschaft, um den skizzierten Anforderungen der Industrie 4.0 gerecht zu werden, werden bei der Martinrea Honsel Germany GmbH am Standort Meschede im Rahmen des Aufbaus einer Fertigungslinie analysiert und umgesetzt. Auf Bauteilebene wird ein DataMatrix-Code zur Identifikation eingesetzt.



Bild 1: Beispiel DMC

Dabei wird jedem Bauteil in Form des DMC eine eindeutige ID zugewiesen, mithilfe derer eine jederzeitige Identifikation des Bauteils sichergestellt wird. In Kombination mit einer Datenbank können in Echtzeit Abfragen bezüglich des Bauteilstatuses (i.O., n.i.O., Nacharbeit) und einzelner Prozessparameter durchgeführt werden. Dazu wird direkt nach dem Gießen der DMC innerhalb der Gießzelle mit Hilfe eines Lasers auf das Bauteil aufgebracht. Nach erfolgreichem Gegenlesen erfolgt die Aufnahme des Bauteil-DMC in die Datenbank sowie die Verknüpfung mit den Gießparametern und weiteren Prozessparametern wie Kühlungszeiten oder Vakuumwerten.

Automatisierte Förderbänder stellen den One-Piece-Flow zum nächsten Prozessschritt sicher. Die Prozessparameter des jeweiligen Prozessschrittes werden in eine Datenbank geschrieben und zum Datenabgleich sowie der Prozesssteuerung an den einzelnen Lesestationen innerhalb der Prozesskette genutzt. Die bauteilspezifischen Daten in der Datenbank werden fortlaufend um die Prozessparameter fertiggestellter Prozessschritte ergänzt und stellen die Historie eines Bauteils dar. Ergänzend können Bauteile anhand bestimmter Kriterien, wie beispielsweise einer Gießform oder der Spindel einer CNC-Bearbeitungsmaschine, gesondert gesteuert werden. Diese Eigenschaft ist in Anbetracht der Anzahl der integrierten Gießmaschinen und CNC-Maschinen zur Qualitätsverbesserung und sortenreinen Verpackung von zunehmender Bedeutung.

Obwohl der DataMatrix-Code in erster Linie nur eine 2D-Beschriftung auf dem Bauteil darstellt, kann er in Kombination mit Lesegeräten, Datenbanken und Aktuatoren zur umfassenden Fertigungssteuerung genutzt werden. Entscheidend ist nicht die Technologie des DMC selbst, sondern die Prinzipien wie Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Echtzeitfähigkeit, die durch den DMC adressiert werden. Die Prinzipien lassen sich nur in Kombination mit Datenbanken zur Analyse und Speicherung von Daten verfolgen und durch Maschine zu Maschine Kommunikation innerhalb der Fertigungslinie umsetzen. Dem DMC kommt dabei eine wichtige Rolle zu, da die Analysemethoden und Steuerungsdaten auf die Eindeutigkeit und direkte Zuordnung der Daten zu einem Bauteil angewiesen sind. Der DMC erfüllt diese Forderung und lässt das Bauteil zu einem Smart Object werden, dass mit der Produktionslinie und der Datenbank sowie dem Menschen über geeignete Schnittstellen, wie Monitoren, Datenbrillen oder DMC-Lesegeräten in Echtzeit kommunizieren kann.

Die Vernetzung durch die Systeme und Technologien der Industrie 4.0 in Kombination mit einer ausgereiften Technologie bietet das Potential zur Integration von Industrie 4.0 Prinzipien und Elementen in bestehende Fertigungssysteme und macht den DMC zu einem Enabler von Industrie 4.0. Vorteilhaft ist die hohe Akzeptanz der Technologie durch den fortgeschrittenen Technologiereifegrad.

Zusätzlich findet auf Basis des DMC eine Qualitätsabsicherung statt, da vor jedem Prozessschritt durch das Einlesen des DMC der jeweilige Bauteilstatus abgefragt und somit die strikte Einhaltung der Prozesskette gewährleistet wird. Das wiederholte Durchlaufen eines Prozessschrittes sowie das Überspringen wird durch das Sperren und Ausschleusen dieser Bauteile ausgeschlossen. Weiterhin stellt die Steigerung der Transparenz einen zusätzlichen Vorteil dar. Die Prozesssteuerung wird erleichtert und auf Basis des DMC sind die Bestände in Echtzeit abrufbar und können durch angepasste Visualisierung dargestellt werden. Kurzfristige Reaktionen auf Veränderungen innerhalb des Prozessflusses können nahezu in Echtzeit umgesetzt werden und die Flexibilität der betrieblichen Leistungserstellung steigt. Die Lenkung fehlerhafter Bauteile innerhalb der Prozesskette wird dokumentiert. Eine jederzeitige Rückverfolgbarkeit der Bauteile wird gewährleistet sowie eine Qualitätsabsicherung im Sinne des Null-Fehler-Prinzips angestrebt.

Durch den Einsatz eines Bauteil-DMC sowie der vertikalen und horizontalen Integration der Systeme lassen sich Qualitätsverbesserungen bei gleichzeitigen Produktivitätszuwächsen durch kurze, menschzentrierte Regelkreise realisieren. Weiterhin ist eine bauteilspezifische Steuerung im Sinne der Besonderheiten einer Losgröße 1 im Rahmen der Fließfertigung von Zylinderkurbelgehäusen möglich.

Neben der Traceability auf Bauteilebene ist sowohl ein downstream als auch upstream tracing innerhalb der Wertschöpfungskette gegeben. Der DMC kann über die einzelnen Wertschöpfungspartner hinweg für eine durchgängige Rückverfolgbarkeit genutzt werden. Der Datenrucksack des Bauteils lässt sich sukzessive erweitern und bildet die Historie ab. Weiterhin können die gewonnenen Daten durch Algorithmen sowie Mustererkennung von Big Data zu Smart Data transferiert und zur Prozessoptimierung genutzt werden.

4. Industrie 4.0 Anwendungen für die Großserienproduktion

Die Großserienproduktion von Zylinderkurbelgehäusen hebt sich durch einige Besonderheiten hervor, die auf den ersten Blick in Bezug auf die Industrie 4.0 wenig förderlich sind. Beispielsweise sei die Vision der Industrie 4.0 von der Individualisierung der Produktion bis hin zur Losgröße 1 angeführt. Kennzeichnend für die Großserienproduktion von Zylinderkurbelgehäuse ist jedoch eine sehr geringe Variantenvielfalt. Dieser Widerspruch bietet dennoch eine Chance die Vorteile der Industrie 4.0 durch Individualisierung der Produktion auf einer anderen Ebene anzuwenden. Das Ziel liegt nicht in der Fertigung nach Kundenwünschen individualisierter Bauteilvarianten, sondern in der individualisierten Steuerung eines jeden Bauteils durch den Prozess. Der Fokus liegt in der Gestaltung und Steuerung des Prozesses im Sinne des Null-Fehler-Prinzips zur Verbesserung und Absicherung der Bauteilqualität durch Integration von Industrie 4.0 Elementen und der Vernetzung von Mensch, Maschine, Bauteil und System.

An jedem Prozessschritt wird durch Einlesen des DMC eine bauteilspezifische Abfrage zu dem Artikelstatus in der Datenbank durchgeführt und mit dem jeweiligen Prozessschritt abgeglichen, ob das Bauteil für den Prozessschritt freigeschaltet ist. Weiterhin wird durch Kommunikation mit der Maschine das passende Fertigungsprogramm gewählt. Diese Vernetzung und Kommunikation der einzelnen Produktionsanlagen und Bauteile verfolgt die Dezentralität von Entscheidungen und setzt das Null-Fehler-Prinzip und das Fließprinzip, zwei Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme um. Eine Fehlbearbeitung oder Nichteinhaltung des Prozessablaufes wird ausgeschlossen und sichert damit die Qualität. Zusätzlich findet eine umfassende Dokumentation statt.

Die Traceability auf Bauteilebene fungiert als Enabler für weitere Anwendungen, die durch die Vernetzung der Anlagen über das Internet der Dinge und Dienste möglich werden. Durch die Entscheidungsdezentralität und Autonomie der Bauteile und Maschinen wird der einzelne Fertigungsauftrag befähigt, sich selbstständig durch die Prozesskette zu steuern. So kann als Beispiel ein nachgelagerter CNC-Bearbeitungsprozess in Abhängigkeit der Belegung eines Wärmebehandlungsofens die CNC-Maschinen selbstständig je nach benötigter Kapazität starten und für die Aufträge reservieren und den Menschen über die rechtzeitige Bereitstellung von Werkzeugen informieren. Die Verschmelzung von produktspezifischen Produktionslinien kann die Folge sein und durch angepasste Nivellierung der Produktion die Nutzung von Synergieeffekten sowie die ausgeglichene Auslastung von Produktionskapazitäten.

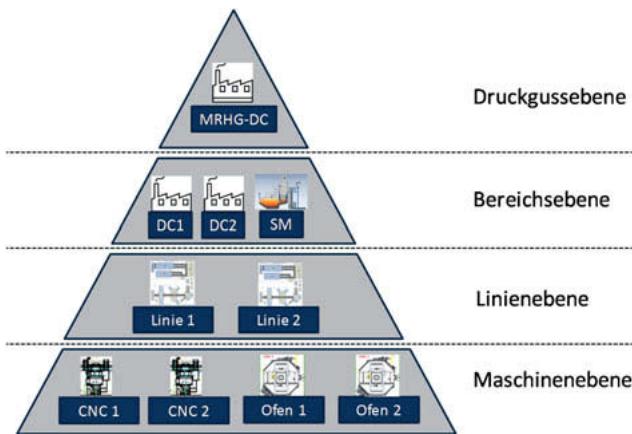


Bild 2: Digitale Fabrik

Durch die Kommunikation jeder Maschine mit dem Bauteil ist ein Echtzeit-Bestandsmanagement möglich. Die Maschine meldet einem übergeordneten System die Anwesenheit eines Bauteils, im System wird der Bauteilstatus und ein Bestand für den jeweiligen Prozessschritt

in Echtzeit gebucht. Negative Bestandsbuchungen werden durch das Erfassen der Bauteile im nächsten Prozessschritt ausgelöst. Je nach Skalierung der Betrachtungsebene lassen sich die Bestände einzelnen Maschinen, Prozessschritten oder Fertigungslien zuordnen. Weiterhin können in der Bereichsebene mehrere Linien zusammengefasst werden und letztlich in einer übergeordneten Ebene der komplette Bereich des Druckgusses im Sinne einer digitalen Fabrik abgebildet werden. Die hierarchische Struktur erlaubt je nach Zielsetzung den passenden Detaillierungsgrad der Bestände, Durchlaufzeiten und weiterer Kennzahlen darzustellen. Neben den Beständen kann auch die Leistung einer Maschine oder einer Fertigungsline durch einen Soll-Ist-Vergleich beurteilt werden. Dabei sind individuelle Kennzahlen wie die Taktzeit, die Durchlaufzeit durch die Linie oder Ausschusszahlen sowie Störungen in Echtzeit abrufbar und können in die digitale Fabrik eingebunden werden.

Linie 1 Maschine 3	Merkmal	Ist	Soll	Erfüllung
OEE 86,81 %	dynamische Leistung	79 Stück	91 Stück	86,81 % (OEE)
Störung 1: ...	Ausschuss	3 Stück	0 Stück	+3 Stück
Störung 2: ...	Durchlaufzeit (Linie)	2:23:37	2:15:00	+8:37 min
Störung 3: ...	Bestände	17	15	+ 2 Stück
Schichtleistung 79 Stück	Taktzeit	135 s	120 s	+15 s
Ø Taktzeit (10 Stück): 129 s				



Bild 3: Maschinenstatus

Da die genaue Uhrzeit erfasst wird, zu der ein Bauteil einen Prozessschritt durchläuft, lassen sich die Durchlaufzeiten bauteilspezifisch ermitteln und Zu- und Abgänge des jeweiligen Prozessschrittes, der Maschine oder der Fertigungsline im Zeitverlauf darstellen. Die prozessschrittspezifische oder maschinenspezifische Generierung von Durchlaufzeitdiagrammen zur Bestandskontrolle und Planung kann realisiert werden. Das Bestandsmanagement dient der Visualisierung und kann in Kombination mit den Durchlaufzeitdiagrammen zur Auftragsplanung und dem Variantenmanagement oder der Taktung der Fertigungsline herangezogen

werden. Durch das Durchlaufzeitdiagramm werden automatisch Kennzahlen in das Bestandsmanagement integriert, die zum Produktionscontrolling genutzt werden können. Außerdem kann die Historie eines jeden Bauteils anhand des DMC detailliert nachvollzogen und visualisiert werden.

Kunde 1 Bauteil 4	●
DMC 32547	
Status: i.O.	
LOG-Nr. 2547	
Prozessschritt: Förderband Waschanlage	





Schmelzen	Gießen	Stanzen	Ofen 1	Strahlen	CNC 1	CNC 2	Waschen	Verpacken
X	X	X	X	X	X	X		
05.11.18 09:47	05.11.18 10:43	05.11.18 11:37	05.11.18 15:48	05.11.18 17:25	05.11.18 18:49	05.11.18 21:21		
05.11.18 09:53	05.11.18 11:27		05.11.18 17:13					

Bild 4: Bauteilhistorie

Der Bauteil-DMC bietet weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Produktionsumgebung. In Kombination mit dem Einsatz einer Datenbrille können dem Mitarbeiter durch das Scannen des Bauteil-DMC mit der in der Datenbrille integrierten Kamera unterstützende Informationen zu den einzelnen Prozessschritten zur Verfügung gestellt werden. Variantenspezifische Arbeitsanweisungen können ebenso abgerufen und dargestellt werden wie durch Augmented Reality unterstützte Visualisierungen. Das manuelle Verpacken von Bauteilen kann zur Sicherstellung der variantenreinen Verpackung und gleichzeitigen Bestandserfassung durch solche Anwendungen gefördert werden. Die Datenbrille unterstützt zudem den Mitarbeiter bei Montageprozessen und kann die Montage einzelner Komponenten mit einem Bauteil dokumentieren. Eine Rückverfolgbarkeit der Einzelkomponenten wird so erreicht.

Der Bauteil-DMC bietet das Potential zur Integration von eKanban-Systemen in der Fertigung, da die Materialbereitstellung für die Folgestationen frühzeitig und durch das Bauteil bedingt ausgelöst werden kann. Nach dem erfolgreichen Absolvieren eines Arbeitsschritts kann die Maschine in Abhängigkeit der verbrauchten Materialien dieses erneut automatisiert anfordern. Weiterhin kann im Datenrucksack des Bauteils gespeichert werden, welche Materialien, Werkzeuge und Prozessparameter verwendet wurden und über diese hinterlegten Daten lassen sich Rückschlüsse zu weiteren Informationen wie Werkzeugmessberichten, Wareneingangs kontrollen oder Schnittwerten generieren. Diese Daten dienen der Qualitätsunterstützung und

können im Reklamationsfall zur Problemlösung und Prozessverbesserung herangezogen werden.

5. Fazit und Ausblick

Der durchgängige Einsatz von einem DataMatrix-Code zur Bauteilkennzeichnung in der Fertigung von Aluminium-Druckguss-Zylinderkurbelgehäusen fördert die Traceability entlang der gesamten Wertschöpfungskette und stellt einen wichtigen Meilenstein für den Einzug von Industrie 4.0 Elementen in die Fertigung dar. Revolutionären Charakter besitzt dabei die Vernetzung der Produktionsanlagen, Menschen und Systeme mit den Bauteilen über das Internet der Dinge und Dienste zu Cyber-Physischen Systemen. Die dezentrale Fertigungssteuerung und eindeutige Zuordnung von Prozessparametern zu einem Bauteil wird erst durch die durchgängige Bauteilkennzeichnung möglich. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Akteuren findet über geeignete Schnittstellen wie DMC-Leseeinheiten oder Monitore statt. Das Null-Fehler-Prinzip im Hinblick auf die Einhaltung der Prozesskette wird sichergestellt und steigert die Transparenz innerhalb des Prozesses und der Wertschöpfungskette. Der Traceability kommt in diesem Rahmen eine besondere Rolle zu, da mit dem DMC eine ausgereifte Technologie eingesetzt wird, die mithilfe neuer Entwicklungen und der Vernetzung von Mensch, Maschine und System das Potential besitzt, als Enabler für die Industrie 4.0 zu fungieren. Entscheidend sind dabei die Industrie 4.0 Prinzipien wie Traceability, Transparenz oder Echtzeitfähigkeit, die durch die Technologie adressiert werden. Erweiterungen wie das Echtzeit-Bestandsmanagement oder die Fähigkeit eines Auftrags, sich selbst durch die Fertigung zu steuern im Sinne der Losgröße 1 zeigen das Potential dieser Entwicklung auf. In Zukunft können weitere Schritte wie das Eingießen eines RFID-Tags in das Bauteil oder der Einsatz von RFID-Tags an den Schmelztiegeln die Traceability fest verankern und der Produktions- und Qualitätsverbesserung für alle Akteure im Wertschöpfungsnetzwerk zu Flexibilisierung der Produktion dienen.

- [1] Hirsch-Kreinsen, H.; Weyer, J.: Wandel von Produktionsarbeit - "Industrie 4.0". Soziologisches Arbeitspapier Nr. 38/2014. Dortmund: Technische Universität Dortmund 2014.
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Zukunft der Arbeit – Innovationen für die Arbeit von morgen. Bonn: BMBF 2016.
- [3] Dombrowski, U.; Stefanak, T.; Krenkel, P.: Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0. S. 169/190. In: Reinhart, G.: Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag 2017.
- [4] Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G.: Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag 2017.
- [5] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V.: Richtlinie 2870 - Blatt 1: Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung. Düsseldorf: Beuth Verlag 2012.
- [6] Dombrowski, U.; Richter, T.; Krenkel, P.: Wechselwirkungen von Ganzheitlichen Produktionssystemen und Industrie 4.0 – Eine Use-Case-Analyse. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Jahrg. 112 (2017) Ausgabe 6, S. 430/433.
- [7] Dombrowski, U.; Richter, T.; Krenkel, P.: Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems – a use case analysis. In: 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM 2017. Procedia Manufacturing 11 (2017) S. 1061/1068. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig - Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung 2017.
- [8] Dombrowski, U.; Richter, T.: Supplementing Lean Production Systems with Information and Communication Technologies. In: 26th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig - Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung 2016.
- [9] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.
- [10] Roth, A.: Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 – Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin: Springer-Verlag 2016.

Technologietreiber Motorsport – Qualitätssicherung von additiv-gefertigten Komponenten aus der Formel 1

G. Mäurer, N. Schott, YXLON International GmbH, Hamburg

Kurzfassung

Im Formel 1 Rennsport werden innovative Technologien erprobt, die langfristig Einzug in die Serienproduktion der Automobilindustrie halten werden. Additive Fertigung (3D-Druck) und Computertomographie (CT) ermöglichen neuartige Komponenten, die jedoch auch zuverlässig und reproduzierbar sein müssen.

Abstract

In the Formula 1 racing sports innovative technologies are being tested that will be employed in the serial production of tomorrow's automotive industry. Additive manufacturing and computer tomography (CT) enable new types of car components, however, they must be verified for reliability and reproducibility.

1. Einsatz neuer Technologien in der Formel 1

Lange Zeit wurden die Formel 1 Teams als teure Geldverschwendungsgeräte betrachtet, die zwar viel Prestige haben, deren Einfluss auf die Herstellung herkömmlicher Kraftfahrzeuge allerdings begrenzt war. Inzwischen werden im Rennstall neue Technologien erprobt, die das Potenzial haben, die gesamte Automobilproduktion zu revolutionieren.

Eine dieser Technologien ist die Additive Fertigung (auch bekannt als 3D Druck Verfahren, generative Fertigung oder e-Manufacturing). Anders als beim klassischen Druckgussverfahren werden hier die Komponenten Schicht für Schicht gedruckt. Die eingesetzten Werkstoffe reichen dabei von Kunststoffen über Metalle und Metalllegierungen bis zu Hybridmaterialien und ermöglichen eine Vielzahl neuer Eigenschaften und Designvarianten. Noch sind nicht alle Effekte bekannt und es gibt zahlreiche Untersuchungen, um das Zusammenspiel von Materialien, 3D-Druckverfahren und Werkstoff-Eigenschaften besser zu verstehen.

Das Renault Sport Formula One Team mit seinem Hauptsitz im englischen Enstone setzt beim Bau seiner Rennfahrzeuge zunehmend auf dieses neue Verfahren und entwickelt gezielt

Komponenten, deren Herstellung im Standardgussverfahren zu aufwändig oder zu teuer ist. Von 20.000 Teilen, die dort für die Renault Sport Formel 1 Fahrzeuge entwickelt werden, sind in den derzeitigen Formel 1 Boliden 60 gedruckte Teile zu finden. [1] Auch McLaren Mercedes und Ferrari experimentieren mit 3D Druckverfahren mit dem Ziel, neue Methoden und Materialien zu testen, um den Technologietransfer voranzutreiben und damit die Entwicklungszyklen ihrer Serienfertigung zu beschleunigen. [2] [3]

Jede einzelne Komponente muss einen umfangreichen Testzyklus durchlaufen, bevor sie auf der Rennstrecke zugelassen wird. Dazu gehören aufwändige Untersuchungen im Windkanal, um Eigenschaften und Leistungsfähigkeit unter Rennbedingungen zu simulieren. Zusätzlich ermöglicht die industrielle Computertomographie (CT) einen Blick ins Innere der Teile und deckt verborgene Defekte auf. Dieses zerstörungsfreie Prüfverfahren bestimmt mit hoher Präzision die Lage und Größe von Materialfehlern und erlaubt damit Rückschlüsse auf Abweichungen im Herstellungsprozess.

Im Folgenden soll anhand von drei Beispielen der Vorteil industrieller CT Untersuchungen für additiv gefertigte Formel 1 Komponenten erläutert werden. Die Teile wurden mit einem Yxlon FF 35 System (225 kV Direktstrahler) untersucht, wobei bis zu 2.600 Teilbilder (Projektionen) aufgenommen wurden. Verschiedene mathematische Algorithmen generieren auf Grundlage der Scans ein rekonstruiertes 3D Volumen, welches die inneren und äußeren Strukturen des Teils sichtbar macht und zahlreiche Analysen und Auswertungen ermöglicht.

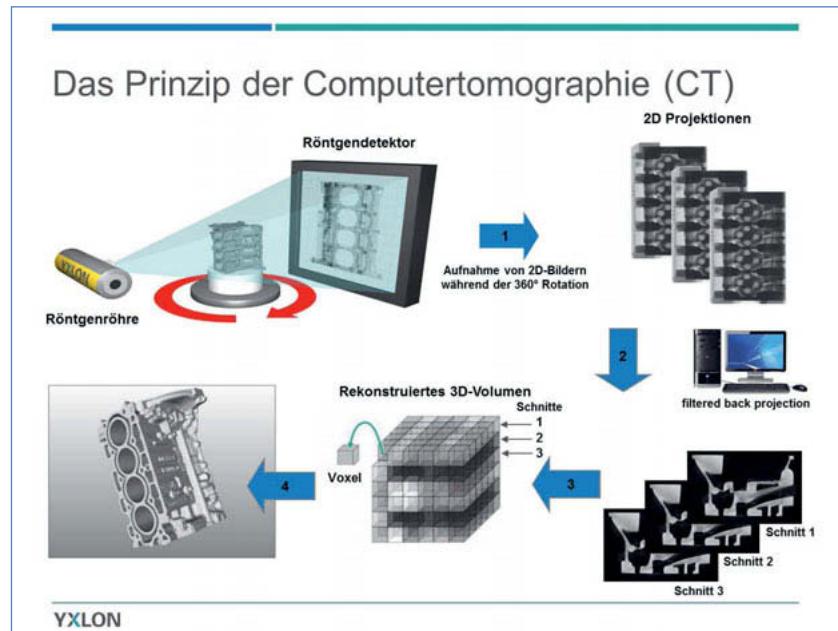


Bild 1: Das Prinzip der Computertomographie (CT)

2. CT Untersuchung von Rissen

Beispiel 1 – Ölpumpengehäuse. Dies ist ein 3D gedrucktes Bauteil aus Aluminium mit einer schwarz eloxierten Schutzschicht.



Bild 1: Ölumpengehäuse aus Aluminium (3D gedruckt mit schwarz eloxierter Oberfläche), das Teil scheint i.O.

Der Korrosionsschutz wurde durch anodische Oxidation (Eloxal Verfahren) aufgebracht, um eine sehr harte und kratzfeste Oberfläche für einen Einsatz in stark belasteten Bereichen zu erhalten. Von außen scheint das Teil i.O. Die CT-Prüfung fand jedoch zwei Risse, die aufgrund der Beschichtung nicht zu sehen waren. Risse sind unerwünschte Phänomene, da sie bei starker Belastung zur Sollbruchstelle werden. Gerade beim Durchfluss von Flüssigkeiten unter hohem Druck (z.B. Öl) stellt dies eine Gefahr dar, weshalb das Teil aussortiert wurde.

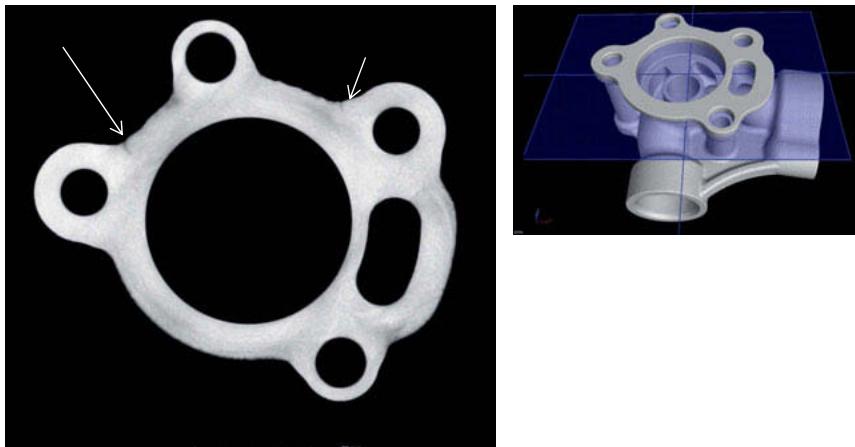


Bild 2 und 3: Ölpumpengehäuse aus Aluminium – am PC rekonstruiertes Bild mit virtueller Schnittachse durch das Bauteil. Zwei Risse werden unter der Beschichtung sichtbar.

3. CT Untersuchungen für die Poren- und Einschlusssanalyse

Beispiel 2 – Luft-Einlass-Diffusor

Auch bei der Materialentwicklung liefern CT- Untersuchungen wertvolle Hinweise, die Rückschlüsse auf das Materialverhalten zulassen. Das Bauteil im Bild 4 steuert die Luftzuführung vor dem Motor und erzeugt dabei eine spezifische Verwirbelung des Luftstroms vor Eintritt in den Motor, um ein optimales Benzin-Luft Gemisch zu schaffen. Die beiden gezeigten Komponenten bestehen aus hitzebeständigem Polyamid und unterscheiden sich voneinander durch die Beigabe von Partikeln mit unterschiedlichen Materialkennwerten. Das Ziel war es, mit diesen verschiedenen Kunststoffmischungen und dem gleichen Verfahren identische Bauteile zu drucken.



Bild 4: Luft-Einlass-Diffusor hergestellt aus zwei verschiedenen Kunststoffarten mit demselben 3D Druckverfahren.

In beiden Bauteilen wurden Porositäten und Einschlüsse untersucht. Bild 5 und 6 zeigen die Ergebnisse des linken Diffusors (Ansicht von oben, Ansicht von der Seite). Eine große Pore mit einem Volumen von $1,1 \text{ mm}^3$ fällt hier auf, sie wird in beiden Ansichten farblich in rot angezeigt.

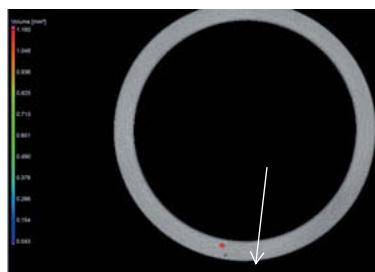


Bild 5: Diffusor links – Ansicht von oben
Darstellung einer Pore

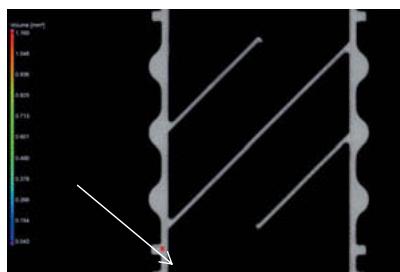


Bild 6: Diffusor links – virtueller Schnitt
durch das Teil Seitenansicht - Darstel-
lung einer Pore

Insgesamt sind im linken Teil fünf verschiedene große Poren zu finden. Bild 7 zeigt die Lage und Größe der Poren in der 3D Darstellung. Die Poren sind nach Größe farblich kodiert und bewegen sich in einer Größenordnung von 0,04 (dunkelblau) bis $1,1 \text{ mm}^3$ (rot).

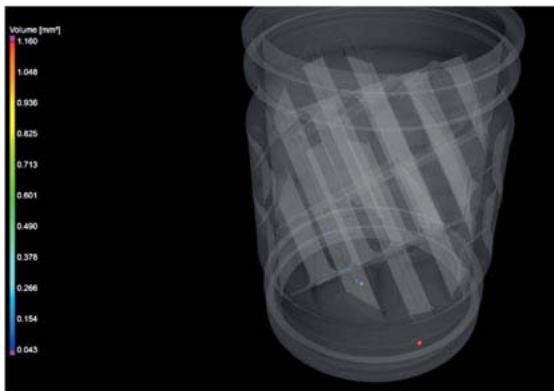


Bild 7: In der 3D Rekonstruktion wird das Volumen farbkodiert gemäß der Skala dargestellt.

Bild 8 und 9 zeigen den Luft-Einlass-Diffusor rechts im Bild. Hier finden sich keine Poren, stattdessen wird eine Vielzahl von Einschlüssen erkennbar, sowohl in der Draufsicht als auch in der seitlichen Ansicht. Diese Einschlüsse sind im gesamten Material relativ gleichmäßig verteilt, sowohl in den inneren als auch äußeren Strukturen. Es konnten drei Klassen von Partikelgrößen gefunden werden: grün: $0.034 - 0.087 \text{ mm}^3$, blau: $0.114 - 0.194 \text{ mm}^3$ und rot: $0.22 - 0.3 \text{ mm}^3$. Bild 10 zeigt die Verteilung der Einschlüsse im gesamten Bauteil. Bei den Einschlüssen handelt es sich ein Material mit höherer Dichte, höchstwahrscheinlich um Kohlenstoff zur Verstärkung der Festigkeit.

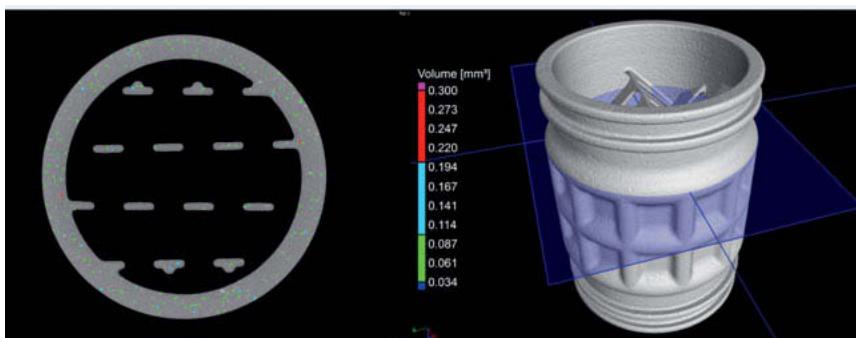


Bild 8: Luft-Einlass-Diffusor rechts – virtueller Querschnitt durch das Bauteil in horizontaler Ebene: Verteilung von Einschlüssen. Die Größe der Partikel ist farblich gekennzeichnet – grün: $0.034 - 0.087 \text{ mm}$, blau: $0.114 - 0.194 \text{ mm}$, rot: $0.22 - 0.3 \text{ mm}$

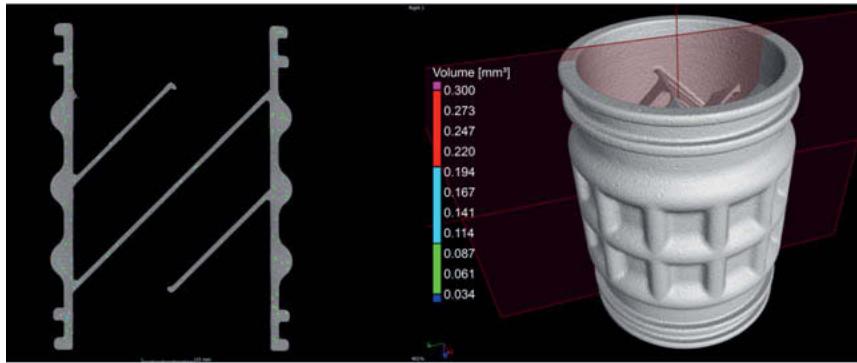


Bild 9: Diffusor rechts – virtueller Schnitt durch das Teil in vertikaler Ebene - Verteilung von Einschlüssen im Bauteil und Klassifizierung der Partikelgröße mit Farben

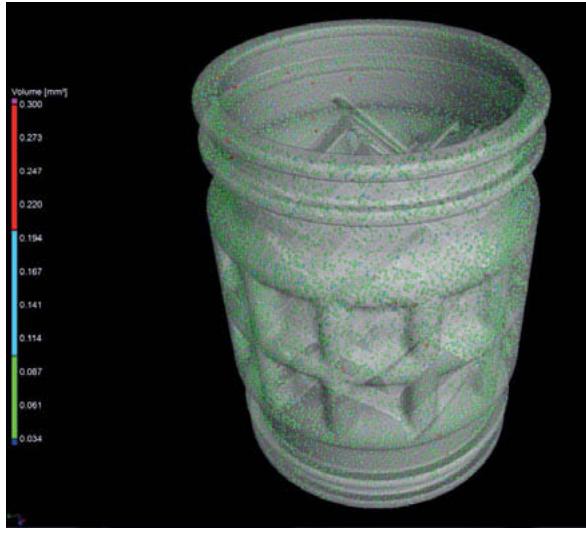


Bild 10: Die Einschlüsse sind über das gesamte Bauteil verteilt

4. CT-Analysen für Soll-Ist Vergleich

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung additiv gefertigter Teile bietet die CT Analyse mit dem Soll-Ist Vergleich. Dabei werden die Geometrien des Norm- und des Prüfteils übereinander gelegt und verglichen, wobei auch eine CAD-Konstruktionszeichnung als Norm eingelesen werden kann. Ziel ist der Nachweis, ob die Komponenten innerhalb der Toleranz produziert wurden und an welchen Stellen im Bauteil es Abweichungen gibt. Im konkreten Fall wurden die virtuellen Scans der beiden gedruckten Teilen übereinander gelegt. Bild 11 veranschaulicht sehr klar die Abweichungen zwischen ihnen. Bereiche mit violetter Farbgebung stehen für eine Abweichung von $>0,3$ mm. Grüne Bereiche dagegen liegen innerhalb der Toleranzgrenze. Damit bietet die CT zusätzliche Informationen zur Reproduzierbarkeit von identischen Teilen und kann Abweichungen von Normvorgaben leicht nachweisen. Dies trifft sowohl auf äußere als auch auf innere Strukturen im Bauteil zu.

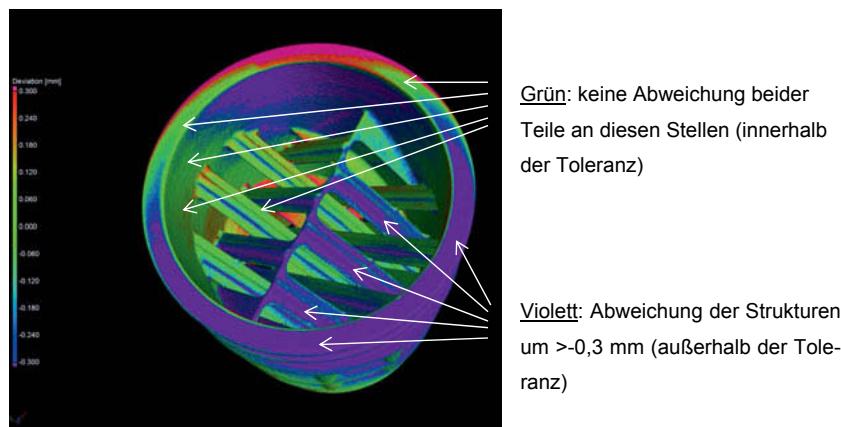


Bild 11: Luft-Einlass-Diffusor, virtueller Vergleich von zwei identischen Bauteilen auf Basis einer CT-Rekonstruktion. Violett und rot: Abweichung von $>0,3$ mm. Grüne Bereiche: ohne Abweichung.

5. CT Analyse für die Messung von Wandstärken

Beispiel 3 – additiv-hergestellte Hydraulikkomponente aus Titan



Bild 12: Additiv-hergestellte Hydraulikkomponente aus Titan

In diesem Beispiel geht es darum, die Wandstärken an verschiedenen Stellen innerhalb des Bauteils zu prüfen. Die Rohre in Längsrichtung weisen eine gleichmäßige Wandstärke auf (Bilder 13 und 14). Grün im CT-Bild bedeutet, dass die gewünschte Wandstärke erreicht wurde. Abweichungen gibt es dagegen im Bereich der Rundungen, sie betragen $+/-0,075$ mm bis $+/-0,1$ mm und sind rot und violett gekennzeichnet (Bild 15 und 16). Auch fällt auf, dass der Rohr-Durchmesser in diesem Teilbereich nicht ebenmäßig rund ist, was auf einen Prozessfehler bei der Herstellung hindeuten kann.

Unregelmäßigkeiten im Rohrdurchmesser können einen Einfluß auf das Fließ- und Strömungsverhalten im gesamten Teil haben. Extrem dünne Wandstärken (violett im Bild 16) können zusätzlich ein Hinweis auf eine mögliche Schadensstelle sein, die entsteht, wenn das Material zu großem Druck oder anderen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Als Folge können Risse aufgrund von Materialermüdung entstehen. Vertiefende Untersuchungen sind sicherlich notwendig, um diese Schlüsse zu verifizieren.

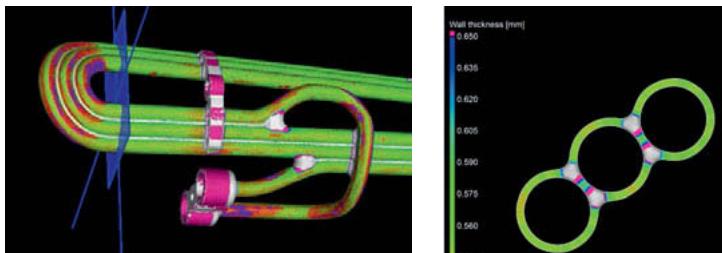


Bild 13 und 14: CT-Schnittbild der Hydraulik-Komponente – die Rohre in Längsrichtung sind ebenmäßig rund, die Wandstärken liegen im Toleranzbereich (farblich grün dargestellt)

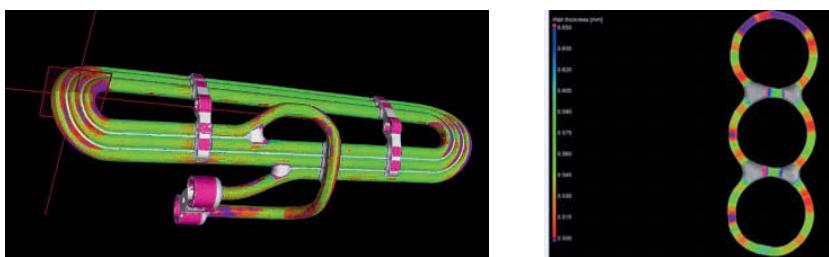


Bild 15 und 16: CT-Schnittbild durch die Rohrrundung. Die Wandstärke ist an einigen Stellen ungleichmäßig, es entstehen Abweichungen von +/- 0,075 mm bis +/- 0,1 mm. Der Rohr-Durchmesser ist nicht ebenmäßig rund.

6. Fazit

Die Additive Fertigung in der Formel 1 bringt viele neue Anwendungen hervor, mit denen sich Zeit und Kosten sparen lassen und die gleichzeitig neue Designs ermöglichen, welche mit Standardgussverfahren schwer oder gar nicht herzustellen sind. Zum Labor der Zukunft gehört aber auch eine zuverlässige Qualitätskontrolle, die sicherstellt, dass die gedruckten Teile schadensfrei sind und sie die gewünschten Parameter erreichen. CT-Untersuchungen können Fehler visualisieren und vermessen, sie erlauben Rückschlüsse auf das genutzte Verfahren und weisen auf mögliche Unsicherheiten im Druckprozess hin. Damit tragen sie zur Entwicklung leistungsstarker, reproduzierbarer Komponenten im Motorsport bei. Bei der

Überführung der additiven Fertigung in die Serienfertigung sollte die Qualitätskontrolle daher immer mitberücksichtigt werden.

- [1] <https://www.3dnatives.com/de/additive-fertigung-formel-1-250920171/>, 27.11.2018
- [2] <https://www.mclaren.com/formula1/partners/stratasys/mclaren-deploys-stratasys-additive-manufacturing-improve-2017-car-performance/>, 27.11.2018
- [3] <https://www.3dprintingmedia.network/ferrari-f1-additive-manufacturing-renishaw/>, 27.11.2018

Danksagung:

Wir danken unserem Partner Renault Sport Formula One Team für die Bereitstellung der Originalteile und die Unterstützung für diesen Beitrag.

Das intelligent agierende Werkzeug

Sensorik und Aktorik im modernen Werkzeug für eine flexible Produktion

Autonomous foundry tools

Sensors and actuators in modern foundry tools for a flexible production

Wirt.-Ing. **Jan Titze**, Ma. Sc., **Reiner Brühl**,

KRÄMER+GREBE GmbH & Co. KG, Biedenkopf-Wallau

Kurzfassung

Der Gießprozess ist sehr komplex und von diversen Einflussgrößen abhängig. Moderne Gießmaschinen erlauben bereits, viele Parameter zu erfassen und zu steuern. Was jedoch genau im Werkzeug geschieht und ob die Parameter dort wie vorgegeben ankommen, bleibt zum großen Teil im Verborgenen. Stattet man moderne Werkzeuge mit zusätzlicher Sensorik aus und integriert ein Datenmanagementsystem, wird dieser blinde Fleck entfernt. So können Prozessparameter im Werkzeug erfasst und mit den Vorgabewerten abgeglichen werden. Die Lücke in der Datenerfassung während des Gießprozesses wird geschlossen, wodurch gezieltere Diagnosen erstellt und Rückschlüsse gezogen werden können. Der Gießprozess wird transparenter und kann optimiert werden. Fehlerursachenuntersuchungen können beschleunigt und die Prozessqualität so weit verbessert werden, dass Taktzeiten verkürzt werden. Wird zudem Aktorik im Werkzeug eingesetzt, können bestimmte Parameter gezielt beeinflusst werden, um den Gießprozess flexibel zu steuern und weiter zu optimieren.

Abstract

The casting process is complex and influenced by various parameters. A lot of parameters are already monitored and regulated by modern casting machines, but it remains hidden if these parameters are stable within the tool. Integrating additional sensors in tools in combination with a communication system will close this information gap. The casting process becomes transparent and can be optimized. In combination with actuators, individual parameters can automatically be manipulated during the process. This will lead to autonomous foundry tools and a flexible production.

1. Einleitung

Intelligent agierende Werkzeuge in der Gießerei der Zukunft oder Gießerei „4.0“ - der Begriff „Industrie 4.0“ wurde durch eine gleichnamige Initiative, die den Übergang der deutschen Industrie in die vierte industrielle Revolution sicherstellen soll, geprägt. (VDI 2011) Treibende Kraft ist dabei eine umfassende vertikale und horizontale Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette. Inspiriert durch das Konzept „Internet of Things“ sollen nicht nur Menschen, sondern auch Objekte (z.B. Produkte und Maschinen) mit- und untereinander kommunizieren. Produkte werden befähigt, entlang ihrer Produktion und darüber hinaus, mit ihrer Umwelt zu kommunizieren. Zielvorstellung ist, dass der Rohling eines Produkts selbst „*sagt wie er in den einzelnen Fertigungsschritten bearbeitet werden muss*“ (ebd.), um möglichst effizient gefertigt werden zu können. Für eine flexible Produktion muss automatisiert auf wechselnde Anforderungen und Ereignisse reagiert werden können. Dazu ist allerdings auch ein Verständnis dessen unabdingbar, weshalb und wann wechselnde Anforderungen und Ereignisse auftreten. (FIR RWTH Aachen)

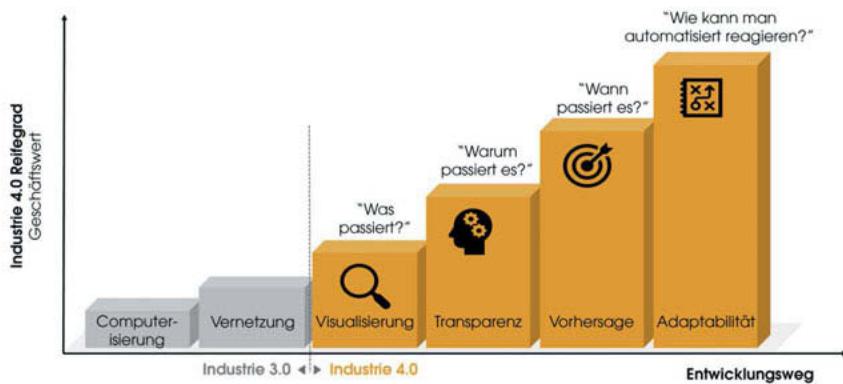


Bild 1: Reifegrade der Industrie 4.0 (vgl. FIR RWTH Aachen)

Im Spezialfall der Gießerei, in dem der Rohling aus Schmelze besteht, scheint ein Kommunikationsprozess schwer vorstellbar, was den mangelnden Fortschritt von Gießereien im Rahmen der Industrie 4.0 durchaus begründen mag. Um mit dem Produktrohling kommunizieren zu können, muss an der richtigen Stelle zugehört werden. Herzstück des Gießprozess bildet

das Werkzeug, denn hier erhält das Produkt seine Form und wesentlichen Eigenschaften. Daher sollte direkt am Werkzeug selbst angesetzt werden, um eine Kommunikation mit dem Produktrohling zu erreichen. Das Werkzeug muss zum Dolmetscher werden.

2. Das Werkzeug als Dolmetscher

Der Gießprozess besitzt zahlreiche Stell- und Störgrößen. Gegenwärtig werden bereits sehr viele Daten entlang des Prozesses erfasst. Je weiter man jedoch vom Bauteilrohling entfernt zuhört, desto größer wird das Rauschen in der Kommunikation, da sich verschiedene Einflussfaktoren vermischen und Ursachen für unterschiedliche Ereignisse nicht eindeutig zuweisbar sind. Folglich bedarf es weiterer Sensoren direkt im Werkzeug, um die Unschärfe zu reduzieren. Das bedeutet jedoch nicht, dass die vorhandenen Daten irrelevant wären. Benötigt werden lediglich weitere relevante Daten, um die vorhandenen besser zu verifizieren und zu verstehen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Datenerfassung im Werkzeug. So können etwa Maßabweichungen und Verschleiß gemessen und Zeiten, Kräfte und Durchflüsse erfasst und verglichen werden. Auch können Temperatur und akustische sowie optische Muster aufgezeichnet und überwacht werden. Diese Technologien existieren und können im Werkzeug verbaut werden. Das Problem besteht nicht darin diese Daten zu erfassen, sondern vielmehr darin herauszufinden, welche Daten an welcher Stelle relevant sind und in welcher Beziehung sie zueinanderstehen.

Zunächst müssen die nötigen Rahmenbedingungen im Datenfluss und in der Kommunikation geschaffen werden, um die erfassten Daten verstehen und zielgerichtet einsetzen zu können. Der Kreislauf des Datenflusses muss um das Werkzeug geschlossen sein und alle Daten müssen entlang des gesamten Lebenszyklus des Werkzeuges erfasst werden. Dabei muss jede Änderung am Werkzeug selbst „reportet“ werden, wobei Gieß- und Werkzeugexperten kontinuierlich die erfassten Daten auswerten und AI-gestützt Hypothesen über Verschleiß- und Prozessqualitätsthemen ableiten. Diese Hypothesen müssen dann gezielt getestet und verifiziert werden.

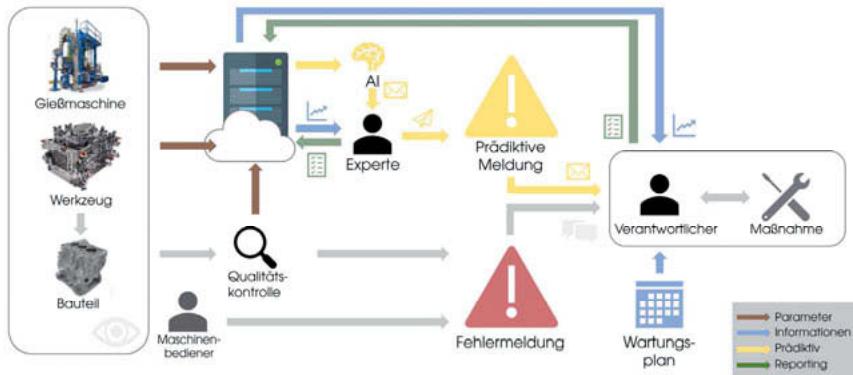


Bild 2: Datenfluss- und Kommunikationslogik (Vgl. Titze 2018)

Relevante Daten können so gebündelt auf einer Plattform angezeigt und der Zustand sowie der Lebenslauf des Werkzeuges visualisiert werden. Dadurch ist gewährleistet, dass verschiedene Entscheidungsträger entlang der Wertschöpfungskette miteinander kommunizieren und ihr Wissen gebündelt und an der richtigen Stelle einbringen.

Es wird transparenter, weshalb bestimmte Ereignisse eintreten und Fehler können schneller identifiziert und behoben werden. Erfahrung und Wissen werden zusammengeführt und bleiben erhalten, wodurch ähnliche Fehler zukünftig vermieden und Prozesse optimiert werden. Verschleiß und Fehler werden frühzeitig erkannt, was ermöglicht, geeignete Maßnahmen einzuleiten. Damit werden auch Wartungspläne flexibel und Wartungszyklen verlängerbar.

Gegenwärtig zeigen sich bereits einige Potentiale im datenbasierten Werkzeugmanagement, die eine automatisierte Reaktion auf Ereignisse ermöglichen. (Titze 2018) Um jedoch auch automatisiert auf wechselnde Anforderungen reagieren zu können, muss schneller und unmittelbar am Prozess eingegriffen werden.

3. Das intelligent agierende Werkzeug

Sobald das Werkzeug als Dolmetscher genutzt und dem Bauteilrohling Gehör verschafft wird, ist es in Kombination mit der Datenfluss- und Kommunikationslogik möglich zu verstehen, warum bestimmte Ereignisse eintreten und warum wechselnde Anforderungen des Bauteilrohlings entlang des Prozesses auftreten. Um auf diese wechselnden Anforderungen automatisiert zu reagieren, können Prozessparameter der Gießmaschine bei jedem Abguss variabel

angepasst werden. Dabei kann mithilfe vorhandener oder nachgerüsteter Aktorik im Werkzeug anforderungsgerecht und gezielt Einfluss auf den Prozess genommen werden.

Werkzeugkonstruktionen können Optimierungsproblemen unterliegen. Verbessert man eine Eigenschaft durch eine konstruktive Maßnahme, so können andere Werkzeugeigenschaften negativ beeinflusst werden. Man sucht den optimalen Kompromiss sich gegenseitig beeinflussender Konstruktionsmaßnahmen. Aktorik kann hier gezielt eingesetzt werden, um diese konstruktiven Maßnahmen nur zu bestimmten Zeitpunkten im Prozess wirken zu lassen. Die Nebeneffekte der Optimierung einer bestimmten Eigenschaft treten dadurch nur dann auf, wenn sie den gesamten Prozess nicht negativ beeinflussen.

Am Beispiel der Kernherstellung zeigt sich, dass während der Aushärtung von Kernen der Entlüftungsquerschnitt mit einer Aktorik verändert werden kann, um das Aushärten zu beschleunigen. Während des restlichen Prozesses bleiben die Entlüftungsquerschnitte unverändert und haben keinen negativen Einfluss auf die Kernbefüllung.

Werden die Themen Sensorik und Aktorik zusammengeführt, so könnte der Entlüftungsquerschnitt beliebig verändert werden, je nachdem welche Anforderungen durch die Sensoren detektiert wurden. Die Aushärtung könnte so bei jedem Bauteilrohling individuell optimiert werden, wodurch auch grundsätzlich schnellere Taktzeiten möglich wären. Bei Bedarf könnte die Entlüftungszeit aber auch verlängert werden, um Kernbrüche und Ausschuss zu vermeiden. Dieses Gedankenexperiment lässt sich auf den gesamten Gießprozess übertragen, indem einzelne Prozessparameter individuell bei jedem Bauteilrohling angepasst würden. So könnten bei jedem Abguss die kürzeste Taktzeit erreicht und Qualitätsanforderungen eingehalten werden.

- [1] VDI Nachrichten, Nr. 13-2011 Seite 2 VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2015,
www.vdi-nachrichten.com
- [2] FIR RWTH Aachen
- [3] Jan Titze, Fachvortrag „Datenbasiertes Werkzeugmanagement“, Hanser Tagung „Leichtbau in Guss 2018 - Lösungen zur Effizienzsteigerung in der Wertschöpfungskette“, 06. - 07. November 2018 in Bad Gögging, <https://www.hanser-tagungen.de>

Gießen von Al-Zylinderkurbelgehäusen – Herausforderung Zylinderlauffläche

Prof. Dr. **Franz Josef Feikus**, Dr. **Leopold Kniewallner**,
Nemak Europe GmbH, Frankfurt am Main;
Dr. **Thomas Frederik Linke**, Nemak Dillingen GmbH;
Mariusz Lewandowski, Bartłomiej Dybowski, Nemak Poland Sp.z.o.o.

Kurzfassung

Die Ablösung des Fahrzyklus NEFZ durch den WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) zur Ermittlung der Abgasemissionen hat die Anforderungen an die Motortechnik noch einmal deutlich verschärft. Mit dem 1. September 2018 erfolgt die Typgenehmigung zur Zulassung neuer PKW nach diesem Verfahren. Um die Emissionsziele (Flottenverbrauch) zukünftig sicher einhalten zu können, werden die Anteile der hybriden Antriebe aus Verbrennungsmotor mit E-Maschine steigen. Die Umsetzung der Leichtbauziele bleibt dabei eine unumkehrbare Forderung.

Das Zylinderkurbelgehäuse als zentrale Komponente des Verbrennungsmotors und Bestandteil eines hybriden Antriebs behält weiterhin seine hohe Bedeutung zur Realisierung dieser Ziele. Um eine Akzeptanz der hybriden Antriebe beim Endkunden zu erreichen besteht ein hoher Druck neben den anspruchsvollen technischen Anforderungen die Kosten in der Fertigung deutlich zu reduzieren.

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie in den unterschiedlichen Al-Gießverfahren (vakuumunterstützter Druckguss, Rotacast-Kokillenguss und CPS-Kernpaket-Sandguss) konsequent und erfolgreich eine technische Umsetzung realisiert worden ist, ohne den Aspekt der Kostenminimierung aus dem Auge zu verlieren. Dabei wurden alle wesentlichen Schritte in der Fertigungskette analysiert und in die Entwicklung einbezogen:

- Metalleinsatz mit Schmelzen und Schmelzereinigung,
- Gießprozess,
- Wärmebehandlung,
- mechanische Bearbeitung.

Die Zylinderlaufbahn als Reibpartner für Kolbenring und Kolben sowie als Teil des Verbrennungsraums hat dabei naturgemäß einen maßgeblichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Minimale Stegbreiten realisiert durch thermisch gefügte Buchsen oder thermische

Spritzverfahren stehen im Wettbewerb mit eingegossenen Linern. Der Beitrag zeigt auf, wie die Gussteilherstellung und Laufflächengestaltung die Umsetzung der teilweise divergierenden Ziele Gewichtsoptimierung, Emissionsverhalten und Kostenreduzierung steuern kann.

1. Einleitung

Die Ablösung des Fahrzyklus NEFZ durch den WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) zur Ermittlung der Abgasemissionen hat die Anforderungen an die Motortechnik noch einmal deutlich verschärft. Seit dem 1. September 2018 erfolgt die Typgenehmigung zur Zulassung neuer PKW nach diesem Verfahren. Aufgrund der im WLTP Zyklus dem praktischen Fahrzeugbetrieb näheren Betriebsbedingungen steigen die ausgewiesenen Kraftstoffverbräuche und damit die CO₂-Emissionen. Um aber die aktuellen und zukünftig noch weiter abgesenkten Emissionsziele (Flottenverbrauch) sicher einhalten zu können, sind erhebliche Entwicklungsleistungen erforderlich um die Effizienz der Antriebe weiter zu steigen. Ungeachtet der Bemühungen um die Effizienzsteigerung der Verbrennungsmotoren werden die Anteile der hybriden Antriebe (Verbrennungsmotor mit E-Maschine) steigen müssen. Die reinen Verbrennungsmotoren stoßen an technisch, physikalische Grenzen, die nicht weiter unterschritten werden können. Um eine Akzeptanz der hybriden Antriebe beim Endkunden zu erreichen, besteht ein hoher Druck neben den anspruchsvollen technischen Anforderungen die Kosten in der Fertigung deutlich zu reduzieren.

Die Umsetzung der Leichtbauziele bleibt zudem eine unumkehrbare bedingungslose Forderung insbesondere die Reduzierung der Massen für die Antriebskomponenten. Das gilt unabhängig davon, ob das Fahrzeug mit einem reinen Verbrennungsmotor, hybrid (Verbrennungsmotor plus E-Maschine) oder rein elektrisch angetrieben wird. Das Zylinderkurbelgehäuse im Verbrennungsmotor als zentrale und gleichzeitig schwerste Einzelkomponente, die auch zukünftig in allen hybriden Antrieben Bestandteil sein wird, behält damit seine hohe Bedeutung zur Realisierung der Emissionsziele.

2. Gießverfahren zur Herstellung von Al-Zylinderkurbelgehäusen

Für die Herstellung von Zylinderkurbelgehäusen in großen Serien werden unterschiedliche Gießverfahren eingesetzt. Die Wahl des am besten geeigneten Verfahrens lässt sich nur unter Abwägung vielfältiger Kriterien treffen. Von entscheidender Bedeutung sind:

- Anforderungen an die spezifischen Festigkeiten (statisch, zyklisch, thermomechanische Ermüdung)
- Funktionsintegration
- Laufbahngestaltung
- Stückzahl
- Bauteilkosten

Damit ergibt sich eine breite Entscheidungsmatrix, die in der Regel nur durch eine intensive Abstimmung zwischen Motorkonstruktion/ Berechnung einerseits und der Gießfertigung/ Gussteilauslegung sowie der ZKG-Endbearbeitung andererseits erfolgt und final entschieden wird.

Als Gießverfahren kommen bevorzugt das vakuumunterstützte Druckgießen, das Kernpaket-Sandgießverfahren (CPS) sowie für besondere Stückzahlszenarien und mechanische Eigenschaften das Rotacast-Verfahren und der Niederdruck-Kokillenguss zum Einsatz. Um die Anforderungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften insbesondere auch über gesamte Lebensdauer im Fahrzeug sicherzustellen, gilt es die Gussteilqualität auf ein höchstes Niveau zu bringen.

Systematische Analysen der Produktqualität haben aufgezeigt, dass dem Einsatzmaterial der Al-Gusslegierung, dem Schmelzprozess sowie der Schmelzereinigungsbehandlung eine entscheidende Bedeutung zukommen. In allen Gießereien der Nemak wird für alle eingesetzten Gießverfahren das Verhältnis aus Al-Blockmetall, Al-Flüssigmetalleinsatz, innerbetrieblicher Kreislauf in fest vorgegebenen Grenzen gefahren. Hauptfaktor ist hier der Keimzustand der Aluminium-Gusslegierungsschmelzen, der maßgeblich durch die Metallherkunft und Behandlung beeinflusst wird. Überlagert durch weitere in der Schmelze enthaltene nichtmetallische Bestandteile wird das Erstarrungsverhalten und damit die Entstehung von Poren und Speisungsdefiziten bestimmt. Nach dem eng kontrollierten Schmelzprozess erfolgt ebenfalls in allen Gießereien eine Schmelzereinigung über eine Spülgasbehandlung (Rotor-Impeller). Damit wird der Wasserstoffgehalt der Schmelze sowie der Anteil nichtmetallischer Bestandteile auf ein kontrolliertes Minimum eingestellt, wodurch insbesondere im zyklischen Festigkeitsverhalten und in der Zugfestigkeit Spitzenwerte erreichen werden. Für das CPS- und Rotacast-Verfahren wurde bereits über die erreichten Eigenschaften berichtet [1,2]. Besonders hervorzuheben ist die für beide Verfahren hochentwickelte Anschnitt- und Speisungstechnik mit dem gezielten Einsatz einer lokal verstärkten Wärmeabfuhr im Kern-

paketsandgießverfahrens-Verfahren (CPS-Verfahren), Bild 1, bzw. der Heranführung von Speiservolumina zum Ausgleich der Volumenschwindung bei der Erstarrung in die Mitte der Zylinderkurbelgehäuse, Bild 2.

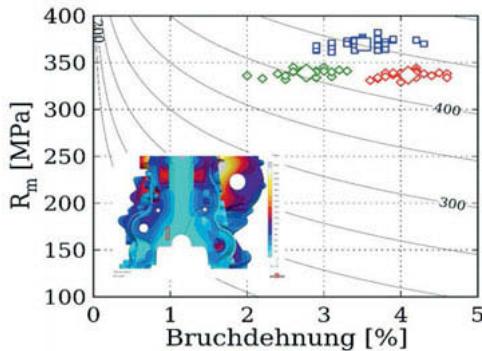


Bild 1: Steigerung der Festigkeit von ZKG im CPS-Verfahren durch den gezielten Einsatz von Kühleisen zur Ausrichtung der Erstarrung vom hochbelasteten Innenbereich nach außen, mit denen minimale Porenanteile erreicht werden. Die durchgezogenen Linien stellen die Isolinien für den Qualitätsindex ($Q = R_m + 150 \cdot \log(A)$) dar.

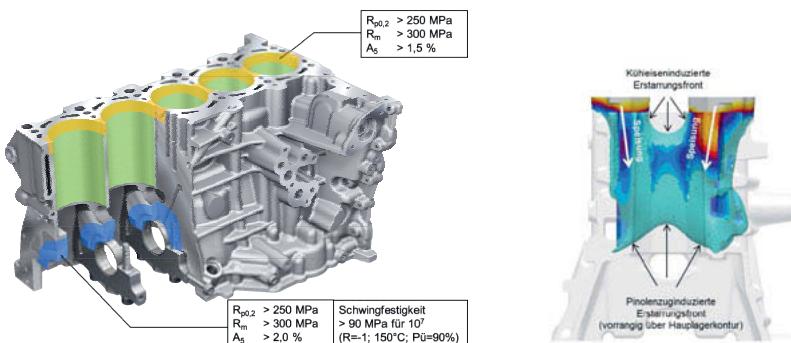


Bild 2: Steigerung der Festigkeit von ZKG im Rotacast-Verfahren durch Einführung von Speisungswege in die Bauteilmitte bei gleichzeitig erhöhter Abkühlrate im Lagerstuhl.

Im Druckgießverfahren wurden die Maßnahmen im Bereich des Materialeinsatzes und der Schmelztechnik sowie Schmelzereinigung konsequent umgesetzt mit deutlichen Verbesserungen insbesondere in den Schwingfestigkeitskennwerten (High-Cycle-Fatigue – HCF), Bild 3.

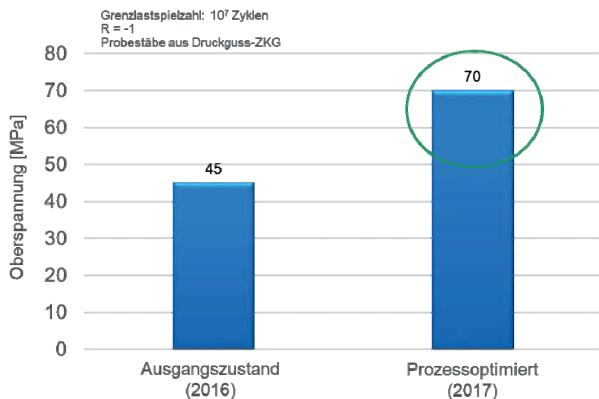


Bild 3: Steigerung der zyklischen Festigkeiten DG-Zylinderkurbelgehäusen (Lagerstuhl-Proben) aus der Legierung AlSi9Cu3(Fe), T5-wärmebehandelt, durch Prozessoptimierungen (Materialeinsatz/ Schmelzen/ Schmelzereinigung)

Weitere Steuergröße zum Erreichen maximaler Festigkeiten ist die Einstellung der Legierungszusammensetzung. Es hat sich gezeigt, dass die in der Gusslegierungsnorm EN 1706 vorgegebenen chemischen Zusammensetzungen für die in erster Linie eingesetzten Gusslegierungen ein Optimierungspotenzial besitzen, wenn die Hauptlegierungselemente in enger gesetzten Gehalten eingestellt werden. Das wird bereits seit einigen Jahren im Kernpaketverfahren für die AlSi8Cu3 praktiziert. Deutliche Steigerungen in der 0,2% Dehngrenze wurden im Druckguss durch Anpassung der Elemente Silicium und Kupfer innerhalb der Legierungsspanne für die AlSi9Cu3(Fe) an Zylinderkurbelgehäusen erzielt, Bild 4a/b. Die Werte gelten für den T5-Wärmebehandlungszustand.

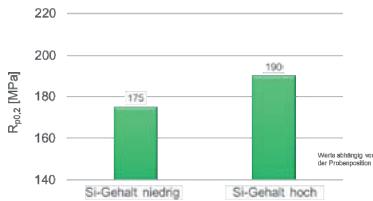


Bild 4a: Einfluss eines erhöhten Si-Gehalts innerhalb der Legierungsgrenzen der Al-Si9Cu3(Fe) auf die 0,2% Dehngrenze

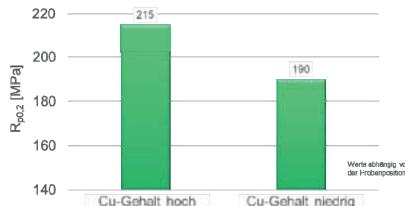


Bild 4b: Einfluss eines erhöhten Cu-Gehalts innerhalb der Legierungsgrenzen der Al-Si9Cu3(Fe) auf die 0,2% Dehngrenze

Damit ergeben sich für die Konstrukteure deutlich verbesserte Möglichkeiten bei auf Leistungssteigerungen reagieren zu können ohne Querschnitte und damit die ZKG-Massen erhöhen zu müssen oder bei gleicher Motorleistung Gewichtseinsparungen umsetzen zu können. Zahlreiche zuletzt in Serie gebrachte Motorblöcke aus Aluminium-Gusslegierungen lassen sich als Beispiel dafür anführen.

3. Gestaltung der Zylinderlauffläche

Für die Zylinderlauffläche in Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen haben sich die thermisch gespritzten Laufbahnen, thermisch gefügte sowie eingegossene GJL-Liner in den neuen Motorenenerationen durchgesetzt. Die Auswahl der Laufbahntechnologie wird bestimmt durch die Gesamtkosten des Systems (Zylinderlaufbahn, Kolbenring, Kolben), den verfügbaren Bauraum, den Wert der CO₂-Emissionsminderung durch die Reibleistungs- und ZKG-Gewichtsreduzierung und der Leistungsanforderung des Motors. Aufgrund dieses komplexen Zusammenspiels lässt sich keine alle Aspekte gleichzeitig optimal erfüllende Lösung finden. Nachfolgende Ausführungen konzentrieren sich darauf, an welchen Stellen, bei Vorgabe des Gießverfahrens, Entwicklungsfortschritte erzielt worden sind, um die technische und/oder die kostenmäßige Performance der Systeme zu verbessern.

3.1 Eingegossene Liner

Zylinderkurbelgehäuse, die für eine Herstellung im Druckgießverfahren ausgelegt sind, werden heute mehrheitlich mit eingegossenen GJL-Linern gefertigt. Dabei kommen unterschied-

liche Konfigurationen zum Einsatz, die sich im Wesentlichen durch die Gestaltung der Außenfläche unterscheiden. Über die Gestaltung der Zylinderaußenfläche wird ein starker Einfluss auf das mechanische Anbindungsverhalten der Liner zum Aluminium-Umguss genommen. Die folgende Liner-Varianten sind heute im Serieneinsatz für Zylinderkurbelgehäuse, Bild 5.



(a) Liner mit eingedrehter Nut (grooved liner) (b) Liner mit eingedrehter Nut und Anbindeschicht (c) Raugussliner (d) Raugussliner – „Omega“-Form

Bild 5: GJL-Liner zum Eingießen in Al-Zylinderkurbelgehäusen

Ziel der Außengestaltung ist es einen mechanischen bzw. auch metallischen Verbund zum Aluminium-Umguss zu erreichen. Aufgrund der komplexen Geometrie des Kurbelgehäuses stellt dies gießtechnisch eine besondere Herausforderung dar. Bestimmend für einen gleichmäßigen Formschluss ist insbesondere die Formfüllung, bei der ein direktes Anströmen genauso sicher zu beherrschen ist wie das Umströmen und Zusammentreffen zweier Schmelzefronten auf der dem Anguss gegenüberliegenden Seite. Während für die mechanisch bearbeiteten Liner der gleichmäßige Umguss und der Spannungsaufbau stärker im Vordergrund stehen, besteht für die Raugussliner die Aufgabe die Hinterschnitte durch das Aluminium hinreichend zu auszufüllen um dadurch den mechanischen Verbund sicherzustellen. Der in Bild 5b dargestellte Liner mit Al-Anbindeschicht wird eingesetzt, wenn ein metallischer Verbund angestrebt wird. Der metallische Verbund stellt die stärkste Verbindung zwischen Liner und Umguss dar. Er ist allerdings im Druckgießverfahren aufgrund des nur begrenzt beeinflussbaren Strömungsverlaufs der Schmelze bei der Formfüllung nie über die gesamte Mantelfläche zu 100% erreichbar. Beim Raugussliner, mit dem im Vergleich zum gedrehten Liner eine stärkere Bindung zum Umguss erreicht wird, muss die Produktentwick-

lung besonders darauf getrimmt werden, zu hohe Spannungsspitzen in den hinterschnittenen Zwickeln, die Ausgangspunkte für eine Rissbildung sein können, zu vermeiden, Bild 6. Durch eine sorgfältige Abstimmung der thermischen Randbedingungen, das sind die Temperatur der Al-Schmelze, Vorwärmtemperatur der GJL-Liner, Formtemperierung, Formsprühen und weitere Parameter, lässt sich ein fehlerfreier Umguss erzielen, ohne dass es zu Rissbildungen oder unzureichendem Formschluss kommt.

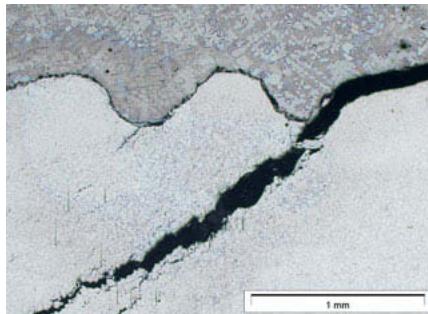


Bild 6a: Rissbildung in der Grenzfläche zwischen Liner und Umguss durch Überschreiten der zulässigen Spannung im Aluminium durch ein Aufschrumpfen auf den GJL-Liner.

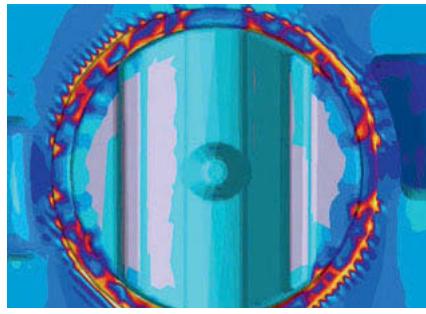


Bild 6b: Spannungsaufbau beim Abguss im GJL-Liner aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Aluminium und Gusseisen.

Während Rissbildungen im Umguss frühzeitig im Bearbeitungsprozess zerstörungsfrei identifiziert werden können, ist die Situation eines ungleichmäßigen Formschlusses bei Linern mit eingedrehten Nuten in den Mantelflächen deutlich schwieriger. So werden lokal abweichende Zylinderformen u.U. erst nach der Honbearbeitung sichtbar, Bild 7. Es hat sich gezeigt, dass die dargestellte Maßabweichung im μm -Bereich durch einen unzureichenden Umguss in Kombination mit der spezifischen Honbearbeitung und einem dadurch erfolgtem Abheben des Al-Umgusses vom GJL-Liner verursacht worden war.

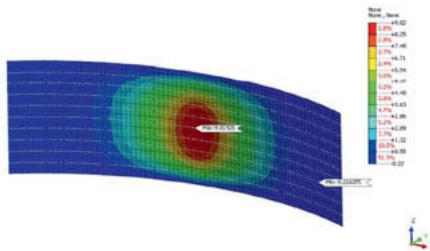


Bild 7: Lokale außerhalb der Spezifikation im μm -Bereich liegende Maßabweichung in der Zylinderform nach der Honbearbeitung

Nemak hat ein Simulationstool entwickelt, mit dem solche kritischen Bereiche vorab identifiziert werden können. Durch Modellierung der thermischen Randbedingungen ist es möglich, Bedingungen einzustellen, die zu einem spezifikationsgerechten endbearbeiteten Bauteil führen, Bild 8.

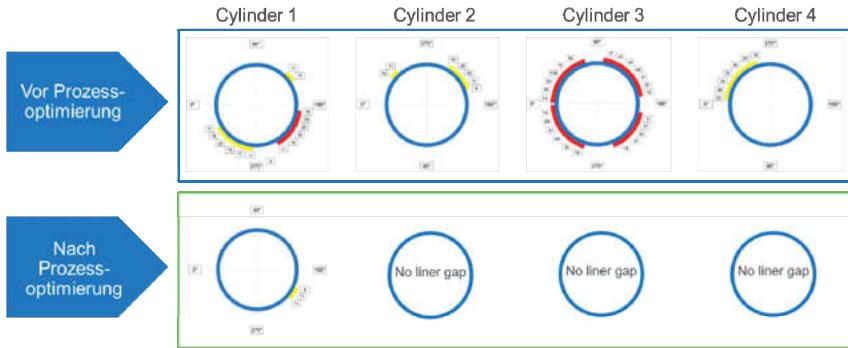


Bild 8: Spaltbildung zwischen GJL-Liner und Aluminium-Umguss vor Prozessoptimierung für einen 4-Zylinder ZKG im Druckguss. Unter Nutzung eines Simulationstools wird ein nahezu spaltfreier Umguss und damit eine verzugsfreie Zylinderform erreicht.

3.2 Thermisch gespritzte Laufflächen

Die Entwicklung der thermisch gespritzten Laufflächen ist durch zwei wesentliche Prozessschritte geprägt worden: die Vorbearbeitung der Aluminium-Zylinderfläche zur Einstellung des notwendigen Verbundes mit der Spritzschicht sowie durch das Spritzverfahren selbst.

Bei der Vorbearbeitung sind folgende Varianten heute verbreitet;

- Mechanisch bearbeitete Zylinderinnenwand mit definiert eingestellten Hinterschnitten, (u.U durch Schneiden + Umformen),
- Mechanisch bearbeitete Zylinderinnenfläche, ohne den Einsatz definierter Schneiden und
- Mechanisch aktivierte Zylinderinnenflächen durch Hochdruckwasserstrahlen.

Als thermische Spritzverfahren haben sich drei Verfahren in Serienanwendungen etabliert:

- PTWA (plasma transferred wire arc)/ RSW (rotating single wire),
- LDS (Lichtbogendrahtspritzen) und
- APS (Atmosphärisches Plasmaspritzen)

Nachfolgend werden die Ergebnisse einer Studie vorgestellt, die in erster Linie auf die Vorbearbeitung und die erzielten Anbindungen der Schichten Bezug nehmen. Die für die Anbindung bestimmende Aufraubehandlung wird mit unterschiedlichen Ansätzen verfolgt:

1. durch ein Aktivieren der Oberfläche durch Hochdruckwasserstrahl, mit einer geometrisch nicht bestimmten Form,
2. durch mechanische Verfahren, speziell aufgebaute mehrschneidige Werkzeuge zur Erzeugung der für die Schichthaftung erforderlichen Hinterschnitte oder
3. durch eine Schneidbearbeitung mit folgendem Umformschritt zur Erzeugung der Hinterschnitte.

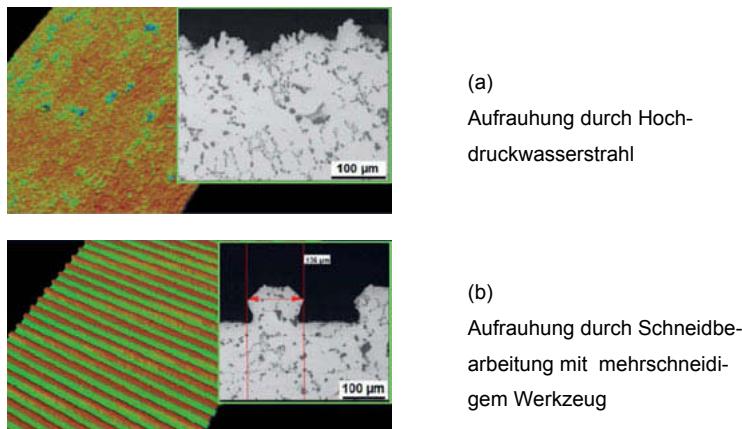


Bild 9: Erreichbare Topologien und Schnittgeometrien zur Erzeugung der erforderlichen Schichthaftung

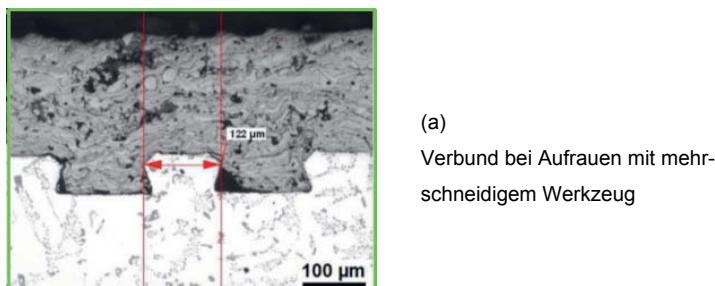


Bild 10: Verbundzone Al-Oberfläche/ thermische Spritzschicht, die die Grenzbereiche für die füllbaren Hinterschnitte aufzeigt

Zur Bewertung unterschiedlicher Aufrauverfahren ist die Schichthaftung eine wichtige Kenngröße. Quantifizierte Daten werden mit nachfolgend skizzierter Methodik und Messtechnik erzeugt, Bild 11. Dabei werden zwei zylindrische Segment aus der thermisch gespritzten Schicht extrahiert und mit einem hochfesten Kleber an der thermisch gespritzten Schicht miteinander verklebt. Dabei muss die Fügekraft des Klebers höher sein als die Zug-

festigkeit in der Schicht oder in der Verbindungszone zwischen aufgerauter Al-Oberfläche und thermischer Spritzschicht.

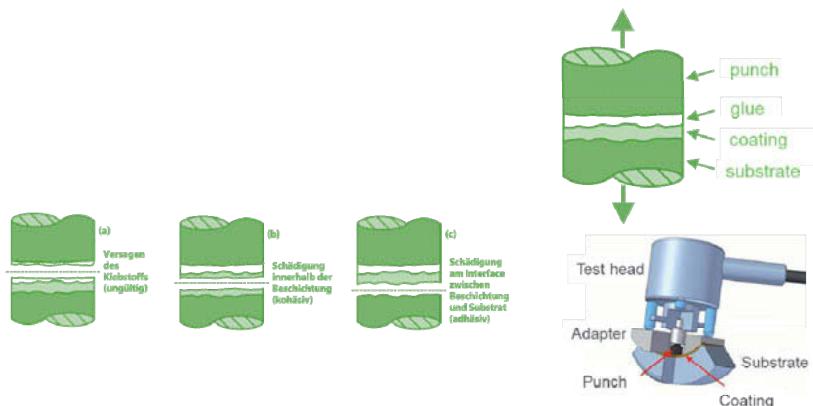


Bild 11: Methodik zur Messung der Haftzugfestigkeit [3]

Mit diesem Aufbau wurden an Zylinderkurbelgehäusen Spritzschichten auf ihre Schichthafung untersucht. Abgesehen von einem Einzelwert wird die geforderte Mindesthaftzugfestigkeit sicher erreicht. Unterschiede zwischen den verschiedenen ZKG-Varianten wurden allerdings festgestellt.

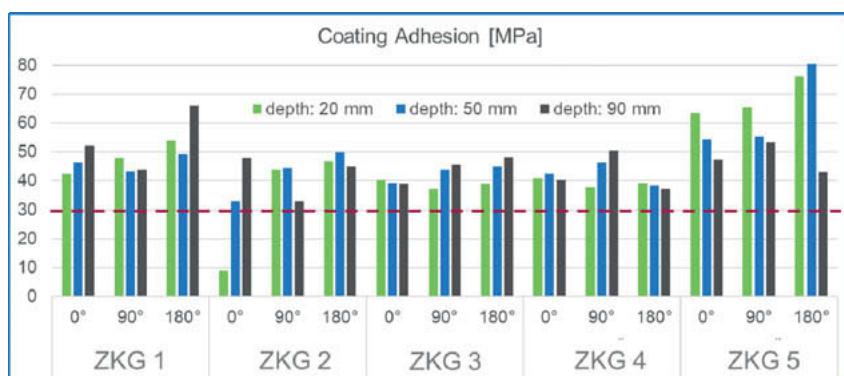
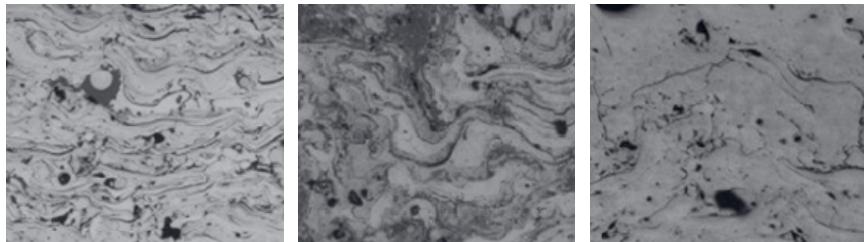


Bild 12: Haftzugfestigkeiten verschiedener ZKG mit thermischen Spritzschichten und unterschiedlicher Aufraubehandlungen

Bild 13 enthält eine Übersicht typischer Mikrostrukturen der Beschichtungsverfahren APS, PTWA (bzw. RSW) und LDS. Allen Verfahren ist dem für thermische Spritzverfahren typische lamellare Schichtaufbau mit Poren gemeinsam, dennoch ergeben sich verfahrensspezifische Besonderheiten.



(a) APS-Beschichtung (b) PTWA-Beschichtung (c) LDS-Beschichtung

(b) PTWA-Beschichtung

(c) LDS-Beschichtung

Bild 13: Gefügeausbildung thermischer Spritzschichten auf Al-Zylinderkurbelgehäusen

Die schmelzflüssigen Partikel, die beim Auftreffen auf das Substratmaterial abflachen und somit die Beschichtung erzeugen, weisen für das APS-Verfahren aufgrund der Partikelgröße des pulverförmigen Spritzzusatzwerkstoffs die geringste Größe auf. Dies lässt sich in der Mikrostruktur anhand der feinsten Lamellen nachvollziehen. Für die APS Beschichtung ist ebenfalls der Verbleib einzelner unaufgeschmolzener runder Partikel innerhalb der Beschichtung charakteristisch. Ausgehend von der APS- über die PTWA- bis hin zur LDS-Beschichtung nehmen die Partikelgrößen und damit auch die Größe der Spritzlamellen zu. Für die PTWA-Beschichtung ist die Ausbildung feiner Oxide, die im Längsschliff als graue Bereiche ersichtlich sind, typisch. In der LDS-Beschichtung sind Bereiche mit Oxidlamellen deutlich seltener vorzufinden, was auf das hier verwendete inerte Zerstäubergas (Stickstoff) zurückzuführen ist. Die LDS-Beschichtung weist im Vergleich zu den anderen Beschichtungsverfahren tendenziell einen höheren Anteil an Poren und größere Einzelporen auf.

4. Literatur

- [1] M. Speicher et al.: „Aluminium-Motorblöcke der neuesten Generation im CPS-Verfahren“, 9. VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau 2017“
- [2] S. Dengler, H. Meishner: The New Audi 2.5l TFSI Five Cylinder Engine for the New Audi TT-RS – A Lightweight Design High Performance Engine, 9. VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau 2017“
- [3] R. B. Heimann: Plasma Spray Coating, Principles and Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.

Die neue Vierzylinder-Dieselmotoren-Generation von Volkswagen – höchstentwickelte Gießtechnik für maximale Effizienz

Dipl.-Ing. **Markus Köhne**, Dipl.-Ing. **Christiane Wagner**,
Dipl.-Ing. **Andreas Schüller**, Volkswagen AG, Wolfsburg

1 Kurzfassung

Der Dieselantrieb stellt im Antriebsportfolio der Volkswagen AG einen wichtigen Baustein zur Erfüllung der Kundenbedürfnisse und zur Erreichung der CO₂-Ziele dar. Seine konsequente Weiterentwicklung zum Motor sauberer Mobilität unter Beibehaltung der gewohnten positiven Eigenschaften ist daher ein wesentliches Ziel der Entwicklungsarbeit.

Die neue Vierzylinder-Dieselmotorenfamilie von Volkswagen mit der Bezeichnung EA288 evo wurde im Hinblick auf eine weitere deutliche Effizienzsteigerung, auf die Erfüllung sämtlicher, auch zukünftiger Abgasanforderungen im Bereich EU28 und der Anwenderländer, auf die Verbesserung von Leistungsentfaltung und Komfort und auf eine deutliche Gewichtsreduzierung entwickelt. Einen entscheidenden Beitrag hierzu leisten ein neues Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) aus Aluminium sowie der ebenfalls neu konzipierte Zylinderkopf. Ihre Konstruktion und ihre Gießverfahren werden in diesem Beitrag beschrieben.

2 Einleitung

Bereits mit der Vierzylinder-Dieselmotorenfamilie der Generation EA288, die Volkswagen im Jahr 2012 eingeführt hat, konnten die positiven Eigenschaften des Dieselantriebs hinsichtlich CO₂-Ausstoß, Reichweite und Dynamik deutlich herausgearbeitet werden. Die neuen Aggregate der Baureihe EA288 evo, die jetzt auf den Markt kommen, sind konsequent auf die Anforderungen der Zukunft ausgerichtet und bieten gegenüber der Vorgängerbaureihe nochmals eine deutliche Verbesserung der Eigenschaften.

Bei der Entwicklung des EA288 evo standen folgende Ziele im Fokus:

- niedrigste Emissionen in allen Prüfzyklen und im realen Fahrbetrieb (RDE),
- robuste Abgasnachbehandlungstechnologien für stabile Emissionen über Laufzeit,

- Verringerung der CO₂-Emissionen um bis zu 10 %,
- verbesserte Akustik sowie ein um bis zu 20 kg verringertes Gewicht,
- gesteigerte Leistungs- und Drehmomentwerte,
- spontaneres Ansprechverhalten.

In der neuen Motorbaureihe kommen neueste Technologien für einen weiter verminderten CO₂-Ausstoß zum Einsatz. Im Zylinderkopf wie im Kurbeltrieb wurde die Reibleistung deutlich gesenkt, unter anderem durch Stahlkolben und ein neues Kolbenringpaket. Das neu konzipierte Thermomanagement, bei dem die Kühlung als "split cooling"-Konzept ausgeführt ist, zahlt ebenfalls auf das Effizienz-Konto ein. Auch die Motornähe Abgasreinigungsanlage (MAR) ist vollständig neu konzipiert; der flächendeckende Einsatz von SCR-Systemen (Selective Catalytic Reduction) gewährleistet eine wirkungsvolle Stickoxidreduktion.

In Bezug auf Leistung, Drehmoment, Ansprechverhalten und Motorakustik erfüllen die EA288 evo-Aggregate die gestiegenen Erwartungen an Dieselmotoren. Die deutliche Reduzierung des Gewichts ist wesentlich auf das neue Aluminium-ZKG zurückzuführen. In der Längsplattform der Marke Audi erlaubt die neue Motoreneneration als Mild-Hybrid mit Riemen-Starter-Generator eine kundenerlebbare Funktionserweiterung, die mit einer Verbrauchseinsparung verbunden ist.

Bei der Entwicklung des EA288 evo hat Volkswagen das Konzept der Modularität konsequent umgesetzt und die Varianten erheblich reduziert. Bei allen Teilen, die von der Einbaulage des Motors im Fahrzeug und seiner Leistung unabhängig sind, kommt eine konsequente Gleichteilestrategie zur Anwendung. Gegenüber dem Vorgängermotor sind Hub (95,5 mm) und Bohrung (81,0 mm) unverändert geblieben, bei sämtlichen Varianten beträgt der Hubraum 1.968 cm³. Die Leistungsdifferenzierung erfolgt über verschiedene Leistungsklassen (LK), die Spreizung beträgt 100 bis 120 kW (LK1) beziehungsweise 120 bis 150 kW (LK2). Die beiden Leistungsklassen, in denen der EA288 evo in die Fahrzeuge des Konzerns einzieht, unterscheiden sich hinsichtlich Kurbeltrieb, Aufladung, Gemischaufbereitung und Kühlung. Bei der LK2 bestehen die Kolben aus Aluminium, bei der LK1 aus geschmiedetem Stahl. Bei den LK1-Motoren wurden die Durchmesser der Kurbelwellenhauptlager und der Pleuellager gegenüber dem Vorgängeraggregat erheblich verringert, die Kurbelwelle konnte um 2,8 kg leichter ausgeführt werden. Bei allen Motoren wurde der Ausgleichswellentreiber gewichtsreduziert, im Ventiltrieb wurden Gewicht und Reibleistung verringert.



Bild 1: Verschlankung Aggregateprogramm/Variantenreduzierung

3 Neue Lösungen und Komponenten beim EA288 evo

Beim EA288 evo hat Volkswagen das Brennverfahren neu ausgelegt und sowohl in der Effizienz als auch im Rohemissionsverhalten verbessert. Die Gasstrecken auf der kalten und der heißen Motorseite wurden unter Nutzung neuartiger virtueller Methoden durchgängig optimiert. Wirkungsgrad und Ansprechverhalten der Aufladegruppe konnten erheblich gesteigert, der Systemdruck der Common Rail-Einspritzanlage auf 2.200 bar angehoben werden. Die Komponenten der Abgasnachbehandlung wurden neu dimensioniert und in Bezug auf Konvertierung und Alterungsstabilität deutlich verbessert. Das Motormanagement wurde mit Hilfe einer neuen Steuergerätegeneration und neuartiger Softwarefunktionen in der Präzision gesteigert.

		EA288 evo LK1	EA288 evo LK2
Hubraum	cm ³	1968	
Bohrung	mm	81	
Hub	mm	95,5	
Hub/Bohrung (Verhältnis)	-	1,18	
Zylinderabstand	mm	88	
Blockhöhe	mm	236	
Pleuellänge	mm	156	144
Hauptlagerdurchmesser	mm	48	54
Pleuellagerdurchmesser	mm	47,8	50,9

Bild 2: Tabelle – Technische Daten

4 Zylinderkurbelgehäuse

4.1 Konstruktive Herausforderungen

In der zuerst eingeführten Version des EA288 evo für die Längsplattform kommt ein neues Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) aus dem Werkstoff AlSi8Cu3 zum Einsatz. Es entsteht in Schürzenbauweise mit Einzellagerdeckeln. Das neue Aluminium-ZKG wiegt lediglich 26,5 kg und damit 20 kg weniger als das Grauguss-ZKG des Vorgängermotors EA 288. Seine Steifigkeit konnte über die hohe Integration von Kanälen so optimiert werden, dass mit der Reduzierung der Bauteile zugleich die Akustik gegenüber dem Vorgängermotor verbessert wurde. Das ZKG integriert kühlmittelführende Kanäle wie den Wasservor- und -rücklauf für den Öl-Wasser-Wärmetauscher und den Hauptwasserzulauf für die Wasserpumpe.

Bei der Entwicklung des Aluminium-ZKG war es aufgrund der Bauraumanforderungen nötig, die geometrischen Hauptabmessungen des Vorgängerbauteils zu übernehmen. Zu befestigende Anbauteile wie der Riemen-Starter-Generator und die Komponenten der Abgasnachbehandlung stellten erhöhte Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Außenhaut. Vor allem aber galt es zwei Anforderungen miteinander zu vereinen, die eine neue Herausforderung an das Gießkonzept darstellten.

Die erste Herausforderung stellen die gestiegenen Zünddrücke im neuen Dieselmotor dar; sie resultieren in sehr hohen Kräften, die die Hauptlagerstühle aufnehmen müssen. Die zweite Anforderung besteht in den sehr begrenzten Platzverhältnissen für Zylinderrohre und Stege. Der Zylindermittendistanz des EA288 evo beträgt wie beim Vorgängermotor 88 mm; bei 81 mm Bohrung verbleibt ein Stegbereich von 7 mm. Auf beiden Seiten nimmt die Dünnewand-Laufbuchse jeweils 1 mm in Anspruch; sie besteht aus Grauguss nach der Volkswagen-Norm TL125 und wird thermisch gefügt. Auf dem verbleibenden 5 mm Alu-Steg muss noch eine Stegkühlungsbohrung von 2 mm Durchmesser Platz finden, sodass die verbleibende Aluminium-Nennwandstärke auf beiden Seiten lediglich je 1,5 Millimeter beträgt.

Bei der Entwicklung des ZKG galt es auch, die Einbaulage des Motors für Modelle auf der Längs- und der Querplattform zu berücksichtigen. Um die Variantenanzahl auf ein Minimum zu reduzieren, fiel die Entscheidung für ein Einheits-Rohrteil und zwei Bearbeitungsvarianten für die LK1 und die LK2, die sich nur im Kurbelwellenhauptlager-durchmesser unterscheiden. Um dieses Konzept umsetzen zu können, mussten die Brennraumplatte, der Zylinderstegbereich sowie der Hauptlagerstuhl in der Geometrie und in den Gefügeeigenschaften auf hohe Festigkeiten ausgelegt werden.

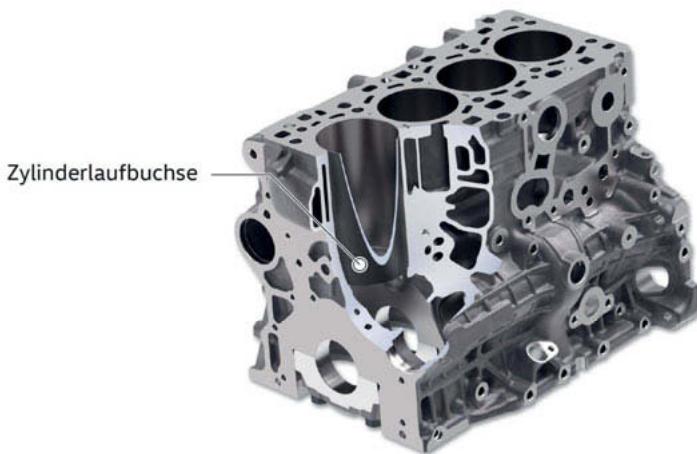


Bild 3: Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse mit Laufbuchsen

4.2 Auswahl des geeigneten Gießverfahrens

Die Entwicklung des Gießverfahrens für das neue Aluminium-ZKG begann mit der Bewertung der zur Wahl stehenden Verfahren durch interne und externe Experten. Drei Verfahren wurden bewertet:

- das CPS-Verfahren (CPS = Core Package System, Sandkernpaketverfahren),
- das Niederdruck-Kokillengussverfahren,
- das dynamische Schwerkraftgießen in Kokille (Dreh-Kipp-Kokillengussverfahren).

Vorausgesetzt wurde, dass die Maßgenauigkeit, die Erreichbarkeit von mechanischen Kennwerten und die Dichtigkeit der Gussteile für alle Verfahren vergleichbar sein mussten. Für die Bewertung wurden folgende Kriterien herangezogen:

Kriterium	Gießverfahren
Mechanische Eigenschaften Lagerstuhl und Stegbereich	
Mechanische Eigenschaften Gesamtbauteil	
Dendritenarmabstand lokal	
Dendritenarmabstand Bauteil	
Porosität	
Gussqualität	
Oberfläche	
Formfüllung	
Erstarrung	
Prozesssicherheit	
Produktivität	
Invest	

Bild 4: Kriterien bei der Auswahl des geeigneten Gießverfahrens

4.2.1 CPS-Verfahren

Das CPS-Verfahren, das sich vor allem für mittlere und hohe Stückzahlen eignet, nutzt ein Paket selbsttragender Kerne, die auf einem regenerierbaren Cold-Box-System basieren. Die Stärken dieses Verfahrens sind große Designfreiheit und hohe Integrationsmöglichkeiten, ein großes Gewichtseinsparpotenzial, hohe Werkzeugproduktivität und Prozessstabilität sowie exzellente mechanische Eigenschaften im Bereich von Lagerstuhl und Zylinderrohr. Mithilfe des 180 Grad-Rollovers nach der Formfüllung stellen sich ideale Erstarrungsbedingungen ein. Die Entsandung, die Sandregeneration und das Lösungsglühen erfolgen aus der Gießhitze, die anschließende Abschreckung dient zur Einstellung der mechanischen Eigenschaften.

Diesen Stärken stehen jedoch auch Nachteile gegenüber. Das CPS-Verfahren erfordert wegen seiner relativ langen Umlaufzeiten den Einsatz organischer Sandkerne, bei denen Harze als Bindemittel dienen. Dieser Umweltaspekt steht im Widerspruch zu den Nachhaltigkeitsbestrebungen von Volkswagen. Eine zweite Schwäche liegt darin, dass der CPS-Prozess keine aktiven Kühlverfahren wie Temperieren und Schichtkühlen zulässt. Ein drittes Handicap ist der hohe Automatisierungsgrad beim Fügen des Kernpaketes, der entsprechende Investments bedingt.

4.2.2 Niederdruck-Kokillengussverfahren

Der Niederdruck-Kokillengussprozess, der auch mit Doppelgießmaschinen möglich ist, kann vor allem kleinere Stückzahlen wirtschaftlich darstellen. Seine Vorteile sind eine turbulenzfreie, laminare und steigende Füllung der Form und die Nachspeisung durch die Erhöhung des Drucks. Das Niederdruck-Kokillengussverfahren erlaubt den Einsatz anorganischer Kerne im Sinne eines nachhaltigen Fertigungsprozesses und die Verwendung der übereutektischen Legierung GK AISI17, die zu einem monolithischen ZKG führt.

Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass mit ihm keine komplexen Kernpakete darstellbar sind. Durch den Gießprozess sind die Anforderungen sowohl im Bereich der Brennräume als auch beim Hauptlagerstuhl eingeschränkt. Im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren weist das Niederdruck-Kokillengussverfahren zudem längere Zykluszeiten auf.

4.2.3 Dreh-Kipp-Kokillengussverfahren

Im Dreh-Kipp-Kokillengussverfahren, das ebenfalls auf Doppelgießmaschinen ausgeführt werden kann, lassen sich kleine, mittlere und hohe Stückzahlen wirtschaftlich darstellen. Der Einsatz komplexer anorganischer Kernpakete ermöglicht hier hohe Designfreiheit und einen nachhaltigen Fertigungsprozess.

Die Formfüllung vollzieht sich turbulenzarm, die Temperaturverteilung ist gleichmäßig, und die Gießgeschwindigkeit lässt sich über die Drehgeschwindigkeit individuell einstellen. Die aktiven und passiven Kühlkonzepte für die hochbelasteten Bereiche während des Gusses erlauben es, das Gefüge in den Lagerstühlen und den Zylinderlaufbahnen unterschiedlich einzustellen. Die günstigen Abkühlbedingungen verleihen der Außenhaut sehr gute mechanische Kennwerte, wodurch sich Anbauteile wie Nebenaggregate oder Motorstützen ohne Nacharbeit anbringen lassen.

Ein Handicap des Dreh-Kipp-Kokillengussverfahrens in Kombination mit anorganischen Kernen ist die aufwendige Entkernung. Sie hat zur Folge, dass dieser Prozessschritt exakt auf das Bauteil abgestimmt werden muss. In der Außengeometrie des Bauteils führen die Stahlkokillen zu gewissen Restriktionen hinsichtlich der Entformungsrichtung, der Schrägen und der Taschentiefe.

4.3 Gießkonzept

Nach der fachlichen Bewertung der drei genannten Gießverfahren wurde eine Kostenkalkulation erstellt. Aus dem Abgleich ihrer Ergebnisse mit den technischen Anforderungen ging das Dreh-Kipp-Kokillengussverfahren als Sieger hervor. Die zahlreichen Simulationen und die Rohteil-runden vollzogen sich in gemeinsamer Teamarbeit mit Volkswagen Gießexperten und externen Partnern.

Das neue Gießkonzept gewährleistet hohe Festigkeiten und geringe Porositäten in den hochbelasteten Zonen Hauptlagerstuhl, Brennraumplatte, Zylinderrohr und Stegbereich. Damit bringt es Anforderungen zusammen, die sonst nur schwer zu vereinen sind. Für den Abguss wird das Bauteil gegenüber dem bisherigen Verfahren gedreht und auf die Brennraumplatte gestellt. Die Brennraumplatte wird mit einer aktiv gekühlten Stahlplatte temperiert, die Zylinderbohrungen werden mit wasserführenden Stahlpinolen ebenfalls aktiv gekühlt. Der Hauptlagerstuhl wird mit eingelegten Kühleisen passiv temperiert.

Ein Zentralspeiser, der nach dem Guss wieder entfernt wird, sorgt dafür, dass die Schmelze unterhalb der Hauptlager während des Erstarrungsprozesses lange genug nachgezogen werden kann. Ohne diese Lösung würden die Bereiche um die Stehbolzen nicht hinreichend gespeist werden, um eine Lunker-freie Gussqualität zu erzielen.

Darüber hinaus weist das Gießkonzept weitere Vorteile auf:

- Passive Kühleisen garantieren mechanische Kennwerte im Hauptlager analog zum Kernpaketverfahren,
- die Lagerung in der Werkzeuggrundplatte stellt eine hohe Lagegenauigkeit des Wassermantels zum Zylinderrohr sicher,
- die Werkzeug-integrierten Zylinderrohrpinolen können vor dem Aufschrumpfen gezogen werden (kein nachträgliches Auspressen erforderlich),
- der Umlauf der Hauptlagerkühleisen ist deutlich robuster,
- bedingt durch die guten Kühlbedingungen im Zylinderrohr ist das Gießkonzept auch tragfähig für Konzepte mit beschichteten Laufbahnen.

Das Gießkonzept wurde mit dem nominierten Serienlieferanten final entwickelt. Eine große Herausforderung bildete dabei der Stegbereich mit seiner geringen Rest-Nennwandstärke, für den besonders strenge Porositätsanforderungen gelten. Um auch geringe Abweichungen auszuschließen, wurde eine 100-prozentige Überwachung dieses Bereichs in die Serienfertigung eingeführt.

5 Zylinderkopf

Der Zylinderkopf des EA288 evo stellt eine komplett Neukonstruktion dar. Dabei wird er, auf Basis der äußerst positiven Erfahrung des Vorgängerbauteils im EA288, im Kippgussverfahren in drehbaren Kokillen abgegossen. Die Vorteile des Dreh-Kippgießens bei der Herstellung des Zylinderkurbelgehäuses gelten auch für die Fertigung der Zylinderköpfe. Mittlerweile wird das Verfahren als Standard in den Lastenheften für den Abguss (auch in Doppelkokillen) von Diesel-Zylinderköpfen bei Volkswagen vorgeschrieben. Während des Abgusses, bei dem die Bodenplatte gekühlt wird, führt die Kokille eine Kippbewegung aus, sodass ein sogenannter „steigernd/schichtender“ Guss entsteht und nicht immer wieder frische Schmelze über die Bodenplatte geführt wird. Damit können die geforderten Eigenschaften (z.B DAS-Wert) sichergestellt werden. Gegenüber dem Vorgängerbauteil konnte das Material, die Legierung AlSi10Mg(Cu),

ebenso wie die Spezifikation der Wärmebehandlung beibehalten werden. Während der Entwicklungsphase wurden Versuche mit alternativen Abschreckverfahren z.B. durch Luft und auch alternative Legierungen motorisch abgeprüft. Jedoch ergaben sich keine Vorteile zu Gunsten Belastbarkeit und Festigkeit, so dass die bekannten Verfahren und Prozesse kostenoptimal weiterverwendet werden konnten. Der Guss erfolgt sowohl in der Volkswagen-Hausgießerei in Hannover als auch bei einem externen Lieferanten. Beide Gießereien nutzen aus Gründen der Nachhaltigkeit anorganische Kerne, bei denen wasserlösliche Natrium-, Kalium- und Lithiumsilikate als Binder für den Quarzsand dienen. Anders als beim Vorgängermotor wurde ein achsparalleler Ventilstern mit zentraler Injektorlage entwickelt. Die Führung der Einlasskanäle besteht aus einem Spiral- und einem Tangentialkanal, bei ihrer Auslegung wurde höchste Priorität auf die Entdrosselung der Kanäle gelegt. Der Ladungswechsel wurde zudem über zwei Sitzdrallfasen optimiert, die in die Planfläche des Zylinderkopfes eingearbeitet werden.

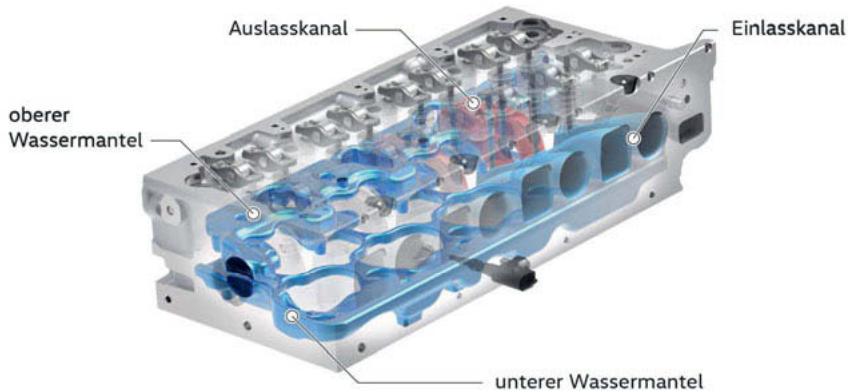


Bild 5: Zylinderkopf mit Kanalkonzept

Die Kühlung des EA288 evo Grundmotors ist als getrenntes Kopf-/Block-Kühlsystem mit unterschiedlichen Temperaturniveaus für Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderkopf ausgeführt. Der Zylinderkopf selber verfügt über zwei separate Wassermäntel. Beide Wassermäntel werden über einen separaten Kern auf der „heißen“ Seite im Kurbelgehäuse gespeist. Der untere Wassermantel dient der gezielten Kühlung der Brennraumplatte. Der obere Wassermantel versorgt vor allem die Stegkühlung im Zylinderkurbelgehäuse. Aus dem oberen Wassermantel

wird mit einer Bohrung Wasser für die Stegkühlung entnommen, das nach Durchströmen der Stege im ZKG wieder in den unteren Wassermantel des Zylinderkopfes gelangt. Hierzu muss das Druckverhältnis zwischen dem oberen Wassermantel und dem unteren Wassermantel so ausgelegt sein, dass die notwendige Strömungsrichtung immer sichergestellt ist.

Der obere Wassermantel stützt sich zusätzlich zu den seitlichen und stirnseitigen Kernlagern noch mit 3 Kernstützen am Topdeck ab, um eine unzulässige Verbiegung zu vermeiden. Hierbei wurden auch in der Entwicklungsphase Versuche durchgeführt, um die notwendige Anzahl an Abstützungen zu ermitteln. Die für die Serie gewählte Anzahl bildet hierbei einen sehr guten Kompromiss zwischen notwendiger Abstützung und dem Vorteil für eine bessere Entkernbarkeit und Prüfbarkeit des oberen Wassermantels. Die Durchtritte werden, unterschiedlich nach Lieferant, mit eingepressten Deckeln oder per Rührreibschweißen verschlossen. Bei letzterem Verfahren wird ein Stopfen zunächst von einem vibrierenden Pin mit dem Zylinderkopf verschmolzen, danach wird die Kontur verschweißt.

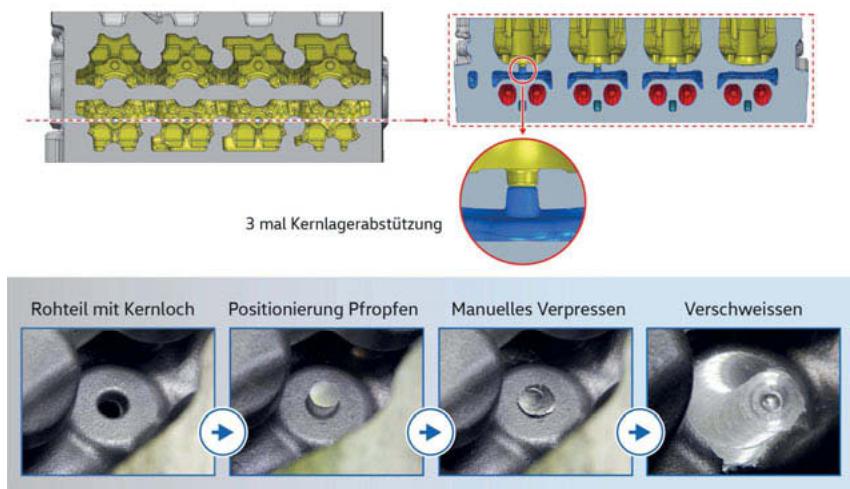


Bild 6: Prozessschritte Rührreibschweißen

5.1 Berechnungsverfahren

Um die Anforderungen an Temperaturfestigkeit, Druckfestigkeit und Herstellbarkeit für den Zylinderkopf des neuen EA288 evo Motors zu erfüllen, wurden bei der Auslegung des Zylinderkopfes moderne Berechnungsverfahren zur Anwendung gebracht, die im folgendem näher beschrieben werden.

5.1.1 Formfüllsimulation Sandkerne

Bei der Formfüllsimulation der Sandkerne lag der Fokus darauf, die Kernschießmaschinen so zu optimieren, dass durch optimale Füllung und Verdichtung des Gießandes möglichst dichte Kerne mit maximaler Stabilität entstehen. Dies kann über die Lage der Entlüftungspunkte oder Einschusslagen erfolgen. Eine besondere Herausforderung hierbei ist das Verbot von Entlüftungen im Bereich der Brennraumplatte. Deshalb wurden speziell für den unteren Wassermantel mehrere Optimierungsschleifen durchgeführt, um das beste Konzept zu ermitteln.

5.1.2 Berechnung Festigkeit der Sandkerne im Gießprozess

Für den Zylinderkopf wurde ein spezielles Berechnungstool eingesetzt, um die Stabilität des Sandkerns beim Abguss besser einschätzen zu können. Hierbei wird der Kern mit seinen Sand/Binder-Eigenschaften betrachtet und dabei den Belastungen durch Temperatur und Gießdruck während des Abgusses ausgesetzt. So lassen sich Schwachstellen ermitteln und entsprechende Maßnahmen definieren. Aufgrund der hohen Belastungen in den Bereichen dünner Sandwandstärken wurde der untere Wassermantel mit einem Gemisch aus herkömmlichen Sand und einem synthetischen Korn ausgeführt. Diese so genannten Cerabeads – stabilisierte Zirkonoxid-Mahlkörper in Kugelform – zeichnen sich durch besonders hohe Dichte und Härte aus.

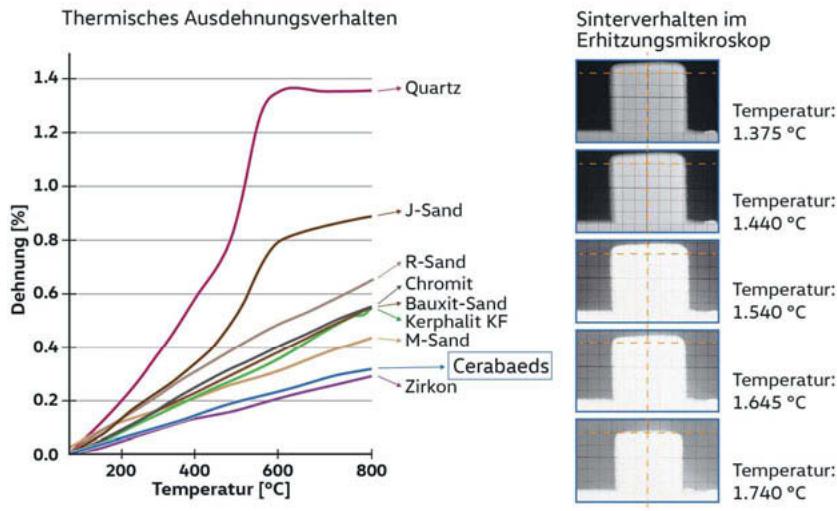


Bild 7: Bewertung Cerabeads (Ausdehnungs- und Sinterverhalten)

5.1.3 Berechnung Füllsimulation Kokille

Schwerpunkt der Prozessoptimierung zur Herstellung des Zylinderkopfes mit seinem filigranen und thermisch hochbelasteten unteren Wassermantels war es, die Durchspeisung auch der kleinteiligen Randbereiche sicherzustellen, um Lunker zu vermeiden. Als Ergebnis der Berechnungen erwiesen sich Durchtritte und Freimachungen im Sandkern als Durchspeisungshilfen.

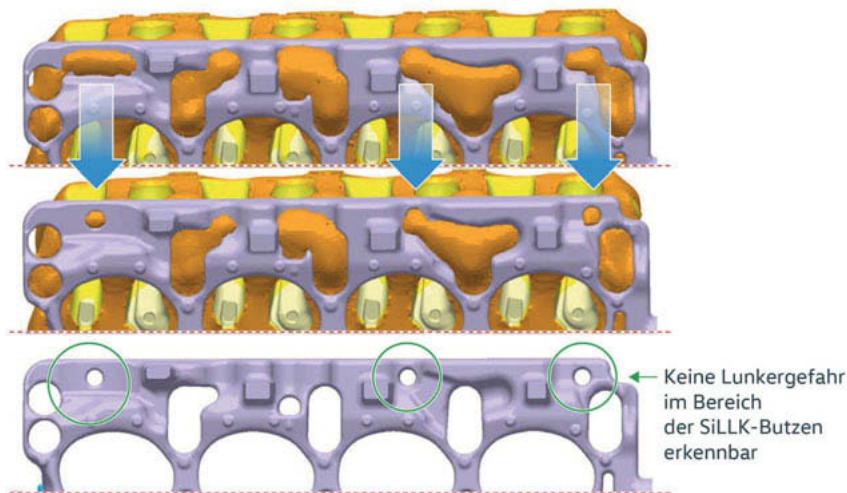


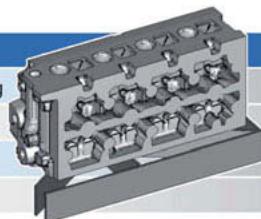
Bild 8: Formfüllsimulation mit Durchspeisungshilfen

5.1.4 Simulation der Eintauchlage bei der Wärmebehandlung

Die Simulation der Eintauchlage ist ein wichtiger Bestandteil der Wärmebehandlung. Dazu wurde für den EA288 evo mit AVL Fire ein weiteres Berechnungstool eingesetzt, das den Vorgang des Eintauchens berechnet. Dieses Simulationstool, das von einem externen Dienstleister bereitgestellt wird, ermöglicht es das Abkühlverhalten zu simulieren und gibt Aufschlüsse über die optimale Eintauchlage, d.h. mit welcher seiner sechs Seiten voran der Zylinderkopf bei der Wärmebehandlung idealerweise ins Wasserbad eingetaucht wird. Als Ergebnis wurde die bereits beim Vorgänger bewährte Eintauchlage über die Auslassseite bestätigt.

Ausrichtungen:

Eigenschaften/Informationsdaten	Einheit
Zellentyp	sechsflächig
Gesamtzahl der Elemente	7.479.833
Gesamtzahl der Elemente für Material 2	2.777.234
Gesamtzahl der Elemente für Material 3	276.822



Simulationen:



Bild 9: Simulation Eintauchlage

5.1.5 Berechnung der Eigenspannungen

Bei der Entwicklung des Bauteils wurden die Eigenspannungen, die im Gießprozess, bei der Wärmebehandlung und bei der abschließenden mechanischen Bearbeitung des Zylinderkopfs auftreten, berechnet und akribisch analysiert. Die ermittelten Werte gingen in die thermomechanische Gesamtberechnung des Bauteils ein. Die kritischen Bereiche, die über die Berechnung ausgewiesen werden, können so bei der Bauteilanalyse während der Erprobung zielgerichtet betrachtet werden.

5.2 Entsandung des Zylinderkopfs

Die sichere Entsandung und Prüfung des Zylinderkopfes, speziell die Entsandung des unteren Wassermantels, stellt hohe Anforderungen an den Herstellungsprozess. Wichtig ist eine Temperaturführung des Weges zwischen Abguss und Entkernstation. Es muss sichergestellt werden, dass der Prozess des Entkernens in einem bestimmten Temperaturfenster stattfindet. Um zu gewährleisten, dass keine Kernreste im Inneren verbleiben, werden alle Zylinderköpfe mit dem Tool "Light Thru" abgeprüft.

Um das Tool wirksam einsetzen zu können, mussten bei der Entwicklung des Zylinderkopfes geometrische Anpassungen erfolgen. Somit lassen sich mögliche Verschlüsse in allen relevanten Bereichen sicher erkennen.

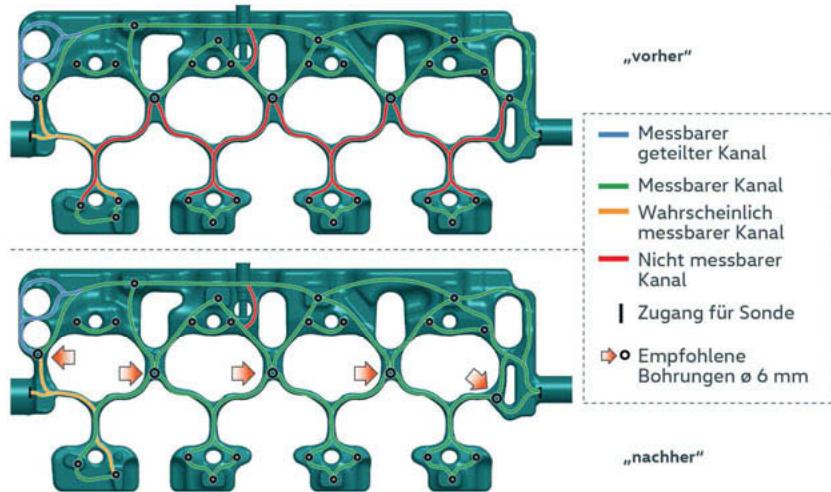


Bild 10: Prüfbarkeit unterer Wassermantel mittels „Light Thru“
(links „vorher“; rechts „nachher“)

6 Zusammenfassung

Volkswagen hat mit dem EA288 evo eine neue Generation von Dieselmotoren entwickelt, die im Wettbewerbsumfeld technologisch eine führende Position einnimmt und die bereits hervorragenden Eigenschaften der Vorgängergeneration noch einmal übertrifft. Die Hauptbestandteile des Grundmotors, das Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium und der Zylinderkopf, die beide in aufwendigen Gießverfahren entstehen, runden ein Portfolio innovativer Lösungen ab.

Die EA288 evo-Motoren basieren einheitlich auf 1.968 cm³ Hubraum und laufen in derzeit zwei Leistungsklassen vom Band, womit sie ein Spektrum von 100 kW bis 150 kW abdecken. Sie unterbieten die Grenzwerte der aktuellen Emissionsgesetzgebung auf dem Prüfstand und im „Real Driving“ sicher und sind bereits auf die Anforderungen der nächsten Stufe der

Abgasgesetzgebung ausgelegt. Darüber hinaus konnte ihr CO₂-Ausstoß gegenüber den Vorgängeraggregaten um bis zu 10 % gesenkt werden, während Leistungs- und Drehmomentsteigerungen bis zu 9 % zur Verfügung stehen.

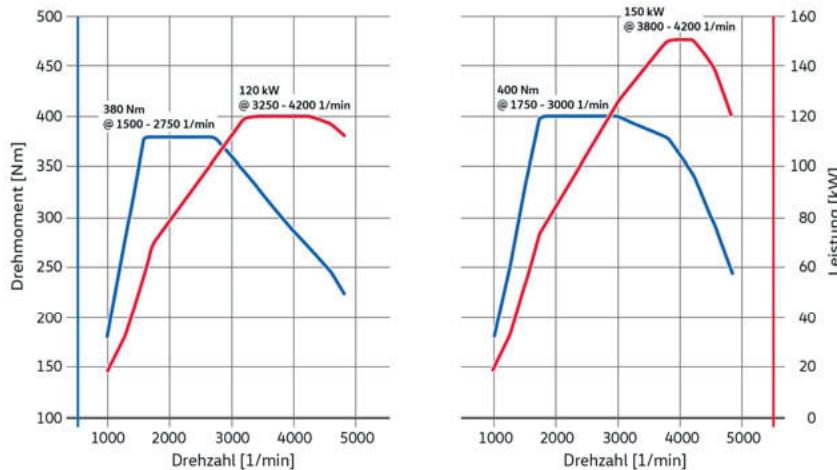


Bild 11: Leistungskurven für die Obergrenze der Leistungsklassen: LK1 (links) / LK2 (rechts)

Literatur

- [1] Dr.-Ing. F.-T. Metzner, Dipl.-Ing. S. Willmann, Dipl.-Ing. C. Helbing, Dr.-Ing. C. Eglmeier, Dipl.-Ing. M. Köhne, Dipl.-Ing. A. Krause, Dipl.-Ing. B. Wietholt;
Die neue Vierzylinder-Dieselmotorengeneration von Volkswagen,
38. Wiener Motoren symposium 2018, Volkswagen AG, Wolfsburg

Grey cast iron as cylinder-block material for range extender engines

A serious alternative?

Dipl.-Ing. **Mike Souren**, Dr.-Ing. **Tolga Uhlmann**,
Dipl.-Ing. **Jeroen Slotman**, FEV Europe GmbH, Aachen

Abstract

The automotive industry is under pressure. It is subject to major, even disruptive, developments. The public perception of the automobile is changing, and it demands environmentally sustainable drive trains. In the context of this development, the electrification of the powertrain has taken the lead in the public discussion. It is also considered the strongest driving force from the perspective of the industry. However, today's sales numbers of electrified vehicles are strongly inhibited by high costs, a weak infrastructure and a short driving range.

Even if the installed vehicle battery capacity allows a theoretical electrical driving range of 400-500 km, the concern of limited range remains for a major part of the consumers. A sensible alternative to increasing the battery capacity further is to choose the opposite direction (smaller battery) and implement a range extender (REX). Analyzing the requirements for such an internal combustion engine, it is clear that it has to fulfil the same emission legislation as any other internal combustion engine. On the other hand it is to be assumed that NVH, weight, package and cost requirements for a REX would be even more stringent. This paper will investigate whether this is really the case.

Based on the extremely compact and zero vibration V-REX concept developed by FEV in co-operation with Rheinmetall AG (formerly KSPG), this paper will additionally analyze the implications of using grey cast iron as a block material in the light of the boundary conditions explained above. The penalty of the extra weight will be balanced against possible benefits regarding NVH, compactness, fuel consumption and cost.

1. The electrification of powertrains

A market analysis and forecast based on a comprehensive study by FEV Consulting GmbH, shows that with MY2017 all major OEM's have accomplished the EU-specified threshold for fleet average fuel consumption [1].

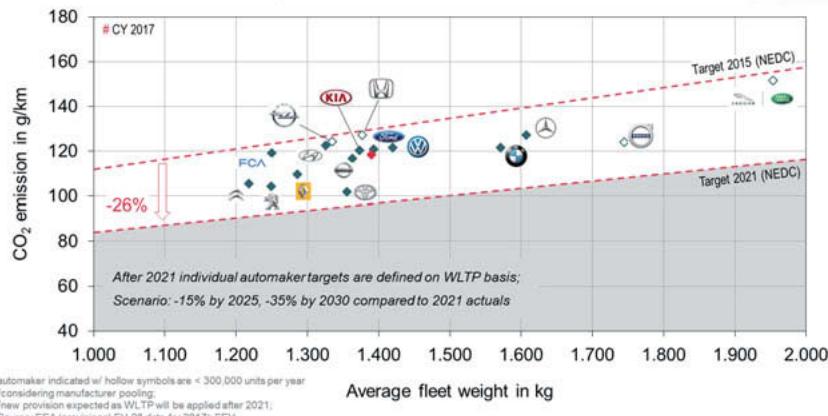
FLEET-AVERAGE PASSENGER CAR CO₂-EMISSION BY AUTOMAKER¹ IN EUROPE

Fig. 1: MY 2017 fleet average fuel consumption for major OEM

The target for 2021 foresees another reduction of approx. 25 % and it has recently been decided by the EU that the values for 2030 will be decreased by another 35 %. The achievement of such values will require a certain degree of electrification of powertrains. The only open question is therefore not whether electrification will be used, but in which form? FEV is continuously monitoring and surveying predictions for future sales shares between the different powertrain technologies updating predictions, in this picture shown by means of the European market for the horizon up to 2030.

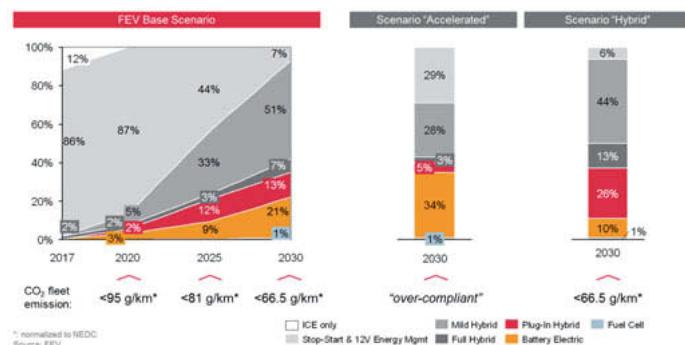


Fig. 2: European vehicle registrations in 2030 in different passenger car electrification scenarios

In this graph predictions for future sales shares for different scenarios are shown:

- Base: intermediate scenario, assumed to be most likely
- Over-compliant: based on customer demand legislative restrictions are even outperformed
- Hybrid: BEV will not achieve a decisive market penetration

So this is how the future distribution should look like to comply. The decisive factor however, is and remains the customer. The automotive industry will without any doubt provide the products to comply. But what if nobody will buy those products?

A McKinsey study (Fig. 3) [2] revealed that most people are familiar with electric vehicle but when it comes to the actual purchase it is noticeable only a marginal percentage is actually buying such vehicles.

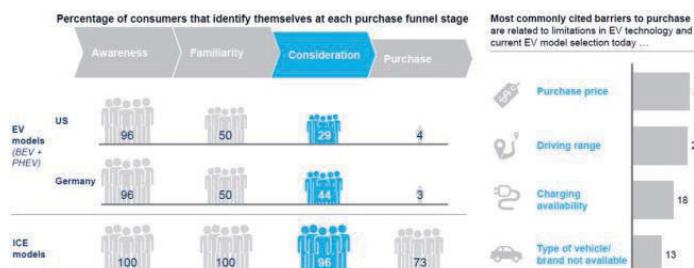


Fig. 3: What are the main reasons customers are not buying electric vehicles?

It is currently highlighted, that OEM simply do not have enough battery electric vehicle (BEV)-models for customers to choose from. Also very well covered within the daily press is the lack of charging infrastructure. Long charging times (compared to gasoline re-fueling) are also not considered to be very comfortable, so one major reason not to choose BEV remains the driving range. A logical solution for the limited action radius is to increase the battery capacity. But this will be conflicting with one other main reason against purchase: Cost. This remains the most significant reason for people to decide against BEV purchase.

2. Range Extender (REX) Units

A solution for the lack of action radius as a reason against buying a BEV could be a driving range extender (REX) functioning as a kind of electricity generator in cases the battery gets depleted. Considering today's technology an internal combustion engine would be the logical

choice, however looking further into the future such solution based on a fuel cell must not be ruled out!

2.1 Requirements to a range extender engine

Fig. 4 shows the necessary driving power for steady state driving in correlation to speed (vehicle class C and D) and road inclination.

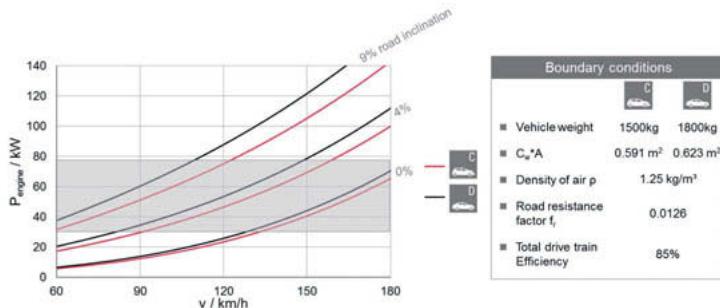


Fig. 4: Analysis of necessary power for stationary drive

Depending on strategy, customer/brand demand and vehicle characteristics FEV believes the power range for the majority of REX engines will be between 30 and 75 kW. For cost and package reasons REX concepts in that power class will be inline 2, inline 3 as well as V2 concepts. All concepts are available and eligible to discuss and have their own advantages and disadvantages. The inline concepts for instance promise benefits with regards to commonality, cost and weight, whereas the V concept has some very distinct package properties almost mimicking a circular perimeter and additionally shows excellent vibration properties with low resulting mass forces making a balancer shaft arrangement abundant.

2.2 Prioritization of further requirements

Compared to a conventional powertrain ICE the prioritization of requirements such as fuel consumption, package, weight, NVH and cost is quite different for a Hybrid or REX unit [3], [4]. For instance cost, NVH and package could be prioritized higher as Fig. 5 explains.

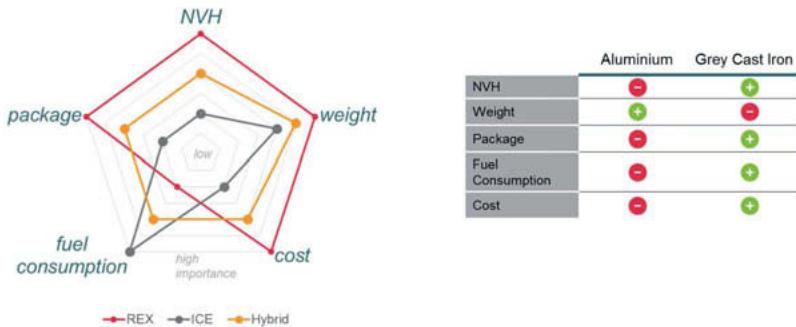


Fig. 5: Comparison of requirements for internal combustion engines [5]

The REX is an additional power source so it has to be cost effective and compact since it exists alongside the additional electrical components. In normal case it will be used very rarely, hence fuel consumption might have a lower priority to the consumer. Vehicle weight is always a topic and also here the REX is add-on. But BEV are equipped with a large battery pack putting significant weight to the scale anyway, so maybe a clever application makes this criterion somewhat less important.

Comparing the properties of aluminum and grey cast iron the latter is superior in most categories except weight. The following questions arise:

- How significant is this weight difference?
- What is the impact of the weight on the REX application?

The benchmark data of FEV data about block structure weight vs. displacement (Fig. 6) supports the presumption that the weight difference of the cylinder block structure will decrease towards lower displacement values.

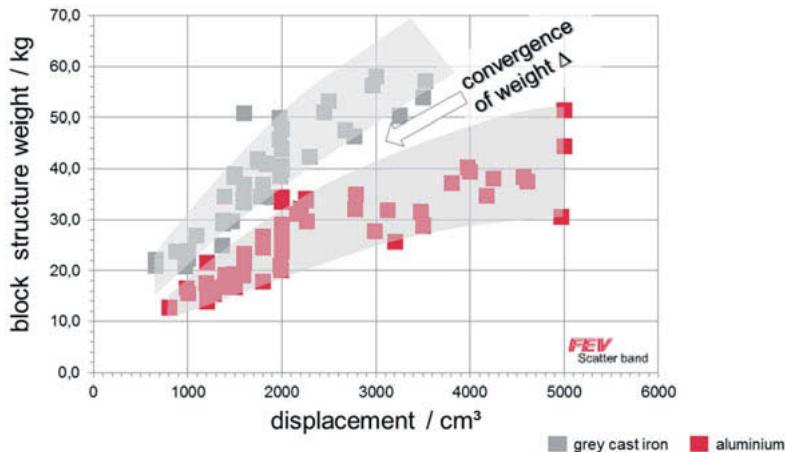


Fig. 6: Weight benefit of aluminum decreases in conjunction with displacement

Of course the actual weight difference would also depend on further properties like engine specific load, cylinder number or build concept (inline or V).

So we have decided to investigate if grey cast iron is a good choice for the use in small displacement REX engines. For this investigation the V-REX concept has been chosen since it is expected, that this particular V-concept will be the worst case, meaning the weight difference after the switch to grey cast iron will be higher.

2.3 Introduction to a dedicated REX concept (V2)

In 2011 FEV and Rheinmetall (formerly KSPG) presented a concept for a V2 range extender and demonstrated it to fit into the spare wheel well of a Fiat 500 vehicle [6]. This could be achieved by an ultra-compact concept, characterized by vertically installed engine and use of double generators arranged beneath the cylinder heads creating an almost circular perimeter maximizing the use of the package space available.



Fig. 7: FEV / Rheinmetall VREX Design [6]

Furthermore the concept is characterized by extremely low vibrations since it uses a full compensation of the engine rolling moments by counter-rotating generator inertias based on an FEV invention (FEVcom) [7]. This concept has impressively demonstrated its superior NVH behavior by reducing the vibrations during load changes, especially during engine start and shut down to zero.

2.4 Design concept of VREX cylinder block structure

During the initial aluminum based VREX design it has been a target to achieve the stiffest and most rigid block structure possible to improve the NVH behavior even further. The concept is characterized by an integration of the generators within the cylinder block. With this concept the molding direction is being fixed in crank shaft direction resulting in the necessity for a closing plate containing the 2nd crank shaft bearing. This concept is depicted in Fig. 8.

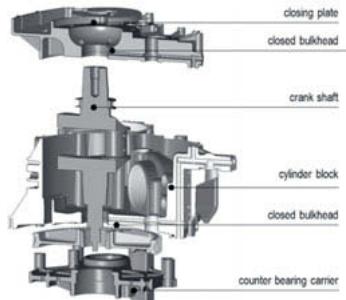


Fig. 8: Structure of V-REX crank shaft bearing

Disadvantages of such a design are the necessity of a closing plate incl. crank shaft bearing leading for instance to material congregation and assembly difficulties.

3. Results of the assessment

3.1. Assessment of material influence on manufacturing costs

The manufacturing costs for the CGI block are lower compared to the aluminum high pressure die cast design mainly due to lower raw material costs, which will partly be compensated by the risen machining costs. Fig. 9 shows the analyzed resulting powertrain costs (including all that is necessary for the additional use of the ICE in an electric vehicle).

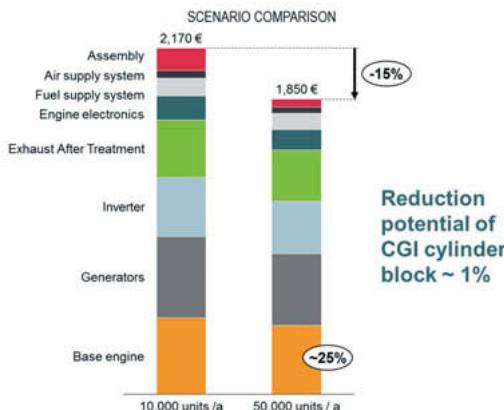


Fig. 9 Cost analysis of REX Powertrain and Cylinder block

Of course this value is significantly depending on the production volume of the REX application and will decrease when the production volume is increasing. In this example production costs for a production number of 10.000 units and 50.000 units per year have been determined to a range of 1.850 € (50.000 units/a) to 2.170 € (10.000 units/a).

Looking at the distribution of the powertrain cost it can be seen that the share of the base engine is roughly 25% of which the share of the cylinder block is about 20%. The cost advantage of the switch to grey cast iron is estimated to result in approx. 20% piece cost reduction, so the leverage for the complete REX unit is approx. 1%, which equals approx. 18,50-22 € / REX unit.

3.2. Assessment of material influence on package and fuel consumption

The change to grey cast iron also has some positive impact on engine fuel consumption and package. The package benefit is basically resulting from 2 effects:

- Reduced wall thickness

- Reduced cylinder outer diameter and cylinder pitch distance because of omitting the cast-in liner

Since REX engines will have low cylinder numbers however the actual result of these benefits is marginal, in case of the V2 engine focused in our investigation, there even is no cylinder pitch distance to reduce.

The benefit of the grey cast iron block in fuel consumption is resulting from the difference in thermal expansion of those materials. Due to its higher thermal expansion the bearing clearance of the aluminum block will increase by approx. 35 μm from ambient to operating temperature. This leads to an increase of engine oil consumption and a worse bearing behavior. In this area grey cast iron has an indisputable advantage and however the actual benefit is not huge it still lies in the area of 0,1-0,2 % at rated power according to rough calculations.

Furthermore heat-up behavior of the grey cast iron block is favorable so the engine liner will reach operating temperature faster reducing fuel consumption. However this advantage is not substantial and has not been quantified for this study.

3.3. Modifications of the cylinder block towards grey cast iron

For this investigation the heaviest component of the block structure has been taken and transformed from an aluminum die cast design to a sand cast grey cast iron design. The initial design result is shown in Fig. 10.

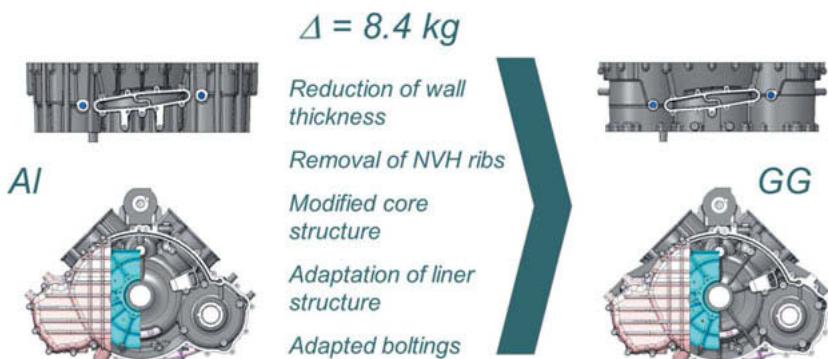


Fig. 10: Modifications to block design

During this adaptation of the design the obvious parameters such as wall thickness, draft angles and undercuts have been adapted to the new manufacturing procedure.

3.4 Influence of grey cast iron on the NVH behavior

While both aluminum and grey cast iron have their strengths and weaknesses, grey cast iron has properties clearly beneficial to the NVH behavior of the crank case and the engine assembly. Higher stiffness usually is compensated by higher mass but the higher damping properties of grey cast iron put this material in advantage versus its aluminum alternative regarding the vibration response to structural excitations. A second advantage is that other parts on the engine necessarily need to be made from iron/steel (e.g. crank shaft). For NVH this is especially relevant if clearances are influenced by different thermal expansion coefficients that lead to relative motion if the engine temperature changes.

Surface radiation

To evaluate the influence of the material choice on the structural dynamics properties, the finite element method is applied. Both the crankcase from aluminum and the crankcase from grey cast iron are meshed and the resulting models analyzed for their modal behavior. Consecutively, the models are excited with a force input representative of combustion excitation. The models' response in form of surface vibrations is evaluated. A certain number of analysis points on the outer surface are weighted with their corresponding area share. The weighted sum of these surface velocities gives an indication of the expected noise radiation and can be used to compare the structures' NVH performance. This approach – calculation Eigen modes, exciting the model with combustion forces and calculating weighted sums of surface velocities – is a standardized approach of FEV named FEV-DIRA (Dynamic Impact Response Analysis).

Fig. 11 shows the model of the aluminum crankcase. The number of elements is 213.000. The excitation force is introduced into the model at the first crankshaft main bearing.

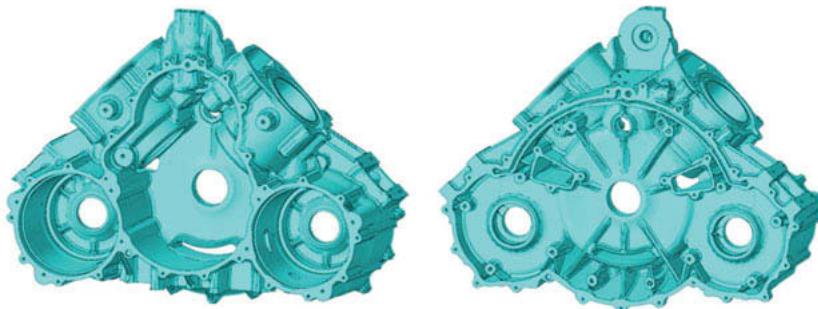


Fig. 11: Model of aluminum crankcase

First, only the material is substituted for a direct comparison. For the simulation, a damping coefficient three times higher than that of aluminum was considered – a value on the bottom end of the range given in the literature about damping properties of metal alloys. Fig. 12 displays the structure responses (surface velocities) in form of third-octave spectra and narrow-band spectra. The advantage of grey cast iron is obvious in overall level (- 10,1 dB) and level of the individual modes.

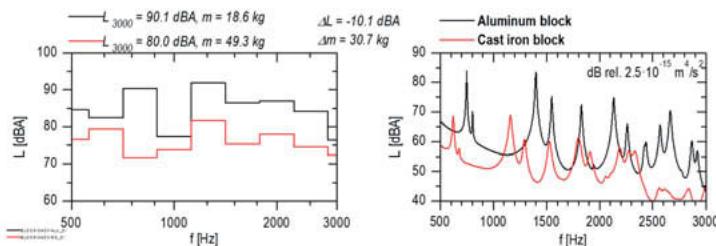


Fig. 12: Comparison of aluminum and grey cast iron, identical design without material-related design adaptions

Of course, a simple material substitution is not very representative because of the high weight penalty of more than 30 kg. In a second step, the grey cast crankcase with material-considerate design is modeled and analyzed in the same way. The model is shown in Fig. 13, the results of the DIRA calculation are presented in Fig. 14.



Fig. 13: Model of grey cast iron crankcase

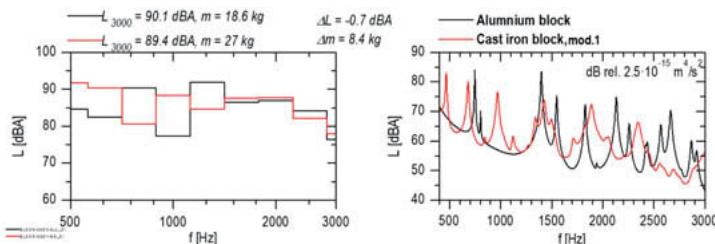


Fig. 14: Comparison of aluminum and grey cast iron, design with material-related design adaptions

Thinner walls and reduced ribbing lead to elevated surface velocity levels. The first iteration that eliminated all NVH-related ribbing, however, leads to vibration levels still slightly lower than those of the aluminum crankcase.

Analysis of the dominant mode shape shows that distinct breathing modes especially of the generator housings dominate the overall vibration level (see Fig. 15). These thin-walled structures apparently are too weak without ribbing for grey cast iron as well as for aluminum.

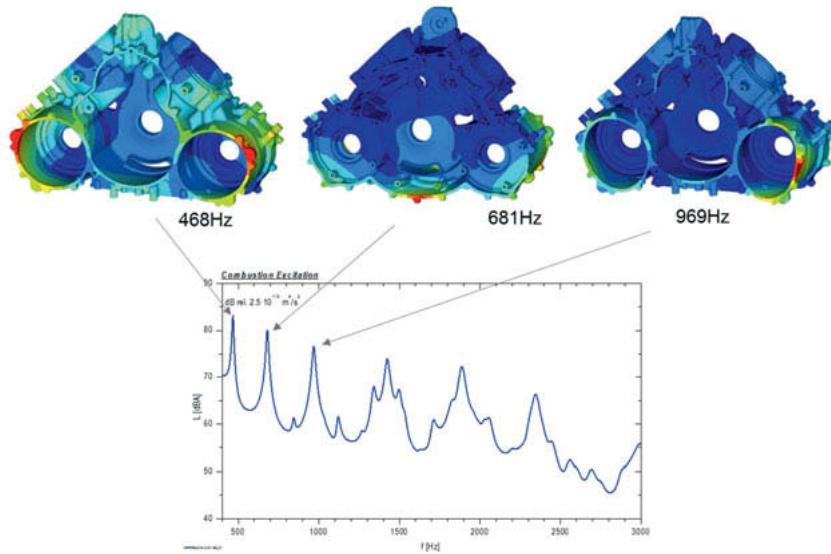


Fig. 15: Dominant mode shapes

Targeted optimization starts here. Ribbing is introduced to hinder precisely the dominant mode shapes. This way, the vibration behavior can be improved with limited additional mass to close the gap to the aluminum design with significant ribbing. Fig. 16 shows the updated model.

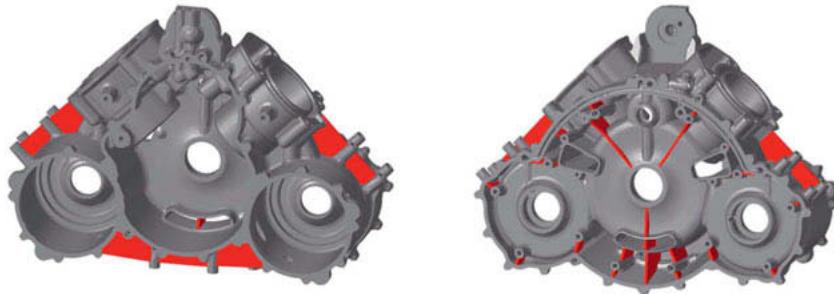


Fig. 16: Added ribbing to target dominant mode shapes for the grey cast crankcase

With the added targeted ribbing, the vibration level can be reduced by ~ 4 dB, leading to a considerable advantage of 4,6 dB over the aluminum design (Fig. 17) while still retaining a moderate weight increase of 9,1 kg.

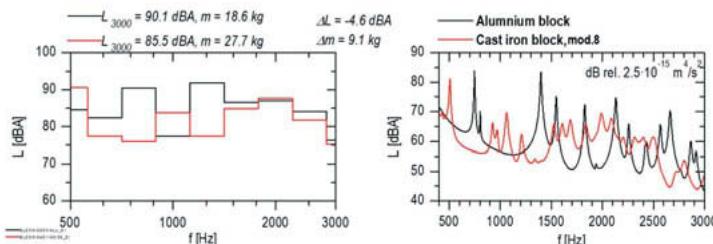


Fig. 17: Vibration levels for aluminum design and updated grey cast iron design

Fig. 18 shows the vibration distribution for both crank cases. The advantage of the grey cast version are obvious on the cylinder liner and on the bottom flange. However – like for many engines – the oil pan is expected to be the main noise radiator and should be target for future optimization.

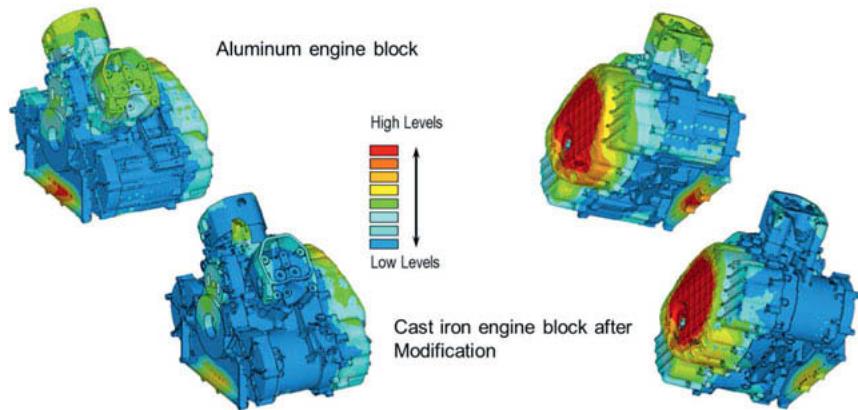


Fig. 18: Surface velocity distribution

Backlash reduction

A number of engine subsystems can be driven by gear pairs or gear trains. In FEV's FEVcom design, using gears is mandatory to achieve reversal rotation of the generators. For safe operation of gears, a certain minimum backlash is necessary to avoid jamming. In combination with cyclic speed fluctuations – which are unavoidable because of the engine's intermittent operation principle – rattle noise can occur if at a given time the torque between two gears changes its direction. The magnitude of rattle noise is influenced by a number of parameters. One important parameter is the amount of backlash. The larger the backlash, the longer the two gear partners can build up relative speed before contact is reestablished and the relative speed energy is discharged during the impact.

Backlash layout in gear trains should be as small as possible to improve NVH, but need to cover geometrical tolerances and thermal expansion. For the latter, choosing grey cast iron is very advantageous because for an iron crankcase, the thermal expansion from cold temperature to warm operation equals that of the gears. No relative displacement has to be considered. Without further detailed investigation this effect is not quantifiable, but it is clear, that grey cast iron will improve this in any case.

3.5. Resulting weight of the re-designed cylinder block

The resulting weight increase of the cylinder block after the substitution was 8,4-9,1 kg – this is in line with the expectations at the beginning of this study based on the converging trend line curves.

Furthermore this initial investigation with regards to the material substitution only considered the central part of the cylinder block structure without further changes that might be possible, like for instance bearing concept etc. Briefly executed simple design studies show some promising further potential for weight reduction, however in order for this comparison to be fair also additional NVH simulations to make sure both concepts are at least equal in terms of surface radiation and power train stiffness need to be executed in parallel.

The REX with grey cast iron block is heavier, but the question remains whether this is a problem outweighing the other benefits. This we investigated and tried to answer in the next chapter.

4. BEV with or without REX unit?

In its purest definition the purpose of a REX engine in an electric vehicle is to guarantee that the destination can be reached even in case of a depleted battery. This will reduce the driving range anxiety many drivers of an electric vehicle with limited range might have, so just the knowledge that in such cases a REX is available will reduce the need for bigger battery packs as larger safety margins against battery depletion.

A second aspect could actually be even more attractive for using a REX: the energy consumption of vehicles will increase disproportionately with engine speed mainly due to air drag resistance as Fig. 19 depicts.

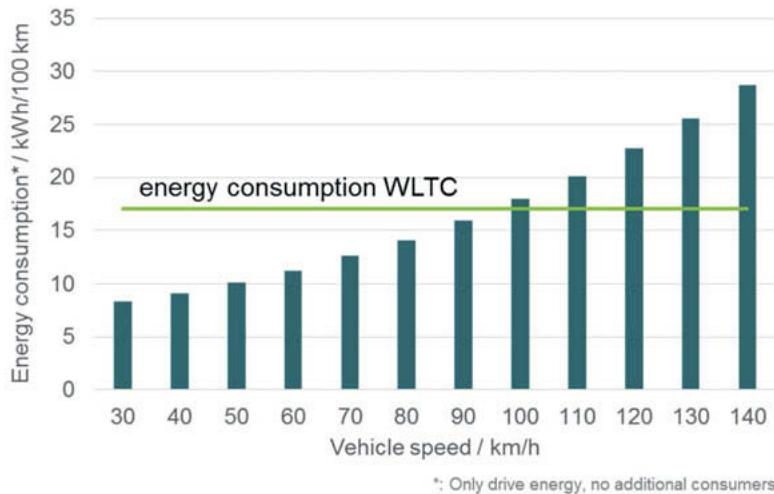


Fig. 19: Driving energy consumption vs. vehicle speed (example C-class vehicle)

Driving under such conditions will lead to a depleted battery much sooner, because the energy consumption at 130 km/h is for instance approx. 60% higher compared to the average WLTC value. A REX programmed not only to work below a certain state of battery charge but also above certain vehicle speeds will be able to make the consumer feel much more comfortable and reduce worries like for instance:

- Are there enough charging stations along the route?
- Do I need to plan a longer duration for this trip due to charging events?
- Do I need to consider a reduced high-way driving speed to maximize my range?

The driving range of many newly launched full electric vehicles is progressing beyond 450 km (according to WLTC) to meet the customers' expectations [8]. The average WLTC speed is 46 km/h so the question occurs: Will anyone actually drive this range in a single day? Since this would take more than 10 hours it leads to the conclusion that the majority of driving range above 80-100 km per day has to involve driving on high-way, where at reasonable speeds the maximum driving range based on battery delivered energy would decline significantly. This results in the insight that the installed battery capacity above a certain driving range actually is becoming less efficient in terms of km / € or km / kg and for most consumers is a sort of safety margin and would not even be used very regularly. So why not replace the battery oversize by a REX?

To find out what this would mean we decided to compare pure BEV and BEV with REX in a simplified scenario with regards to weight and cost. It has been assessed how much battery size needs to be sacrificed in favor of the REX application, based on several scenario predictions for the year 2025. As a starting point a BEV with a battery pack of 80 kWh and an equivalent WLTC range of 500km was assumed. The investigation took place under the following boundary conditions:

- Specific cell cost between 70 and 85 €/kWh (Pack to cell factor 1.25 to 1.3)
- Energy density between 200 and 300 W/kg
- REX unit manufacturing cost: 2.170 € (10.000 units / a)
- REX unit weight: ~171kg

The electric drive range which needs to be sacrificed is depicted in Fig. 20.

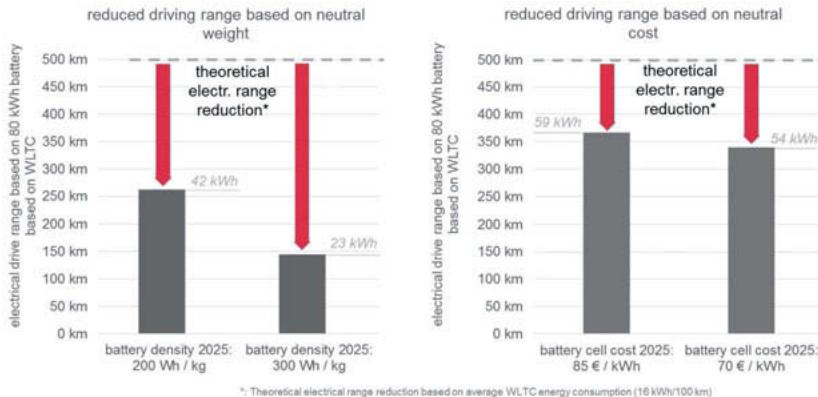


Fig. 20: Influence of battery size on cost and weight of battery pack, considering different scenarios for the future development of specific density and price

The amount of battery size which needs to be sacrificed in favor of the REX if the premises is, that the vehicle weight should stay the same is 38 to 57 kWh translating to a reduction of approx. 240-355 km electrical driving range.

Looking at a cost neutral application the battery pack size to be sacrificed to afford a REX would only be between 21-26 kWh resulting in a decreased electrical drive range of 135 and 160 km (presuming the development scenarios mentioned above).

So let's assume we are led by weight neutrality the battery pack needs to be decreased to 23 kWh. Doing this will give a significant potential for cost reduction as explained in Fig. 21.

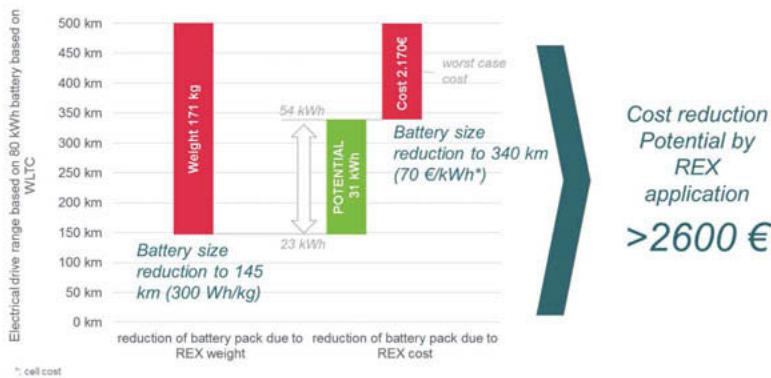


Fig. 21: Influence of battery size on cost and weight of battery pack, considering different scenarios for the future development of specific density and price

If we assume a resulting battery size of 23 kWh which would correspond to 145 km maximum electrical reach, it means that 57 kWh of the initial battery size could be omitted. Taking the analyzed REX cost into account this leads to the conclusion, that at least 2.600 € could be saved by applying a REX and decreasing the size of the battery pack.

Following the same approach the electrical range has to be reduced only by 15 km (~2,5 kWh) more if grey cast iron is used as a block material and the REX engine unit weight increases to 180 kg. The additional benefit being, that also the cost of the vehicle is reduced by a further 250 € resulting from a smaller battery and less cost for the block. Keeping in mind that a daily 100 km electrical drive range will be sufficient for most customers [9] there will even be some margin potential left.

Returning to the evaluation of grey cast iron cylinder block: basically the only criterion in favor of aluminum is put into perspective, but as always it remains a matter of balancing the pro's and con's. Or has something changed? The vehicle weight is no longer only looked at bottom up. Because of the introduction of high capacity battery packs increasing vehicle weight significantly in the first place, there is actually something to balance the increase weight due to grey cast iron against. Furthermore electrification allows recuperation of kinematic energy while braking reducing the importance of weight. The balance might tip over towards grey cast iron.

5. Summary

To achieve future legislative requirements a certain extend of electrification is mandatory, but in the end customers will determine whether the products are appealing enough to be purchased. Range extender engines can help get rid of the main “hold-backs” to purchase BEV: driving range and purchasing price.

To compensate the REX weight about 57 kWh battery pack needs to be sacrificed, decreasing the electrical drive range to 145 km, still plenty more than the average daily driving distance the majority of consumers require. Taking a future scenario of 70 €/kWh cell-cost in 2025 into consideration it was determined, that a cost reduction potential of more than 2600 € can be achieved if a 500 km electrical range BEV is replaced by a 145 km electrical range BEV with added REX. If a further 15 km electrical range (corresponding to ~9 kg battery weight) would be given up a grey cast iron cylinder block could be applied gaining an extra 250 € of cost reduction potential (base engine + battery).

Acknowledgements

We would like to thank Michael Kauth, Benjamin Knobloch, Alexander Koch, Andreas Balazs, Jürgen Knauf, Andreas Schulte, Zbigniew Malek, Shahrouz Nourbaksh and Christoph Nussmann whose dedication and valuable technical advice has contributed significantly to this publication.

References

- [1] Wittler, M., Wiantalla, A.: FEV Consulting – Management Report on Powertrain Market Shares 2018 - 2030 for Europe, USA and China, Aachen, 2018
- [2] McKinsey Sustainable Mobility Initiative – 2016 Electrified Vehicle Consumer Surveys
- [3] Scharf, J., Ogrzewalla, J. et al.: Gasoline Engines for Hybrid Powertrains - High Tech or Low Cost? 38. Wiener Motorensymposium, 2017
- [4] Grzeschik, P., Scharf, J. et al.: A modular base engine architecture for 48 V mild hybrid applications. SIA Powertrain 2017
- [5] Uhlmann, T., Balazs, A. et al.: Dedicated Range extender and series hybrids. 8th Aachen Colloquium China Nov. 2018
- [6] Andert, J., Köhler, E. et al.: KSPG Range Extender – a new pathfinder to electro mobility. MTZ 05 2012
- [7] Pischinger, M., Wittek, K et al.: V2-Range Extender Module with FEVcom – a Barely Noticeable Companion in Your Electric Vehicle. 20th Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2011
- [8] ARAL AKTIENGESELLSCHAFT - Trends beim Autokauf 2015
- [9] Sommer, K: Continental-Mobilitätsstudie 2011, Hannover 2011

Hocheffiziente Fertigung von Druckgussmotorblöcken am Beispiel eines Großserien-Vierzylinderblocks

Highly efficient Production of High Pressure Die Cast Large Volume 4 Cylinder Engine Blocks

Dr.-Ing. Heinrich Fuchs, Abilio Ferreira, Hans-Jürgen Spychala,
Martinrea Honsel Germany GmbH, Meschede

10. VDI Wissensforum Tagung Gießtechnik im Motorenbau 2019

Autoren:

Abilio Ferreira, Heinrich Fuchs, Hans-Jürgen Spychala
Martinrea-Honsel Germany GmbH Meschede

Hocheffiziente Fertigung von Druckgussmotorblöcken am Beispiel eines Großserien- Vierzylinderblocks

Highly efficient Production of High Pressure Die Cast Large Volume 4 Cylinder Engine Blocks

ZUSAMMENFASSUNG

Großserien Druckgussmotorblöcke müssen höchste Leistungsanforderungen erfüllen und äußerst wettbewerbsfähig und effizient produziert werden. Die Basis dafür wird in der Entwicklung der Bauteile gelegt.

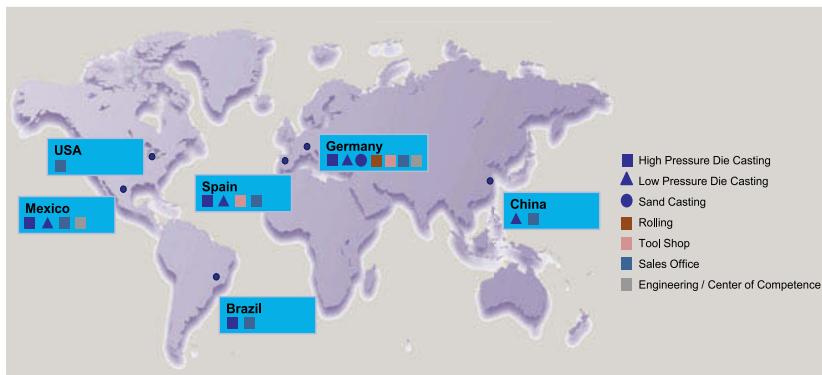
Der wichtigste Baustein zur Erfüllung der genannten Forderungen ist eine optimal fertigungsgerechte Konstruktion, die natürlich die Funktionalität des Teils berücksichtigen muss. Ein wesentliches Werkzeug dazu sind die Füll- und Erstarrungssimulation. Da auch heute noch viele Großserienblöcke mit Graugusszylinderrohren – einer bewährten Technologie – versehen werden, fällt der Simulation der Eigenspannungssituation in den Blöcken eine wichtige Rolle zu, um die Gesamtfestigkeit des Systems zu entwickeln. Dazu kommt die Dimensionierung der Formen, bei der heute zunehmend CAE- Methoden eingesetzt werden:

Simulation: Füllung – Erstarrung
Dimensionierung der Formen
Reduzierung Eigenspannungen

Vakuumdruckguss-Verfahren:

Micro Spray
Konturnahe Kühlung: einschließlich Wassermäntel und Jet Cooling
kürzeste Taktzeiten
höchste Nutzungswerte bei hervorragender Qualität

Die Maßnahmen zur Erzielung optimaler mechanischer Eigenschaften werden beschrieben.

CONTENT**Brief Introduction to Martinrea-Honsel****Series Production Processes for Engine Blocks****Development Process****Production Process****Process related Properties: Features/Materials Properties****Summary – future Potential****MARTINREA HONSEL – GLOBAL PRESENCE**

CASTING PROCESSES FOR ENGINE BLOCKS - SCHEMATIC

	Schematic	Typical Alloys	Complexity/ Wall Thickness
Sand Casting		AlSi7Mg [T6]	All degrees of freedom/ min. 2 mm
Permanent Mould Casting		AlSi7Mg [T6] AlSi8Cu3 [T6]	All degrees of freedom/ min. 4 mm
Low Pressure Die Casting		AlSi7Mg [T6] AlSi8Cu3 [T6]	All degrees of freedom/ min. 4 mm
High Pressure Die Casting		AlSi8Cu3 [T5] AlSi10MnMg [T6]	Only limited inner cavities/ min. 2 mm

CASTING PROCESSES FOR ENGINE BLOCKS - SCHEMATIC

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

FORD „MAVERICK“ I4 PETROL ENGINE BLOCKS – HPDC CASTING

FORD I4 (Maverick)

Raw Part 25,0 kg
Cubed 24,0 kg
Finished 23,2 kg



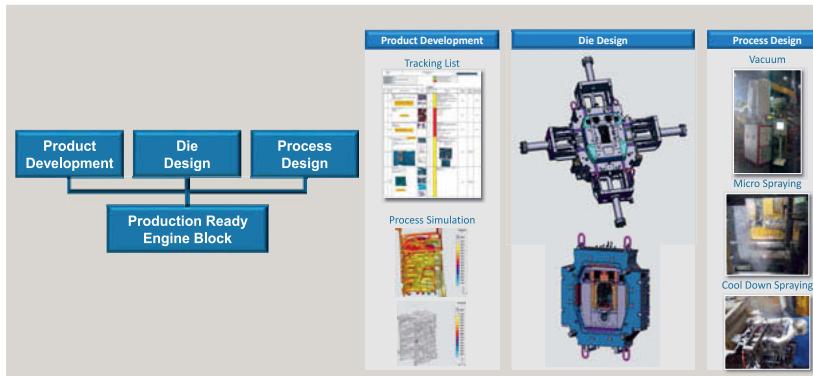
Advantages

- Low Cycle Times
- Low Cost
- MRH is the Market Leader for HPDC Blocks



High Pressure Die Casting Cell

PRODUCT AND PROCESS DEVELOPMENT ENGINE BLOCK



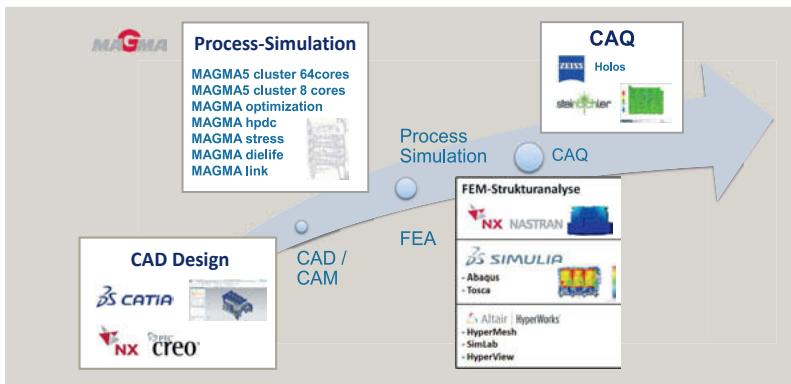
PRODUCT DEVELOPMENT: WORK FLOW

Target: optimum Design for Manufacturing → to fulfill all Customer Requirements

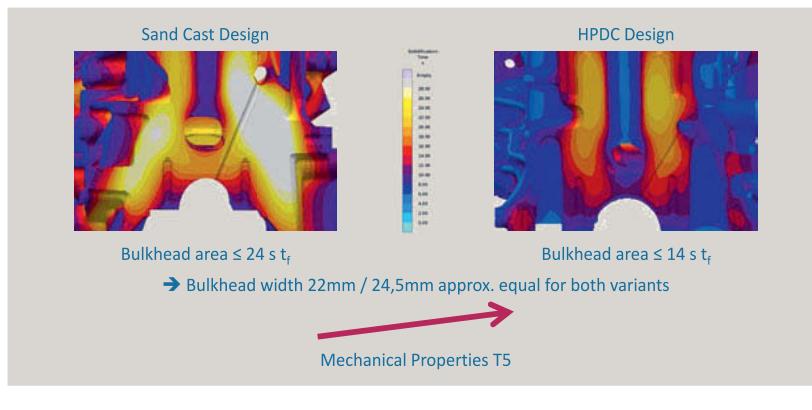
Process: stringent Tracking by Development Protocol



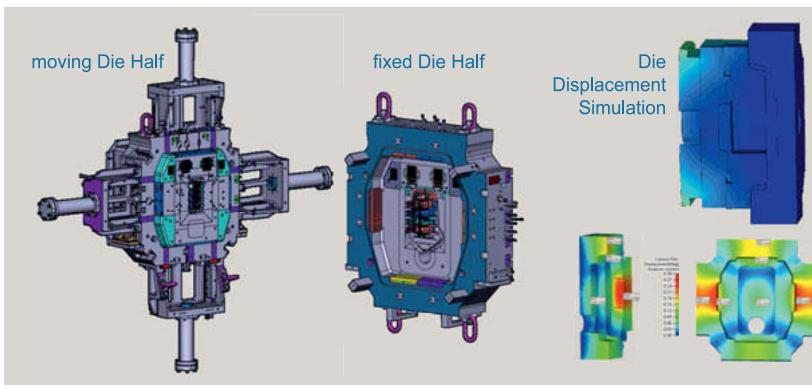
PRODUCT DEVELOPMENT: CAx- ENVIRONMENT AND PROCESS FLOW



PRODUCT DEVELOPMENT: SOLIDIFICATION TIMES IN ENGINE BLOCKS PRODUCED IN DIFFERENT PROCESSES



DIE DESIGN AND VERIFICATION



CASTING PROCESS: VACUUM ASSISTED FOR LOW GAS POROSITY LEVELS AS STANDARD

- Flow test of each die valve and chill block before production run
- Leakage test total system before production run
- Data retrieval for total- and single volumes in defined tolerance limits
- Check and retrieval of all flow resistance values in defined tolerance limits
- Specially adjusted thermal controlled shot sleeve and ring plunger for vacuum casting



PROCESSES INNOVATIONS

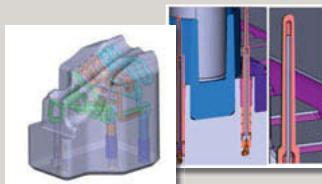
Micro Spray Technology:

- Improvement of Casting Surface
- Extension of Die Life up to ca. 120k Shots
- Improved Mechanical Properties



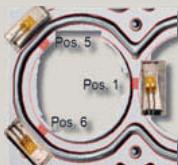
Improved internal Cooling:

- Near net Shape Cooling (NNSC)
- Jet cooling in crucial Core Pins
- Cooled Water Jackets
- Reduced cycle Time



ENGINE BLOCK TEST&CHECKS DURING DEVELOPMENT

Residual Stresses and max. Load Stress around Liners



Requirement	Location	Preparation	Tool	Comment
Residual stress	internal at MRHG	- cut part	- DMS	- check regarding section method - Bond liner / casting
Casting structure around liner	internal at MRHG	- without	- hydraulic press	- shows the weakest area - expose casting imperfections



ENGINE LOADS IN CURRENT BLOCKS – MATERIAL PROPERTIES HPDC & – INFLUENCE OF DESIGN

Engine Loads

Type	P _{max} (bar)	Cyl. Ø (mm)	Af/mm ²	Load kN	Casting Process
1 14 Diesel at MRHG	200	82	5278	105.6	HPDC
2 14 Petrol at MRHG	135	87.5	6030	81.2	HPDC
4 8 Petrol 1.5L	150	78	4776	71.6	HPDC
5 8 Petrol 1.5L	150	78	4776	54.6	HPDC
6 8 Petrol 3.0L	140	83	5408	75.7	HPDC
7 8 Petrol Mid High	125	83	5408	67.6	IPDC
8 8 Petrol Very High	135	83	5408	79.0	IPDC
9 8 Petrol Mid High	120	83	5408	61.0	IPDC
10 8 Diesel High	210	83	5408	111.6	IPDC
11 8 Diesel Very High	220	83	5408	119.0	IPDC
12 8 Petrol	120	83	5408	60.0	HPDC
13 8 Petrol	120	92.5	6217	80.6	HPDC
14 8 Petrol Mid High	137	83	5408	74.1	CPS
15 4 Petrol	150	83.9	5256	82.9	CPS

Example Engine Block Ford:

Design Change from Sand Casting
- Open Deck

- Material Accumulation
- Deep Skirt

MRH HPDC-Process

- Vacuum
- Micro Spraying
- T5 Heat Treatment

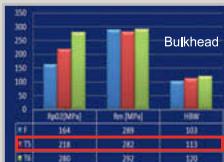
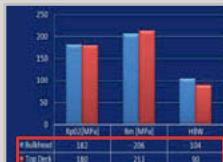
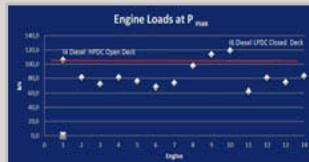
Example (confidential) Engine Block:

Optimized HPDC Design
- Open Deck

- Less Material Accumulation
- Split Middle of Crank Shaft

MRH HPDC-Process

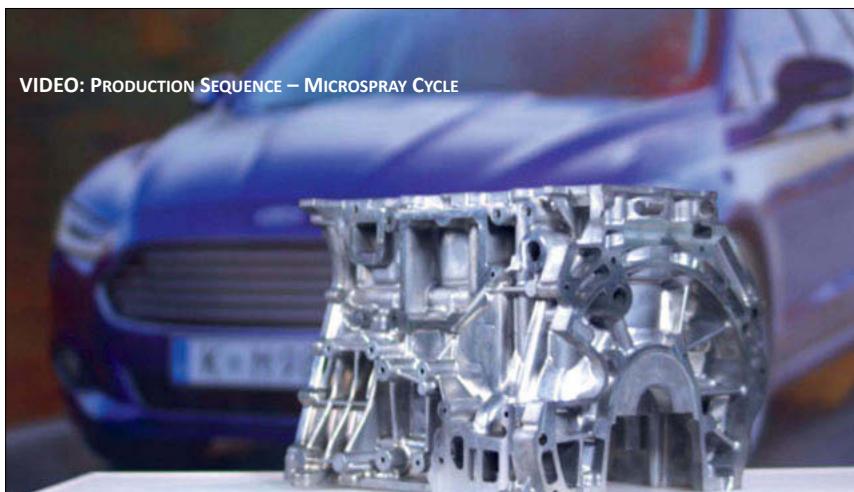
- Vacuum
- Micro Spraying
- T5 Heat Treatment

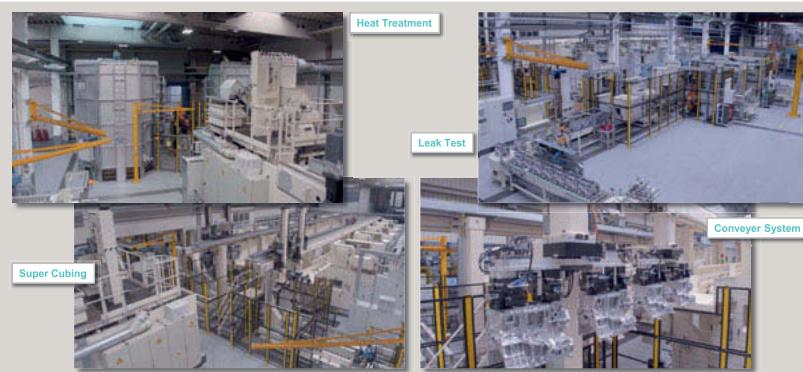


VIEW OF THE FOUNDRY



VIDEO: PRODUCTION SEQUENCE – MICROSPRAY CYCLE



LINE FOR HEAT TREATMENT / SUPERCUBING / LEAK TEST**CONCLUSION**

- **Preconditions for a smooth SOP and Volume Production:**
 - Capable Design
 - Capable Tooling
 - Capable Process
- **Performance :** **4 Months after SOP**
 - Utilisation **75 %**
 - Internal Scrap **4,8 %** (Target 6,0 %)
 - External Scrap **0,32 %** (Target 0,42 %)

Der neue Zylinderkopf BMW M4

Serieneinsatz von Additive Fertigung von Kernen

The new BMW M4 cylinder head

Serial production of printed sand cores

Dipl.-Ing. **Jean-Marc Ségaud**, BMW AG, Leichtmetallgießerei, Landshut;
Jens Pollack, BMW M-GmbH, München

Abstract

Der neue 6-Zylinder wird die höchsten thermischen Belastungen haben, die je ein BMW M Motor gesehen hat. Der Vortrag beschreibt die Anforderungen und die Entwicklungsschritte, die zu dem Serieneinsatz von generativ hergestellten Kernen geführt haben.

1. Mit konventionell geschossenen Kernen waren aus rechnerischer Sicht primär die TMF-Ziele nicht erreichbar.
2. Die 3D-Kerndrucktechnik erlaubt gestalterische Freiheitsgrade mit denen der Zylinderkopf aus rechnerischer TMF-Sicht als i.O. bewerten werden konnte.
3. Der Designfreeze zum Start der Serienwerkzeuge für konventionell geschossene Kerne wäre mit den generischen Meilensteinen der Terminplan nicht kompatibel gewesen.
4. Durch die 3D-Kerndrucktechnik waren Änderungen als Reaktion auf in der Phase nicht vorliegende Versuchsergebnisse, bis ca. 2 Tage vor dem Gießtermin möglich.

Das 3D-Kerndrucken war für den Serieneinsatz Neuland und stellte damit auch ein gewisses Risiko in der Industrialisierung dar. Die damalige Erkenntnisse zum Einsatz des 3D-Kerndruckens und die internen Einschätzungen zeigten keine unlösbarsten Probleme.

Da diese Technik zusätzliche Potentiale bietet u. a.:

- Nutzung der kleinen Serie als Befähiger für die Überleitung in die AG-Großserie.
- Potential zur Realisierung gesteigerter Literleistungen

Zur Beherrschung der hohen innermotorischen Belastungen, wurde die Herstellung der Zylinderköpfe mit gedruckten Kombikern aus Wassermantel und Auslasskanälen entschieden.

4S – gegossene Prototypen vom Seriengiesser in 2 Wochen

Cast iron Prototypes produced at a serial foundry within 2 weeks

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Ulf Schliephake**,

Josef Brechmann GmbH & Co. KG, Schloß Holte-Stukenbrock

Abstract

Kein alter Wein in neuen Schläuchen, sondern die Nutzung von 3D-Print-Techniken in einer Seriengiesserei – der Oberbegriff RAPID CASTING beschreibt die verschiedenen Varianten der indirekten Nutzung der additiven Fertigung in einer Eisengiesserei (3D-Print der Kerne und ggf. auch der Formen), um die üblichen Lieferzeiten für gegossene Prototypen von mind. 2 Monaten auf in günstigen Fällen 10 Arbeitstage zu verkürzen - und das in Geometrie und Fertigungsverfahren serientauglich und im Werkstoff Gusseisen, bei dem bisher die Kunden bzgl. Lieferzeiten im Produktanlauf nicht unbedingt „verwöhnt“ wurden. Damit stellen sich Seriengießereien bewusst im Gegensatz zu marktbekannten Prototypendienstleistern auf, die auf die schnellstmögliche Prototypenlieferung aus sind - ohne Rücksicht auf eine serientaugliche Gestaltung von Geometrie und Verfahren. Das Ergebnis sind seriennahe Prototypen vom Seriengiesser im Serienwerkstoff im Serienfertigungsverfahren ("4S").

No old wine in new hoses, but the use of 3D print techniques in a serial foundry - RAPID CASTING describes the indirect use of additive manufacturing (3D print of the cores and possibly also of the molds) to reduce the usual delivery times for prototypes made out of cast iron from at minimum 2 months to 10 working days in favorable cases - and that in series production and geometry and in a material, in which previously the customers were not necessarily "pampered" regarding the delivery times during the product startup. Doing this serial foundries consciously sets itself apart from market-known prototype service providers who are looking to deliver prototypes as quickly as possible, regardless of the design and geometry of the production process. The result is prototypes close to series standards from serial casting in series production in the serial mass production process ("4S").

1. Traditioneller Prozessablauf contra Schnelle Prototypen

Im üblichen Prozessablauf einer (Eisen-)giesserei stellt der Prozeßschritt Modellbau, d.h. Datenbearbeitung incl. Abstimmung mit dem Kunden und Fräsen der Außenmodelle sowie der kernbildenden Geometrien mit der Montage von Modellplatten und Kernkästen den terminkritischen Engpaß dar.

Was bisher zur Folge hatte, dass viele Kunden „der Not gehorchen“ ihre Prototypen aus Blechen zusammenschweißten oder gar „aus dem Vollen schnitzten“. Bis dato der einzige Weg, um (trotz zu später Bestellung des Endkunden oder verzögertem Ende des Design-Prozesses) noch pünktlich zur nächsten Messe, zum angekündigten Serienstart oder zum Start des Feldversuchs Realbauteile erproben/präsentieren zu können. Den großen zeitlichen Aufwand des Modellbaus zu reduzieren, stellt für Giessereien wie Kunden eine Möglichkeit dar, trotzdem schnell zu Prototypen aus dem Serienwerkstoff im Serienfertigungsverfahren zu kommen. Mit dem Printen der formgebenden Komponenten aus handelsüblichen Formsand, d.h. der Formhälften und Kerne können 6 Wochen Modellbau auf 5 Tage 3D-Print „eingedampft“ werden.

Allerdings sollte man eine Einschränkung beachten: für jedes Gussteil ist prinzipiell eine eigene verlorene Form notwendig - bei diesem Vorgehen können erhebliche Kosten anfallen, weshalb die Verfahrensvariante Printen der Kerne und konventioneller Bau eines Modells für die Außengeometrie des Bauteils kostentechnisch sehr interessant ist. Der Zeitbedarf steigt nur geringfügig, da im konventionellen Modellbau die Herstellung der Kernkästen den höheren Zeitbedarf aufweist.

Außerdem hat sich als ein Erfahrungswert aus zahlreichen Projekten gezeigt, dass sich im Projektverlauf die kundenseitigen Änderungswünsche in der Regel auf die Innengeometrie, die im Rapid Casting geprintet wird, beziehen, da Anschraubpunkte

und Bauraum (Außengeometrie) fix bleiben. Die Innengeometrie lässt sich bei solchem Vorgehen im Extremfall von Abguss zu Abguss variieren.

Der Verfahrensvorteil wird gravierend bei komplexen Kernpaketen, bei denen in Einzelfällen die additive Fertigung des Kernpaketes kostengleich mit der konventionellen Fertigung (oft mit Klebe- / Fügearbeitsgängen) ist - aber schneller und präziser (im Eisenguss mit CT8 statt CT10).



Bild 1: Fügen eines Kernpakets aus 7 unterschiedlichen Segmenten in einer Klebelehe

2. Indirekte Additive Fertigung

Grundsätzlich werden die Additiven Fertigungsverfahren in direkte und indirekte Verfahren unterteilt. Indirekt nennt man Verfahren, die im ersten Schritt schnell und geometrisch exakt generativ ein Urmodell / ein Werkzeug erstellen. In nächsten Prozessschritt wird das Urmodell konventionell in Bauteile mit definierten mechanisch-technologischen Eigenschaften abgeformt. Beispiele sind der Sand- und der Feinguss auf der Basis von verlorenen generativ hergestellten Formen und Kernen. Direkte Verfahren dagegen, die nicht das Thema dieses Beitrags sind, stellen das Zielbauteil i.d.R. aus Metall direkt im generativen Prozess her. Aber auch Glas oder Kunststoff sind mittlerweile mögliche Werkstoffe [1].

Basis des Verfahrens sind 3D-Datensätze, die als STL-files in einzelne dünne Schichten aufgelöst werden („gesliced“). Im eigentlichen Drucker wird auf der Arbeitsplatte eine extrem dünne Sandschicht (300 bis 500 µm) aufgebracht. Anschließend verklebt ein mobiler Druckkopf mit einem gießereitypischen Binder die Sandkörner überall dort, wo die Sandgussform / der Sandgusskern entstehen soll. Die Arbeitsplatte wird um eine Schichtsstärke abgesenkt und der Prozeß beginnt erneut, solange, bis die Sandform / der Sandkern fertig ist. Danach folgt das Post-Procesing oder profanter formuliert das Abfegen und Absaugen des losen Sandes, das sich bei filigranen Konturen durchaus als erheblicher Kosten- (und Zeit-)faktor darstellt.

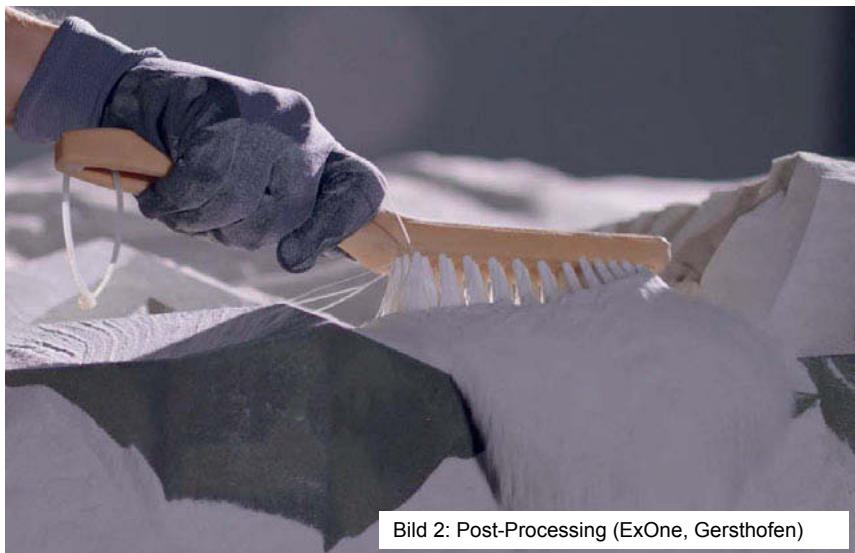


Bild 2: Post-Processing (ExOne, Gersthofen)

Ein ganz wesentlicher Aspekt gerade bei komplexen Geometrien springt dabei ins Auge. Fehleranfällige Fügeprozesse wie auch das Fertigen mit Losteilen entfallen und die oft aufwendige Nacharbeit wird auf ein Minimum reduziert. D.h. gerade für komplexe Bauteile (wie Pumpenlaufräder oder Impeller) in kleineren Losgrößen sind die Gesamtprozeßkosten gleich - und das bei höherer Präzision und geringerer Störanfälligkeit des Verfahrens [2].



Bild 3: Impeller - geklebt versus geprintet (Voxeljet, Friedberg)

Beachten sollte jeder Gießer den höheren Binderanteil (rund 10fach), der in geprinteten Formen und Kernen enthalten ist, und sich vorab Gedanken über den Gasstoß oder vielmehr über dessen Kontrolle und die Abführung der Gase machen. Da aber die Formstabilität geprinteter Geometrien hoch ist, können im Datensatz Gaskanäle eingebracht und geprintet werden. Ggf. kann man bei innenliegenden inneren Partien der Geometrie einfach auf den Binder verzichten oder Form bzw. Kern an diesen Bereichen hohl printen.

3. Prozeßkette und Projektablauf

Basis beider Projektablaufe ist der Bauteildatensatz, ggf. ergänzt durch eine Zeichnung, die u.a. Werkstoffangaben, Form- und Lagertoleranzen, kritische (Prüf-) Bereiche spezifiziert. Im Idealfall liegt der Datensatz bereits gußtechnisch angepasst vor – falls nicht, ist im Prototypenfall eine erste Klärung notwendig. Formschräge „Null“ und Hinterschneidungen sind beim Arbeiten mit geprinteten Formen und Kernen möglich, aber nicht serientauglich.

D.h. hier beginnt die Unterscheidung, was benötigt wird:

- Schnelle Prototypen (ohne Serientauglichkeit)
- Prototypen, die serienidentisch auf konventionellem Weg gefertigt werden können.
- Prototypenbauteile, die nur mit geprinteten Formteilen hergestellt werden können.

Zusätzlich stellt sich immer die Frage nach dem Prüfaufwand; eine 100-%ige Vermessung und eine komplette Erstbemusterung mit allen Materialkennwerten „verbraucht“ einige Tage. Genügt nicht die schnelle stichpunktartige Vermessung einiger Hauptmaße / einiger kritischer Maße? Denn die Erfahrung bei durchgängiger Nutzung der 3D-Datenkette zeigt, dass entweder alle wichtigen Maße gut oder aber fast alle schlecht sind - das bemerkt man schon nach den ersten 5 Maßen und kann sich Zeit im Projektablauf sparen. Die Vermessung von 80 Maßen bringt in diesem Zusammenhang nur wenig neue Erkenntnisse - oder keine.

Und wem hilft das akribische Herausarbeiten kleinsten Proben aus einem Bauteil zur Ermittlung häufig wenig sinnvoller Materialkennwerte wie der Kerbschlagarbeit von Sphäroguss [3], wenn auf dem Prüfstand das Teil hält und funktioniert?

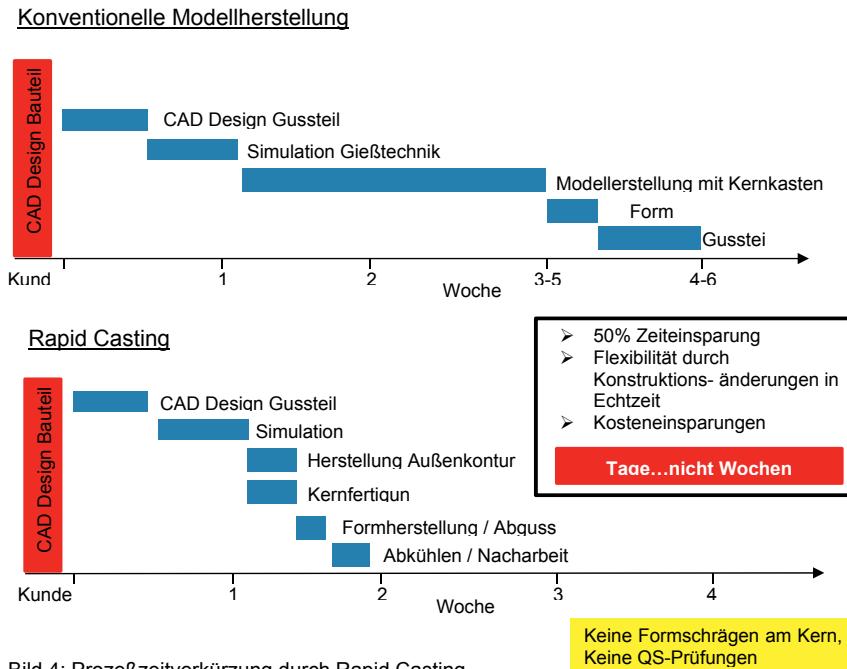


Bild 4: Prozeßzeitverkürzung durch Rapid Casting

Nach Festlegung des endgültigen Designs startet die Simulation der Gießtechnik, die aber für Prototypenprojekte eher großzügig u.U. auf Basis der im Rahmen der Kalkulation durchgeführten Simulationen erfolgen kann.

Das Printen der Form und/oder Kerne ist mit etwa 5 Arbeitstagen zu bewerten - ggf. zuzüglich des Transports von einem externen Dienstleister zum Giesser. Für Abguss, Abkühlen, Strahlen und Schleifen kann man von 2 Tagen ausgehen, wenn die internen Arbeitsabläufe entsprechend vorgeklärt sind.

Beim Serienfertiger, der nicht nur Prototypen sondern im Mehrschichtbetrieb Serienbauteile produziert, zeigt die Erfahrung, dass das Personal sensibilisiert (und ggf. die Auftragskennzeichnung bzw. selbst die Kennzeichnung der Arbeitspapiere variiert) werden muss, um „unfallfrei“ durch den Prozess zu kommen. Der seine Teile suchende Projektleiter gehört zu den betrieblichen Begleiterscheinungen derart unkonventioneller, neuer Fertigungsverfahren.

Schlußendlich liefert die Giesserei im „Serienverfahren Maschinenformguss“ unter Serienbedingungen produzierte serientaugliche Prototypen - keine mit div. Kunstgriffen prototypisch improvisierten Einzelabgüsse. Falls das Bauteil dann in Serie geht, ist auch ein Nullserienbedarf (oder eine Kleinserie für den Feldversuch) noch über 3D-Print-Kerne produzierbar (natürlich bei höheren Kosten) - die Erstellung der Serienkernkästen kann in Ruhe zeitlich parallel erfolgen. Die „verfahrensübliche Hektik“ bisheriger Neuteilanläufe entfällt.



Bild 5: Jedes Mal „ein kleines Abenteuer“ - das erste Einlegen eines geprinteten Kerns

4. Freiheit der Formgebung

“Der simple Nachbau eines konventionell gefertigten Bauteils ist eine Beleidigung für jeden, der mit 3D-Druck arbeitet. Denn die Vorteile liegen in den Möglichkeiten, die eine fast grenzenlose konstruktive Freiheit bietet“ [4].

Diese Aussage, die aus einem Übersichtsbeitrag zur additiven Fertigung stammt, zeigt ein Dilemma auf. Seit Jahrzehnten bemühen sich Giessereien ihren Kunden die “gießgerechte Konstruktion” (für die Serienfertigung) beizubringen, geben Technische Informationsblätter [5] aus, in denen mögliche Toleranzen, Formschrägen, geeignete Radien u.v.a.m. beschrieben werden, veranstalten Seminare und Kundenschulungen.

Und jetzt: Negative Formschrägen (sog. Hinterschneidungen) oder eine Formschräge von 0° sind mit geprinteten Formen/Kernen darstellbar. Es muss umgedacht werden [6].

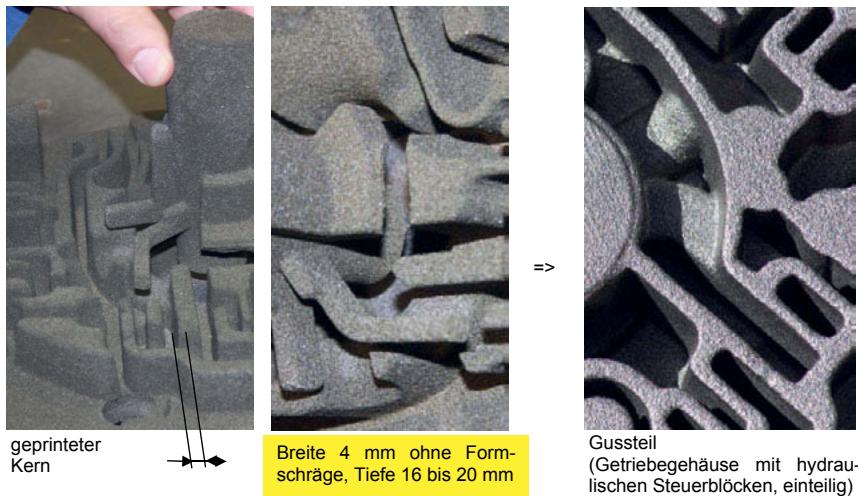


Bild 6: 3D-Print ermöglicht konventionell “nicht-giessbare” Geometrien

Das nur in Ausschnitten in Bild 6 gezeigte Gehäuse veranschaulicht die Möglichkeiten. Bei konventioneller Fertigung geht eine Kundengießerei üblicherweise von einem Querschnitt-Tiefen-Verhältnis von 1:1 für eine sichere, stabile Fertigung aus. Mit geprinteten Kerne ist bis zu 1:5 möglich. Gleichzeitig bilden sich querlaufende Kanäle von weniger als 1 cm Durch-

messer ohne Vererzungen oder Kernbruch aus. Konstruktive Details also, die jedem gestandenen Meister die Haare zu Berge stehen lassen. Aber, die Praxis zeigt: es geht. Bisher „Ungießbares“ wird plötzlich gießbar – ggf. auch extrem enge, bisher verfahrensbedingt nicht-mögliche Toleranzen. Denn konventionell werden häufig komplexe Kernpakete aus diversen Einzelkernen durch Kleben in einer Klebelehre (vgl. Bild 1) gefügt; die Toleranzkette wird mit jedem weiteren geklebten Kern länger und der interne Ausschuß in der Gießerei im gleichen Maße höher. Der Einsatz geprinteter Kerne für komplexe Innengeometrien stellt eine echte Alternative dar.

D.h. die “Additive Fertigung beginnt im Gehirn” [7] und darf sich nicht auf die Aufhebung konventioneller, tradierte Fertigungsrestriktionen beschränken. Denn die Freiheit der Formgebung ermöglicht krumme, durchbrochene Freiformflächen mit dahinter liegenden Hohlräumen - Geometrien, die fügendenden oder spanenden Fertigungsverfahren i.d.R. verschlossen bleiben.

5. Bionik

Von Lilienthals Fluobjekten, über Klettverschluss, und Echolot bis hin zum Lotuseffekt – viele neuere technische Entwicklungen haben ihren Ursprung in Phänomenen aus der Natur [8]. Mittels Topologieoptimierung, d.h. einer lastfallangepassten gewichtsoptimierten Konstruktion schließt sich der Kreislauf (vgl. VDI 3405 [9] und VDI 6224 [10]).



Bild 7: Motorradschwinge
"Casting of the Year" des
amerikanischen Giesserverbandes AFS und der
Zeitschrift Metal Casting
Design & Purchasing [11]

Auf Basis von definiertem Bauraum, Belastungszenarien, Randbedingungen und überschaubar wenigen Fertigungsrestriktionen durch Giessen, bzw. nur noch ökonomischen Zwängen bei Nutzung der indirekten additiven Fertigung ergeben sich konstruktive Lösungen, die nur noch durch Giessen zu realisieren sind. Gelingt es, die bisherigen Systembrüche der meisten kommerziellen Programmpakete zu schließen, d.h. Lastanalyse, Topologieoptimierung und 3D-Datensatz für die Fertigung intern in einem sehr schnellen Ablauf miteinander zu führen, werden große Potenziale nutzbar. Bislang stellt die aufwändige Datenübergabe von einem Rechnerprogramm zum nächsten und die mühsame Rückkopplung der Daten auch aufgrund des Zeitbedarfs und des persönlichen Arbeitsaufwandes noch eine echte Hemmschwelle dar. Andererseits sind die in Entwicklung befindlichen Programmsysteme zur Topologieoptimierung [12] für den direkten 3D-Druck einfach auf die indirekte Fertigung zu übertragen und die Fertigungsrestriktionen des metallischen 3D-Drucks durch die werkstoffabhängigen gießtechnischen Restriktionen auszutauschen. Im Endeffekt bricht man „einfach“ mit Hilfe der entsprechenden Restriktionen die automatisierte rechnergestützte Optimierung ein paar Rechenschritte eher ab.

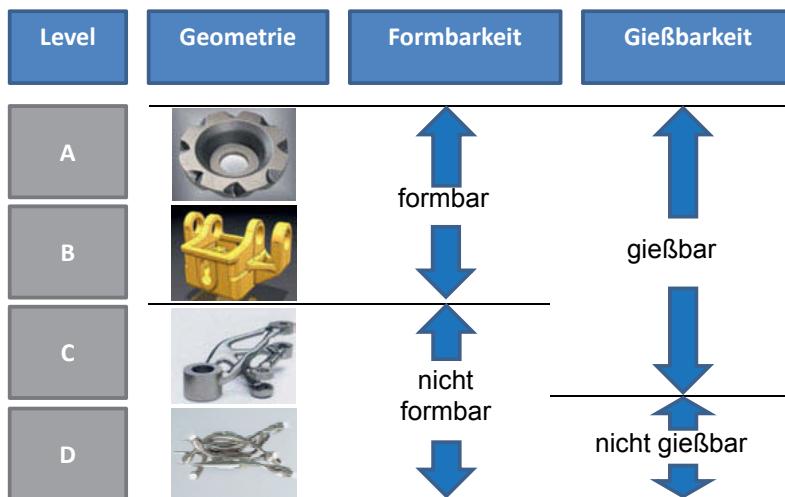


Bild 8: Neue Fertigungspotenziale beim Giessen durch indirekte Additive Fertigung

6. Varianten des Rapid Casting

Auf Basis der bisherigen Erfahrungen kann man grob 3 in ihrer Ausprägung unterschiedliche Varianten des Rapid Casting unterscheiden:

a.) Serienähnliche Gussteile

den schnellstmöglichen Abguss von Bauteilen anhand der angelieferten 3D-Daten der Kunden ohne Rücksicht auf Formschrägen und Hinterschneidungen mit möglichst geringem Prüfaufwand (ca. Arbeitswochen), ggf. auch „neben der Formanlage“ oder in einem Adaptersystem in der Formanlage.

b.) 4S-Prototyping

serienidentische Prototypen im Serienwerkstoff unter Serienfertigungsbedingungen in der Seriengeometrie und ggf. im Serienprüfstatus

c.) Sonderfall „Ungießbares“

additive Fertigung (einiger formgebenden Geometriepartien) bisher ungießbarer Geometrien

Welche Zielrichtung eingeschlagen wird, hängt vom jeweiligen Projekt ab und seiner Umsetzungswahrscheinlichkeit in die Serienfertigung. Die Mehrzahl der im Unternehmen des Verfassers durchgeführten Projekte waren Typ b. Typ a gehört eher in den Bereich reiner Prototypendienstleister, die schon mal das Aufschwimmen von nicht oder schlecht gelagerten Kernen durch Auflegen von Gewichten (und deren Niederhalten durch einen Mitarbeiter) realisieren. Ein Vorgehen, das an einer Formanlage nicht umsetzbar ist und entsprechende Probleme während der Serienumsetzung nach sich zieht.



Bild 9: Zusammenlegen einer Print-Form mit dem Kernpaket vor dem Abguss

7. Kostenbetrachtungen

Praktisch "Nichts ist unmöglich" in der additiven Fertigung - trotzdem muß auch der Kosten-Nutzen-Faktor stimmen. Der Print von Formen und Kernen ist in Relation zum Rohgusspreis in der Serie um ein Vielfaches höher; aber er ermöglicht im Extremfall die Lieferung von Prototypen (oder Kleinstserien) in 10 Arbeitstagen. Zudem besteht bei der vom Autor präferierten Methode des Einsatzes eines konventionellen Außenmodells die Option nur durch Variation der Kerngeometrien verschiedene konstruktive Varianten in einem Fertigungslos ohne Zeitverlust herzustellen - ein Effekt, der für Pumpen- und Turnoladerentwicklung gern genutzt wird, manchmal auch unter Einsatz schon langjährig bestehender Modelleinrichtungen.

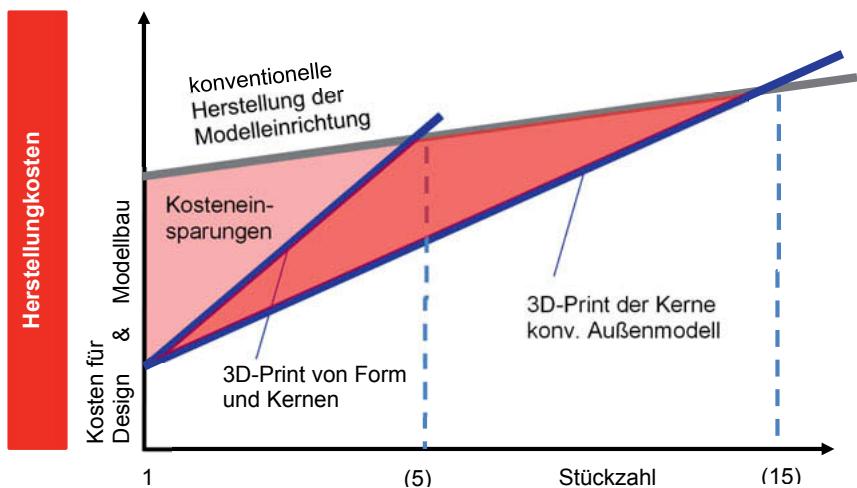


Bild 10: Kostenrelationen im Rapid Casting

Der zeitliche Vorteil ist ein Umstand, den sich beispielsweise die MAN-Giesserei in Augsburg zu Nutze macht, die mittlerweile viele Ersatzteile (auch Handformteile) für die in Augsburg produzierten Großdieselmotoren aus geprinteten Formen realisiert, sofern die in der Serienfertigung genutzte Modelleinrichtung nicht mehr vorhanden ist. Auf den ersten Blick sind 20 oder 30 T€ Kosten für die Formen nur eines Bauteils ein abstruser Wert; führt man sich aber vor Augen, dass die Liegezeit eines Schiffes im Hafen schnell mit 50 T€ je Tag berechnet wird, werden diese Formkosten zu „peanuts“.

Denselben Effekt nutzen auch Kundengiessereien im Zuge von Entwicklungsprojekten ihrer Kunden. Der Zeitgewinn in der Produktentwicklung bzw. die pönalefreie Abwicklung eines Entwicklungsprojektes kompensiert die im ersten Augenschein hohen Kosten des Verfahrens sehr zügig. Zumal die zeitliche Verzögerung durch das konventionelle Vorgehen häufig kaum bewertet wird - die Konstrukteure sind „eh` da“ und „eh` da-Kosten“ spielen keine Rolle.

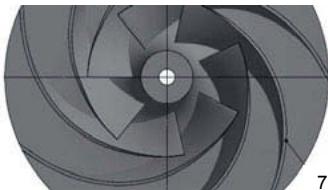
	7 Schaufeln	Gewicht 48,5 kg, Durchmesser 560 mm Werkstoff: EN-GJS-400-15
<u>Kleinserienbedarf / Ersatzteile</u>		
Kosten	konventionell 1 Modell, 2 Kernkästen, davon 1 Segmentkern (mehrfach je Laufrad)	Rapid Casting 1 Modell, Printkern
Modellein- richtung:	18.500.- €	12.800.- €
Preise je Stück		
1 Stk. Probe	540.-€	1.351,20 €
4 Stk.	230,80 €	851,87 €
10 Stk.	315.- €	683,16 €
Gesamtkosten: (für Probe + 10 Stk.)	22.190.- €	20.982,80 €
zzgl. Prüfkosten gemäß Kundenanforderung	ident. für beide Varianten	
Lieferzeit	10 Wochen	3 Wochen

Bild 11: Kostenbeispiel Laufrad (ohne Bewertung des zeitlichen Vorteils)

Noch deutlicher generiert sich dieser Effekt in der Ersatzteifertigung, wie beim in Bild 10 dargestellten Kostenbeispiel für Ersatzteile für eine Linzer Donaubrücke für die exakt 4 Gehäuse (eines längst nicht mehr gefertigten) Typs benötigt wurden.

Im Endeffekt stellt RAPID CASTING in seinen verschiedenen Ausprägungen eine weitere fertigungstechnische Alternative dar. So wie der direkte 3D-Print von Metallpulvern konventionelle Fertigungsmethoden nicht verdrängen wird [13], wird auch die Mehrzahl aller Gussteile weiter mit Hilfe konventionell erstellter Werkzeuge gefertigt werden [14].

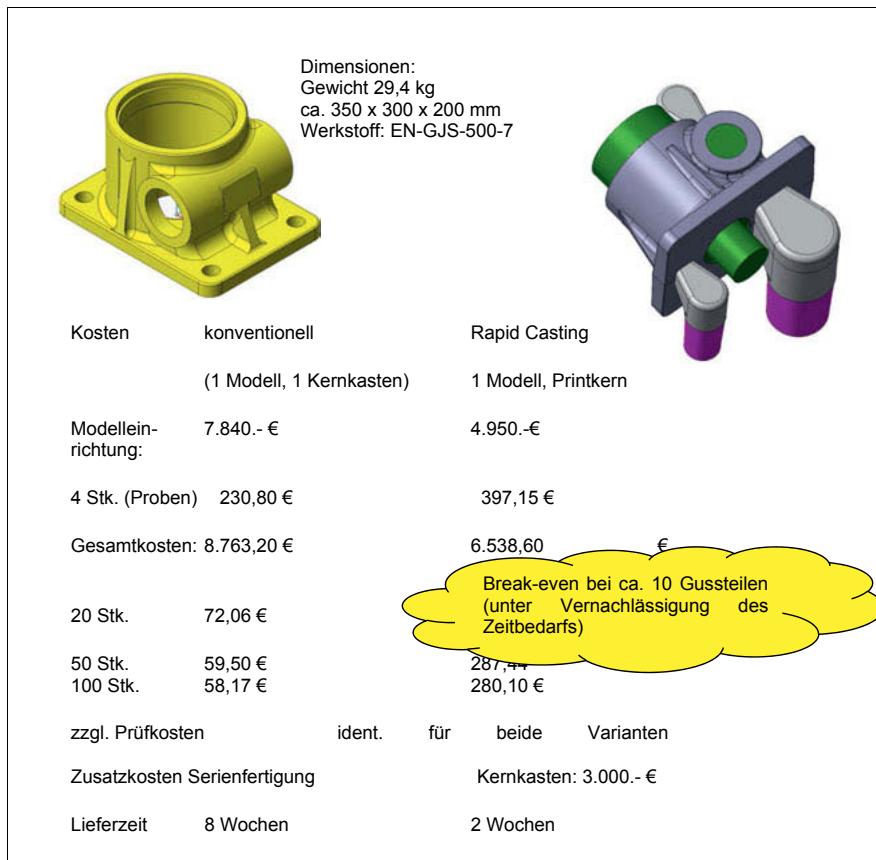


Bild 12: Kostenbeispiel Ersatzteilbeschaffung Getriebegehäuse für Donaubrücke

7. Optionen im Ersatzteilgeschäft

Einen interessanten Gedankengang im Fokus der Ersatzteilenachfertigung bietet zusätzlich der Einsatz von Reverse Engineering zur Produktoptimierung von Ersatzteilen dar: Im schlimmsten Falle sind weder alte Zeichnungen noch Modelleinrichtungen vorhanden. Am letzten verfügbaren, jetzt zu ersetzenen Bauteil sind ggf. die Ausfallursachen, sicherlich aber Verschleißspuren o.ä. zu erkennen. Was hindert den Endkunden, auf Basis der mit Reverse Engineering erstellten Daten, zeitgemäße Entwicklungstools wie Lastanalysen per FEM durchzuführen und die Ersatzteildaten entsprechend anzupassen? „Die Kombination aus

additiven Herstellverfahren und modernen Engineeringmethoden erlauben eine kontrollierte und schnelle Änderung von Geometrie und Funktionalität und ermöglicht einen Paradigmenwechsel: Das Ersatzteil bietet die Chance, besser zu sein, als das Original und ist Ausgangspunkt einer evolutionären Produktentwicklung.“ [15].

Möglicherweise muß man sogar gewisse Ersatzteilstrategien überdenken: Heutzutage werden zur Erfüllung von Langzeiteratzteilverpflichtungen (10 Jahre und mehr) Modell-einrichtungen eingelagert, um vielleicht irgendwann mal etwas nachzuliefern oder es wird vorproduziert, um vielleicht später einmal ein paar Teile zu verkaufen. Die zugehörige Kalkulation (sofern überhaupt vorhanden) geht wohl häufig nicht auf, da trotz großer Hebel in der Preiskalkulation verkaufter Ersatzteile, die Kosten der Verfügbarkeit einer möglichen Ersatzteillieferung nicht kalkuliert werden / kaum kalkulierbar sind. Im Sinne einer gesamtheitlichen Ersatzteillager und -produktionsstrategie mit Digitalisierung des Ersatzteilportfolios mit Zielrichtung einer datenbasierten Fertigung (bei Gussteilen mit geprinteten Formen und Kernen) wäre eine Bereitstellung der Ersatzteile im Bedarfsfall möglich.

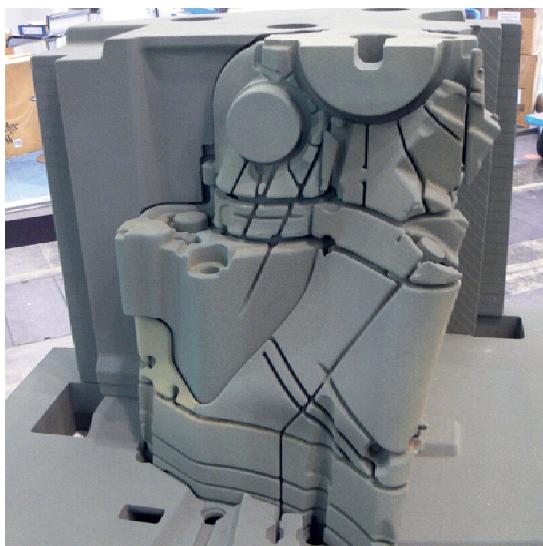


Bild 13:
Formel 1 - Getriebege-
häuse, Charge: 5 Stück,
geprintet aus Quarzsand
mit Furan-Bindersystem
(ExOne, Gersthofen)

8. Zusammenfassung

Ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz gegossener Prototypen im Produktentwicklungsprozeß gegossener Bauteile ist die langwierige, zeitintensive Erstellung der für die Abgüsse

benötigten formgebenden Werkzeuge für Außengeometrie und Kern. Über die indirekte additive Fertigung der Formen (und Kerne) lässt sich eine Fertigungsdauer ab 2 Wochen realisieren. Damit einher geht der Verzicht auf provisorische Prototypen (aus dem Vollen bearbeitet), sodass idealerweise Prototypen im Serienstatus produziert werden.

Der Zeitbedarf des Produktentwicklungsprozesses wird drastisch reduziert. Zugleich bietet ein gestuftes Vorgehen Entscheidungsfreiheit bezüglich des Zeitpunktes des Wechselns von 3D-Print- auf konventionell gefertigte Kerne und Formen, bzw. ermöglicht die preisgünstige (und schnelle) Fertigung von Varianten in kleinen Losgrößen.

Das Verfahren bietet zusätzlich das Potenzial „Ungießbares trotzdem zu gießen“. D.h. es verschiebt die Einsatzgrenzen des Fertigungsverfahrens, erfordert aber auch vom Konstrukteur völlig neue Herangehensweisen, denn es bietet eine grenzenlos scheinende Konstruktionsfreiheit. Der simple Nachbau eines konventionell gefertigten Bauteils ist eine Beleidigung für jeden, der mit 3D-Druck arbeitet. Komponenten dürfen neu gedacht werden.

Literatur:

- [1] Kleine, M.: Beseelt von Kunststoff, K : Kompetenz für Konstrukteure, 04/2018, S.18 - 21
- [2] Frank, T., Tuffentsammer, T.: Pumpenindustrie profitiert vom 3-D-Sanddruck, GIESSEREI 105, 03/2018, S. 64-65
- [3] Oaks, M.: Letting Mr. Charpy die : Evaluating the Usefulness of Charpy Impact testing on Ductile Iron, Ductile Iron News Issue, 2, 2012, www.dutile.org, geprüft 17.06.2018
- [4] Käfer, S.: Die neue Freiheit der Konstrukteure, MM MaschinenMarkt, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=5112&pk=61346>, 05.06.2018
- [5] Brechmann-Guss: Bearbeitungszugaben und Toleranzen nach DIN EN ISO 8062, Rev. 2, September 2018
- [6] VDI, Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren: Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren, 2016, S. 31 ff.
- [7] Kaliudis, A.: Form folgt Funktion, ADDITIVE FERTIGUNG, 2, Mai 2018, S. 34 - 38
- [8] Bittermann, P.: Ikarus ist sanft gelandet, PERSPEKTIVEN, Hüthig-Verlag 2015, S. 174-178
- [9] VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren, 2013-2015, insbesondere Blatt 3: Konstruktionsempfehlungen
- [10] VDI 6224. Bionische Optimierung; Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile
- [11] Wetzel, S.: Motorradschwinge wird Casting of the Year, GIESSEREI 105, 10/2018 S. 48-50
- [12] Reiher, T.; Vogelsang, S.; Koch, R.: Computer integration for geometry generation for product optimization with Additive Manufacturing, Austin, Texas, August 2017
- [13] Die Revolution fällt (vorerst) aus, PRODUKTION, Magazin, 04/2016, S. 38-39
- [14] Stahl, R.: How classic foundries remain competitive against 3D printing, ETMM, <https://files.vogel.de/vogelonline/pdfarticles/744/9/744988.pdf>, 27.08.2018
- [15] Junior, Volker: 3D scanning and Additive Manufacturing, New Value Creation Potential in Quality Assurance, Product and Process Optimisation; Vortrag tct live; Birmingham, 25. September 2012

3D Printing in the Foundry Industry – The Optimal Alternative to Direct Metal Printing

Matthias Steinbusch, voxeljet AG, Friedberg;
Jochen Hülsmann, Lütgemeier GmbH, Steinhagen

1. Abstract

Today, the term 3D printing covers a multitude of different technologies and manufacturing processes. Currently the most present technology is radiation-based processing of metals. Almost every day there are new developments that push a firm implementation of the technology into series production. This direct production of metal parts with properties similar to cast iron is regarded as a threat to the traditional business, especially in the foundry industry. 3D printing also offers the possibility of producing moulds and cores with innovative moulding materials such as phenolic and inorganic binders. In combination with conventional metal casting, 3D printing is a fascinating alternative to direct metal printing. The speech outlines the status and development of direct and indirect shaping. In addition, a user reports on his experiences with printed moulds and cores. Special attention is focused on high-quality components that are available to the end customer in the shortest possible time.

2. Zusammenfassung

Der Begriff 3D-Druck umfasst heute eine Vielzahl verschiedenster Technologien und Fertigungsverfahren. Die momentan präsenteste Technologie ist vor allem die Strahlungsbasierte Verarbeitung von Metallen. Beinahe täglich gibt es neue Entwicklungen die eine feste Implementierung der Technologie in die Serienproduktion vorantreiben. Diese direkte Herstellung von Metallteilen mit rohrgussähnlichen Eigenschaften wird besonders in der Gießereibranche als Bedrohung des angestammten Geschäfts angesehen. Dabei bietet der 3D Druck auch die Möglichkeit zur Herstellung von Formen und Kernen mit innovativen Formstoffen wie den phenolischen und anorganischen Bindern. In Kombination mit dem konventionellen Metallguss ist der 3D-Druck eine spannende Alternative zum direkten Metalldruck. Der Vortrag beleuchtet den Status und die Entwicklung von direkter und indirekter

Formgebung. Zudem berichtet ein Anwender aus der Praxis über seine Erfahrungen mit gedruckten Formen und Kernen. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf qualitativ hochwertige Bauteile gelegt, die in kürzester Zeit dem Endkunden zur Verfügung stehen.

Information on publications

- [1] Additive manufacturing processes: Gebhardt, A.: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG 2017
- [2] Rapid Manufacturing: Prof. Dr.-Ing. Gunther R.: Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien. Herbert Utz Verlag GmbH 2001
- [3] Rapid Prototyping: Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S.: Principles and Applications. World Scientific Publishing Company 2003

Industrialisierung der additiven Fertigung bei der BMW Group

Dr.-Ing. **Robert Ramakrishnan**, BMW Group, Werk Landshut

Additive Manufacturing in Metall, insbesondere das Laserstrahlschmelzen, findet seit Jahren Anwendung als Fertigungsverfahren für den Prototypenbau und für High-End Anwendungen innerhalb der BMW Group. Für die Industrialisierung und den durchgehenden Einsatz in der automobilen Serienfertigung liegen die Herausforderungen in der Kosteneffizienz im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren, bei Materialstandards, Prozessstabilität und -reproduzierbarkeit, der Durchgängigkeit in der Prozesskette sowie bei durchgängig angewandtem fertigungsgerechten Bauteildesign.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen und die Technologie für automobile Serienanwendungen freizugeben, ist der Durchlauf eines generischen Qualifizierungsprogramms notwendig. Ziel des Qualifizierungsprogrammes ist der übergeordnete Nachweis der Maschinen- und Prozessfähigkeit unter automobilen Rahmenbedingungen. Der erste Schritt hierbei ist die detaillierte Untersuchung und Identifikation der Einflussfaktoren des Laserstrahlschmelzprozesses. Der Fokus liegt hierbei vor allem auf den Einflussfaktoren, die zu instabilen Prozessbedingungen führen. Resultat dieser Untersuchungen sind in Hinblick auf die Laser-Pulver-Schutzgaswechselwirkung optimierte Produktionsparametern, die als Basis für das Qualifizierungsprogramm dienen. Der Umfang des Qualifizierungsprogramms waren ca. 5.000 Prüfkörper für verschiedene Prüfungen entsprechend des geforderten Anforderungsspektrums der Bauteile. Außerdem dienen die Prüfkörper zur Sicherstellung der Maschinen- und Prozessfähigkeit hinsichtlich verschiedener Prozess- und Bauteilmerkmale. Resultat des Qualifizierungsprogramms ist eine Spezifikation für das Material AISi10Mg in Verbindung mit dem Laserstrahlschmelzprozess, welches in Zukunft für Serienproduktion eingesetzt wird.

Basierend auf dieser Spezifikation sind Anwendungen in mehreren Fahrzeugprojekten identifiziert und in die Serientwicklung überführt worden. In schnellen Entwicklungszyklen konnte die Herstellbarkeit der Bauteile optimiert und diese auf eine maximale Packungsdichte in der Fertigung ausgelegt werden. Zusätzlich dazu wurde eine bauteilspezifische Qualitätssicherung etabliert, um die Leistungsfähigkeit der Prozesskette nachzuweisen und die Reife der neuen Komponente zu zeigen. Resultat dieses Vorgehens ist eine erste bereits ab 2018 im

BMW i8 Roadster umgesetzte Komponente im Laserstrahlschmelzprozess. Diese ist für den Kunden sichtbar und wir in einer Stückzahl von mehreren Tausend produziert.

Um eine vollständige und nachhaltige Integration von Additive Manufacturing in die Wertschöpfungsketten der Automobilfertigung zu erreichen, ist eine Einbettung dieser neuen Technologie in die bestehende Fertigungsinfrastruktur notwendig. Dies betrifft beispielsweise die Integration von AM in bestehende Planungs-, Produktions-, IT- und Logistikprozesse. Das BMW Group Werk Landshut beliefert alle Fahrzeug- und Motorenwerke der BMW Group weltweit mit innovativen Komponenten. Das 2016 eröffnete Leichtbauzentrum am Standort Landshut dient dabei als Katalysator für die technologische und organisatorische Verankerung von AM als neue Fertigungstechnologie in der Struktur der BMW Group Komponentenfertigung. Des Weiteren soll mit dem im Leichtbauzentrum erarbeiteten Wissen die Befähigung und der Aufbau des Lieferantenmarkts für additiv gefertigte Serienkomponenten beschleunigt werden. Im Leichtbauzentrum bündeln wir das technologische Wissen sowie die langjährige AM-Erfahrung des BMW Group Additive Manufacturing Centers (AMC) in München mit der Leistungsfähigkeit und Innovationskraft unserer modernen Komponentenfertigung, um für die BMW Group das volle Potential von AM im industriellen Maßstab schöpfen zu können.

Die beschriebene Industrialisierung der Additiven Fertigung bei der BMW Group ist Teil einer unternehmensweiten Strategie, die sich die Erschließung sämtlicher technologischer und wirtschaftlicher Potentiale durch den Einsatz von AM in einer Vielzahl von Anwendungsfällen zum Ziel setzt.

Substitution of Cast Iron engine components with Aluminium Alloys: A Life Cycle Perspective

Prof. **M. R. Jolly**, Dr. **K. Salonitis**, Dr. **E. Pagone**,

Dr. **M. Papanikolaou**, Cranfield University, Cranfield, United Kingdom

Abstract

Environmental sustainability is nowadays one of the most important global challenges. It is common that the amount of CO₂ emissions is being used as a measure of the environmental impact of vehicles. As a result, manufacturers focus on producing lightweight car components in order to minimize the weight of the vehicles and maximize the fuel economy. As a consequence, car manufacturer designers have started to favour low density materials. However, it is usually the case that the energy footprint of the materials as well as the processes involved in the manufacturing of automotive components is often not assessed. This study focuses on the validity of the claim that lightweight materials are associated with enhanced environmental sustainability by making a full assessment of the energy consumption and CO₂ emissions during the manufacturing and usage stages of diesel and petrol engine blocks made of cast iron and aluminium. For this purpose, inputs from over 100 world experts from across the automotive supply chain have been taken into consideration. Our results show that the usage of lightweight materials is often associated with higher energy consumption and CO₂ emissions. More specifically, the 1.6L aluminium alloy engine block examined only seems to compensate for the additional energy consumed during their manufacturing process after 200,000 km of on-the-road driving compared to the one made of cast iron. Similar trends are observed for the CO₂ emissions.

Introduction

According to recent reports [1], road transport is responsible for about 20% of the total CO₂ emissions in the EU and has increased by more than 20% since 1990. This has led to legislation encouraging the production of lightweight cars in order to reduce the on-the-road emissions. As a result, there is a general perception that lower density materials will contribute towards the reduction of the CO₂ footprint of automobiles. Moreover, when it comes to recycled materials, e.g. aluminium (Al), it is more than common that the energy input required from ancillary processes used in the recycling stages is often being neglected or underestimated [2].

Recently, researchers have focused on the big picture and introduced the term “embodied energy”, which is indicative of the energy required for the production of materials using ores and feedstock. Each product has a number of life phases, namely; material production, manufacturing, transportation and use. According to Ashby et al. [3] the “use” phase of an automobile is the most dominant in terms of energy consumption. However, in the second part of this investigation a comparison is being made between the energy used for the production of 14 kg steel bumper and a 10 kg aluminium one. Their results show that the energy required for manufacturing the bumper made of aluminium is 5 times higher than the corresponding value for the one made of steel. Moreover, the extra amount energy required for the aluminium bumper can be offset after 250,000 km of on-the-road driving. The high embodied energy of aluminium compared to steel is attributed to the energy intensive electrolysis and bauxite conversion stages.

In a similar study, Sorger et al. [4] demonstrated the potential of using cast iron (CI) for manufacturing cylinder blocks. They suggested that CI can significantly contribute towards ecological sustainability and energy balance. The authors clearly highlighted the importance of evaluating the entire product lifecycle (“cradle-to-grave”) instead of solely focusing on the “use” phase. As shown in Fig. 1 the energy requirements and CO₂ emission for a crankcase made of cast iron are much lower than the corresponding values for the Al casting processes. Finally, the energy savings during the use phase of the lighter Al crankcase were found unable to offset the additional energy demand of the manufacturing phase during the lifecycle of the product.

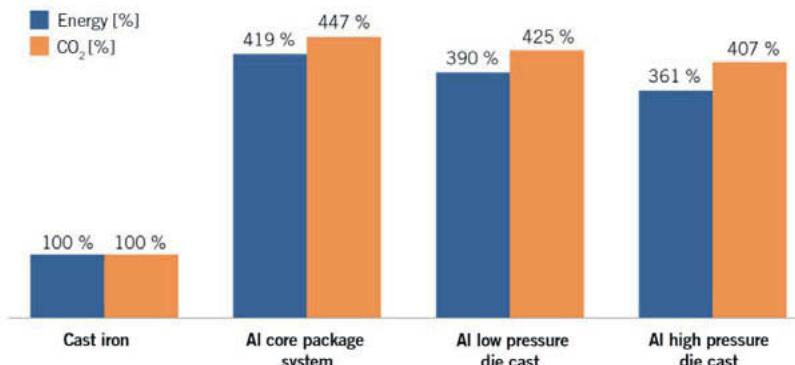


Fig. 1: Manufacturing phase – energy requirements and CO₂ emissions for the production of a cylinder crankcase (including consideration of the global recycling rate according to Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) [5]

In this investigation we perform a full assessment of the energy requirements and CO₂ emissions of the “manufacturing” and “use” phases of a 1.6 l in-line 4-cylinder engine block. For this purpose, have compared the cases of (a) a cast iron engine block and (b) an aluminium engine block. Our results show that there substituting cast iron with aluminium would not contribute to neither energy efficiency nor environmental sustainability as far as the product lifecycle is considered.

Methodology

In order to obtain the required data for this study we performed a wide literature review and contacted more than 100 experts in the automotive industry (engine design consultancy firms, foundries, mining/machining/heat treatment/recycling/impregnation companies, and primary alloy producers). As expected, it was not been feasible all times to collect the required energy data from the aforementioned companies; thus when those data were not available we obtained the required from the multiple sources in the literature.

The selection of the engine type under examination was based on the investigation of Trechow [6] who forecasted that by 2016 4 cylinder engines would increase from about 58% of the world-wide market to about 71%. Moreover, both OEMs and automotive suppliers we contacted suggested that both petrol and diesel 1.6 L in-line 4 cylinder blocks can be characterised as the representative engines of modern vehicles.

In order to select appropriate weight for the four aforementioned engine types we took into account the fact although CI is about 3 times denser than Al, it also characterised by superior mechanical properties (i.e. strength/density and Young's modulus/density ratios). Consequently, CI allows for more compact designs with thinner cross sections. Based on an industry survey we conducted, we selected a 9 kg weight differential and 11 kg differential between the petrol and diesel engine blocks respectively. Taking into consideration the above and the fact that CI is about 3 times denser than Al, it can be concluded that the volume occupied by the CI block is about 55% less than the corresponding volume of the Al block. This results in a reduction of the weight of the ancillary components.

Initial reports based on accepted industry standards have shown that a 5-10% weight reduction can yield 6% fuel savings [7]. However, more recent reports ([8], [9]) indicate that, instead of 6%, a 4.6 % might be achievable while occasionally fuel savings can be as low as 3%. According to a NRC report [10], for 1% and 5% reduction, fuel savings of 0.3% and 3.3% can be achieved respectively. In this study, the value of 4.6% has been adopted.

Embodied Energies

There are discrepancies in the literature regarding the energy required for the formation of primary materials. Allwood and Cullen [2] have suggested values of 170 GJ/tonne and 35 GJ/tonne for primary aluminium and iron respectively. On the other hand, online sources and investigations suggest values ranging between 50 and 100 GJ/tonne for primary aluminium and 35 GJ/tonne for primary iron. In order to select an appropriate value we draw the full lifecycle of each material and calculated the energy/mass in each step of the process as illustrated in Fig. 2. The similar process was followed for iron. According to our calculations 98 GJ and 17 GJ are required for the production of 1 tonne of aluminium and iron respectively.

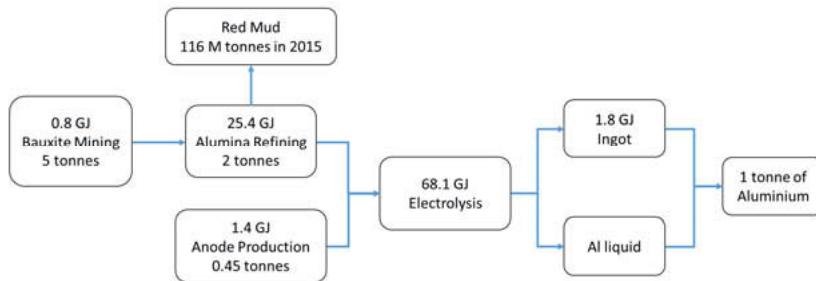


Fig. 2: Process flow steps for primary aluminium production and corresponding energy content required to produce 1 tonne of aluminium

Besides raw material, most of the foundries we interviewed used recycled material to make-up the metal charge. The CI foundries interviewed used a high proportion of steel scrap as charge material. Steel scrap was also mixed with scrap from End of Life (EOL) components and fettled methoding systems. In this investigation we considered that in CI foundries the metal charge consisted of 91% recycled material which, depending on its provenance, had an energy content of 10 GJ/t or 4 GJ/t respectively. The Al alloy foundries interviewed used various percentages of recycled material. Low Pressure Die Casting (LPDC) foundries were found to use 100% primary material and at the same time performed no in-house recycling. On the other hand, Low Pressure Sand (LPS) foundries used both secondary ingot and in-house recycled A319 alloy (~35%). Moreover, recycled foundry ingot was used to offset losses; thus we can claim that 100% of the charge material was recycled. In High Pressure Die Casting (HPDC) foundries a high proportion (~27%) of internal scrap was added to A380/383 secondary foundry ingot. Based on the aforementioned recycling rates and assuming the best case scenario for Al foundries, we considered values of embodied energy equal to 32, 24 and 25 GJ/tonne for the LPS, LPDC and HPDC processes respectively.

In addition to primary and recycled materials additional materials have to be used in each one of the casting processes considered in this study (CI, LPS, LPDC and HPDC). In Al alloy foundries CI liners are being used which are either cast in or pressed. According to the feedback received from OEMs participating in our survey pre-machined liners were used. We considered that for the cast liners 95% recycled scrap iron was used which result in an embodied process energy equal to 188 MJ or 12 GJ/tonne for the set of four liners. Moreover, additional alloying elements were used in each process type. In Al alloy foundries copper (13.5 GJ/tonne) and silicon (122 GJ/tonne) [11] were used while in CI foundries ferrosilicon (1.6 GJ/tonne) was added to enhance the grain structure and thus the quality of the finished component. Standard sand casting and Low Pressure Sand casting are burdened with additional energy associated with the mining, preparation, recycling, movement and bonding of the sand (2.3 - 5.8 GJ/tonne). We have also accounted for the additional energy required for the recycled sand used for making cores of moulds (0.2 - 1.8 GJ/tonne). The embodied material energy from all sources is illustrated in Fig. 3.

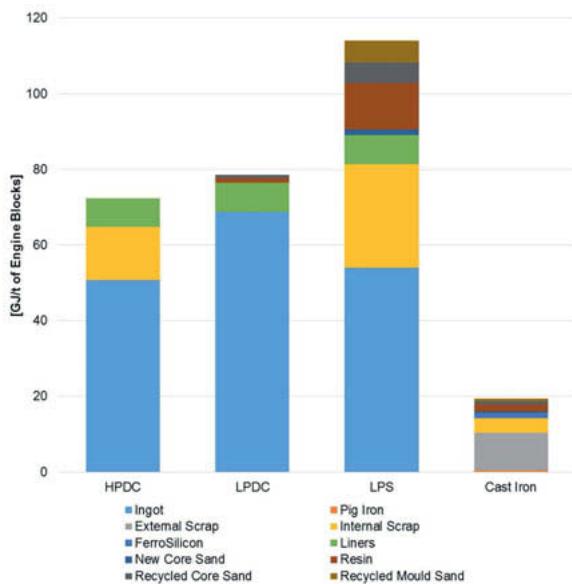


Fig. 3: Embodied material energy of each source for each casting process

Process Energies

In order to achieve 100 °C superheat for 1 tonne of Al alloy or CI theoretically 1 GJ of energy is required. However, due to the relatively low efficiency of the furnaces used in foundries (50

- 75%) one would expect that the energy content of the melting process would be of the order of 2 - 3 GJ/tonne for both CI and Al. Fig. 4a illustrates the melting energy as measured by the interviewed the CI and Al alloy foundries. Besides melting, additional energy is required for holding the liquid metal to allow for different production rates and cleaning to be carried out [12]. The holding energy for Al foundries is much higher compared to CI foundries because of the additional treatments such as degassing and cleaning that have to be carried out (Fig. 4b). Moreover, according to the feedback we received from the interviewed foundries we assumed an unrecoverable metal loss equal to 2% for both foundry types.

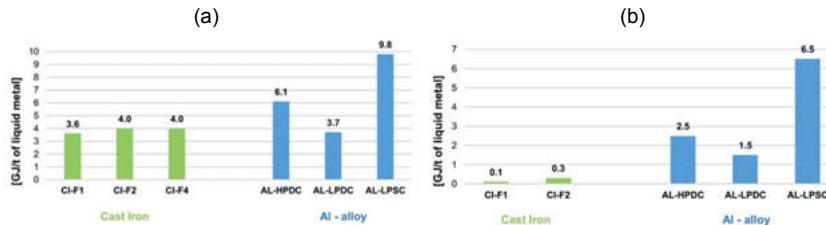


Fig. 4: (a) Melting and (b) holding energies in the interviewed foundries. All of the CI foundries used cupola melting and little variation is exhibited between the measured energy values. The large variation observed in the Al alloy foundries is attributed to the various melting processes adopted.

In all of the aforementioned foundry types with the exception of HPDC foundries, sand cores are being used for the formation of the internal cavities of the engine block. These cores were made of silica sand using the cold box method. In HPDC, cores cannot be used due to the high pressure injection of liquid metal which results in their destruction. For each process, cores with different weights are being used and the energy for their formation energy was found to be in the range between 0.5 and 1.5 GJ/tonne.

One of the most energy demanding post casting processes is heat treatment. In contrast to CI alloys which do not require heat treatment, Al alloys need to undergo heat treatment in order to improve their strength and ductility. Some typical heat treatment processes, such as T6/T7, consist of two stages: (a) heating the component just below the melting point (~550 °C) for up to 5 hours, depending on the maximum cross section thickness and (b) immersing the component in a water, oil or water/polymer bath and “ageing” at a temperature usually close to 200 °C [13]. HPDC components are not usually heat treated although they often undergo a stress relieving treatment with much lower energy content compared to the full heat treatment process. Theoretical calculations as well as feedback from heat treatment companies suggest that for T6/T7 treatments, 3.2-6.1 GJ/tonne of finished casting are required, depending on the

furnace energy efficiency. The LPS foundry interviewed used a variant of the full heat treatment process which did not require the cast part to cool down to the ambient temperature but heat treatment was applied directly after casting. As a result the energy content of this process was much lower compared to the conventional heat treatment process (1-2 GJ/tonne).

In addition to heat treatment, the final cast component needs to be machined in order to remove the excess material and attain the desired dimensional accuracy and surface finish. The machining energy varies significantly depending on the machining parameters used and can be reduced by adding feeders in the areas which are to be machined. We used a simulation tool provided by MAG IAS GmbH [14] to estimate the energy consumption for machining the cast component using various processes and materials. According to the yielded results, the energy required for machining the Al alloy and CI alloy engine blocks would be 2.1 GJ/tonne and 1.6 GJ/tonne respectively.

Miscellaneous energies

Miscellaneous energy consists of the energies associated with the facility operation and other ancillary processes such as heating, lighting etc. Fig. 5 represents the data collected from the foundries interviewed.

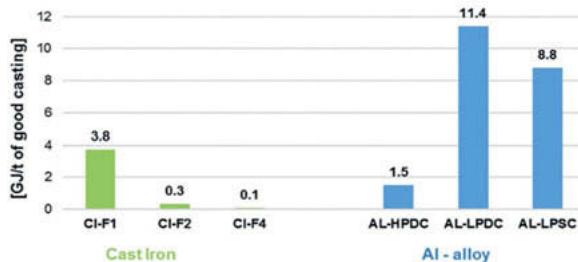


Fig. 5: Miscellaneous energy monitoring at the foundries interviewed

Material and Energy flows

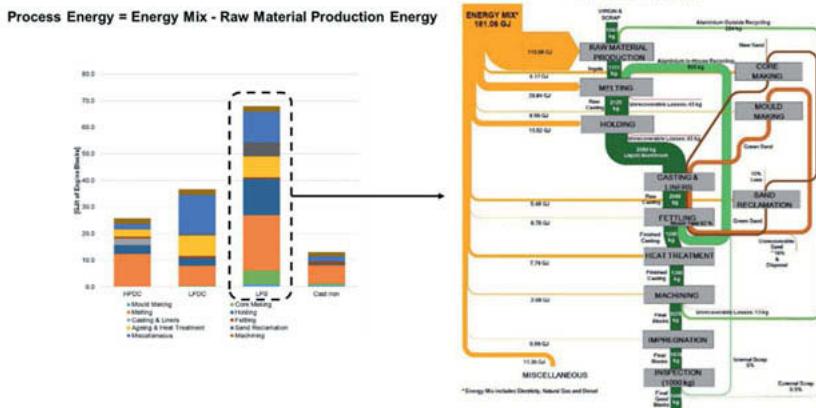


Fig. 6: Sankey diagram showing energy and material flows for low pressure sand casting Al cylinder blocks

The visualisation of flows in different forms can assist decision making and exploring the impact of potential improvements. As illustrated in Fig. 6, material and energy flows can be effectively represented using Sankey diagrams, illustrating in a clear manner the largest energy inputs, material losses and recycling loops [15]. Such diagrams can be used to assist foundry engineers with decision making and provide them with the ability to perform scenario modelling. The total material and process embodied energies for each manufacturing process investigated are shown in Fig. 7.

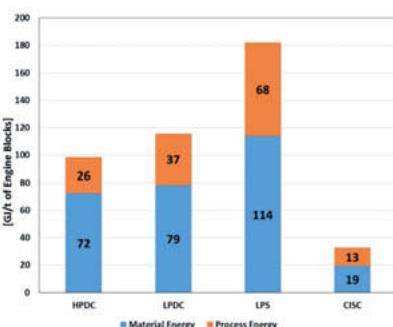


Fig. 7: Material and Process Energy/tonne of good castings for the different casting processes examined

Effects of Manufacturing Process Energy Burden on Break Even Driving Distance

In the previous section the material and process energy flow have been recorded for all the manufacturing processes under examination. It is apparent the sand casting of CI is the most efficient process in terms of energy and material consumption. However, in order to look at the

big sustainability picture we have to evaluate the Process Energy Burden (PEB) of each casting process on the breakeven driving distance (BED_e). The first step towards this direction would be the estimation of the process energy burden per engine block for each engine block type, namely petrol and diesel, as illustrated in Fig. 8.

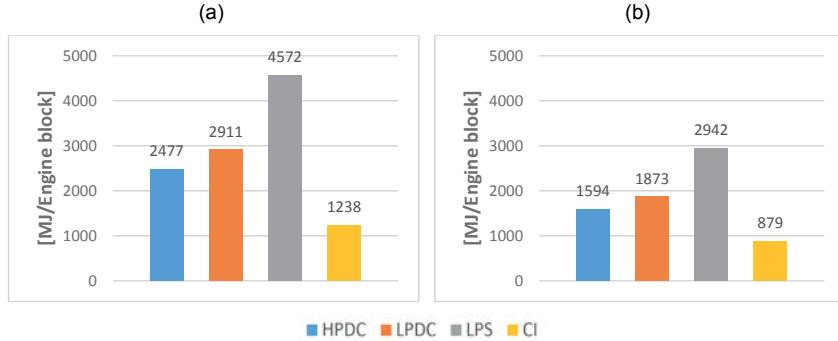


Fig. 8: Embodied energy per (a) diesel and (b) petrol engine block for each manufacturing process

The next step is to calculate the difference in the Process Energy Burden (ΔPEB) between the lowest energy process (CI) and the rest of the processes. The vehicle mileage for which the fuel savings become greater or equal to the ΔPEB is the breakeven driving distance (BED_e) and can be estimated according to:

$$BED_e = \frac{\Delta PEB}{(\delta F_s \times E_f \times \Delta M)} \times 10^4 \quad \text{Eq. 1}$$

where $\delta F_s \left(\frac{L}{100 \text{ km} \times 100 \text{ kg}} \right)$ are the fuel savings, $E_f \left(\frac{\text{MJ}}{L} \right)$ the energy content of the process and $\Delta M \text{ (kg)}$ the engine weight differential. The selected values of the aforementioned parameters based on 4.6% fuel saving for each 10% of weight savings [16] are summarised in Table 1.

Table 1: Values used for break-even calculations based on 4.6% fuel saving for each 10% of weight savings

	Diesel	Petrol
Engine weight differential (kg) (ΔM)	9	7
Fuel savings (L/100km/100kg) (δF_s)	0.15	0.20
Energy content (MJ/L) (E_f)	38.6	34.2

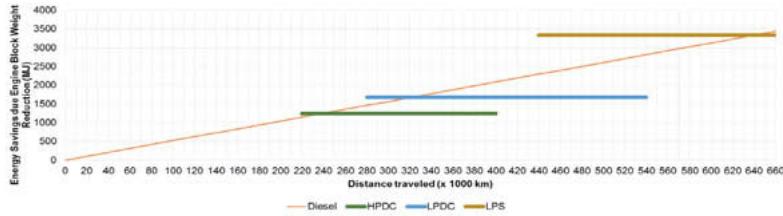
The break-even distances of both the Diesel and Petrol engines for various manufacturing processes are shown in Fig. 9(a) and (b) respectively. The length of each horizontal line is representative of the variations of savings that can be achieved (6%, 4.6% and 3%). The BED_e results for each weight reduction case considered are also summarised in Table 2.

Table 2: Summary of break-even distances (km) for energy (BED_e) for different processes and engine block types

Fuel Efficiency savings (%/5-10% weight reduction)	HPDC		LPDC		LPS	
	Diesel	Petrol	Diesel	Petrol	Diesel	Petrol
	Actual weight reduction					
6% [7]	188,000	115,000	253,000	160,000	505,000	331,000
4.6% [9]	238,000	149,000	321,000	208,000	640,000	431,000
3% [10]	357,000	230,000	482,000	319,000	960,000	663,000

As observed in Fig. 9, in a best case scenario a vehicle coming with an Al alloy diesel/petrol engine block has to travel at least 220,000/140,000 km respectively to pay back the additional energy used during its production compared to a vehicle with a CI alloy diesel engine block.

(a)



(b)

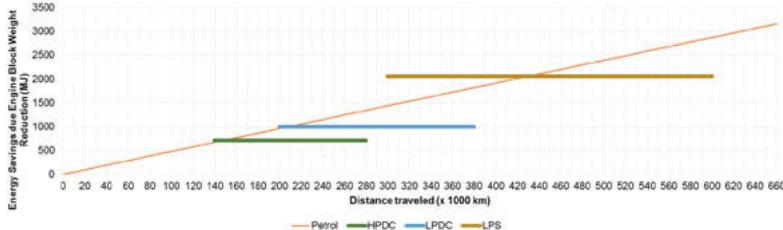


Fig. 9: Break even driving distance with respect to the embodied energy as a function of the manufacturing process for a (a) Diesel and (b) Petrol engine

Effects of Manufacturing CO₂ emissions on Break Even Driving Distance

The investigation of the CO₂ emissions associated with the manufacturing processes presented above can be considered equally or even more important than their energy efficiency. The source of fuel for producing the energy used in the electrolytic reduction of the Al alloy influences the corresponding CO₂ emissions as illustrated in Table 3.

Table 3: CO₂ emissions for different sources of electricity generation [17]

Source	t CO ₂ /TJ	t CO ₂ /GWhr
Coal	98.5	355
Gasoline	67.7	244
Hydro	2.5	9
Natural Gas	50.4	181
Nuclear	4.2	15
Oil	69.5	250
Propane	59.9	216
Wind	2.8	10

As a consequence, CO₂ emissions depend on the location in which the primary aluminium is being produced as this is indicative of the sources of the fuel exploited for producing the energy required for the electrolytic reduction. There are a lot of published data on the sources of electricity used for the electrolytic reduction across the world and the corresponding CO₂ emissions ([18], [19]). According to these sources 28% of the electricity used for the production of Al alloys comes from hydroelectric power sources whereas 72% comes from fossil-fuel sources. In addition, CO₂ is also produced from the electrolysis of aluminium for different energy sources according to Table 4.

Table 4: CO₂ emissions produced annually from the primary aluminium production for various energy sources

Energy source	kt CO ₂ pa	%
Hydro	2,086	1.2
Coal	158,418	91.1
Oil	65	0.0
Natural Gas	13,149	7.6
Nuclear	181	0.1
Total	173,899	100.0

In order to represent the best possible case for aluminium we considered an infinite recycling loop has been considered and the CO₂ contents have been divided into CO₂ emerging from (a) materials energy and (b) process energy in accordance to the values presented in Fig. 7. The energy source for each process has been selected based on the information collected from our survey while the CO₂ footprint of electrical sources of energy has been considered to

be equal to 63 kgCO₂/GJ (average world energy CO₂ footprint). The data for the rest of the energy sources has been collected from the Carbon Trust published reports [19]. The CO₂ content emerging from the materials production/process energy is illustrated in Fig. 10, while the CO₂ emissions corresponding to the investigated casting processes are listed in Table 5.

Table 5: CO₂ emissions associated with various stages of the examined casting processes

Process	Energy/tonne	Raw materials	Casting &	Total	Difference in	Ancillary
	of blocks cast	production	ancillary processes	CO ₂ emissions	CO ₂ between	Processes
	(GJ/t)	(kg CO ₂ /t)	(kg CO ₂ /t)	(kg CO ₂ /t)	(kg CO ₂ /t)	%
HPDC	98.2	3283	1467	4750	1876	31%
LPDC	115.4	4586	2092	6678	3805	31%
LPS	181.1	5072	4108	9780	6907	45%
GSCI	32.6	1783	1090	2873	-	38%

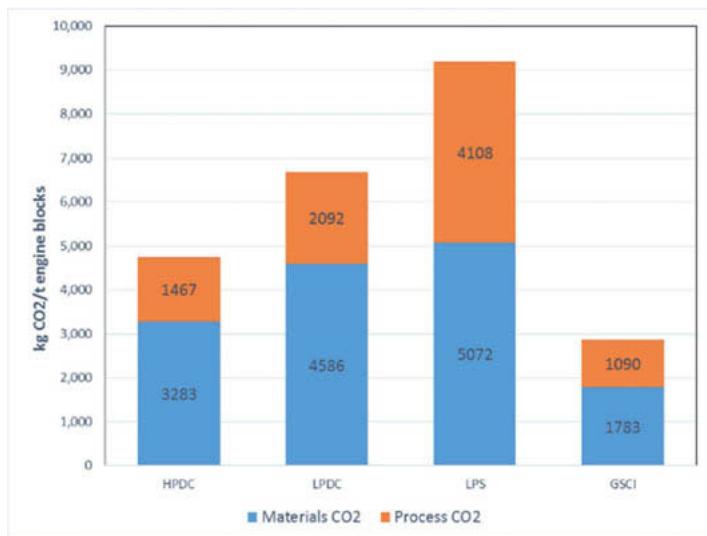


Fig. 10: CO₂ emissions per tonne of good castings for the different casting processes

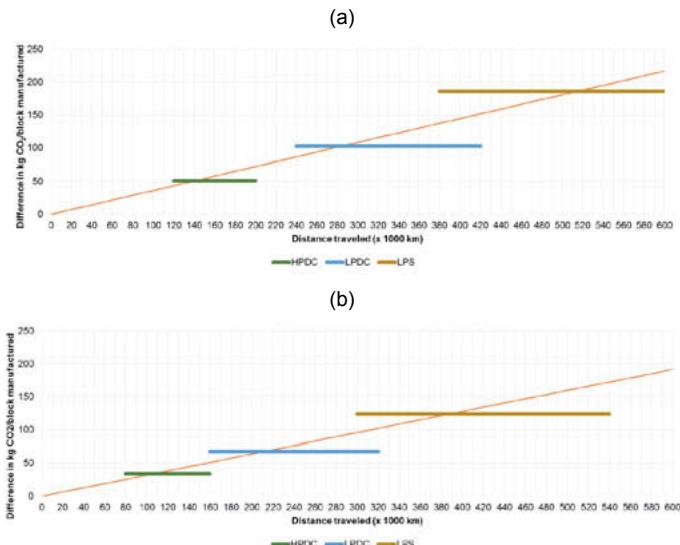


Fig. 11: Break even driving distance with respect to the CO₂ emissions as a function of the manufacturing process for a (a) Diesel and (b) Petrol engine

Similarly to the previous section the break-even distance for the CO₂ emissions (BED_c) is defined as the vehicle mileage for which the on-the-road CO₂ emissions corresponding to a specific Al alloy engine block start compensating for the CO₂ emissions generated during its production. According to the results presented in Fig. 11, in a best case scenario a vehicle coming with an Al alloy diesel/petrol engine block has to travel at least 120,000/80,000 km respectively to pay back the CO₂ emissions produced during its production phase compared to a vehicle with a CI alloy diesel engine block.

Benefits of process optimization

According to the results presented in the previous sections, the need for a full assessment of the energy requirements and CO₂ emissions of the “manufacturing” and “use” phases of a component is more than imperative before deciding to substitute currently used materials with so-called lighter ones. Therefore, performing numerical optimization in order to simultaneously maximize the yield of manufacturing processes as well as the quality of the final cast product could be a trustworthy alternative solution [20]. Moreover, decision support tools need to be developed in order to assist design and foundry engineers to select the most appropriate material for a particular application with respect to minimizing the energy requirements and

CO₂ emissions of the “manufacturing” and “use” phases of the product. The development of such tools requires the implementation of Artificial Neural Networks (ANNs) and the development of large databases based on the data collected from energy and environmental audits.

Conclusions

Evaluating the effects of substituting conventional materials with lighter ones is a non-trivial process which requires a full assessment of the energy requirements and CO₂ footprint of the “manufacturing” and “use” phases of a component. This investigation is based on data collected from a comprehensive survey of the cast iron and aluminium supply industries to minimize the impact of such assumptions on the energy efficiency and environmental sustainability. According to the results of this investigation, it is evident that on-the-road CO₂ emissions do not adequately reflect the effects of selecting light-weight materials on the environment and energy consumption.

We analysed the data collected from 100 primary sources and given the parameters selected, we concluded that substituting CI products with Al alloy components does not necessarily result in more environmentally friendly vehicles when considering the total energy of manufacturing and actual fuel savings achieved. In fact, in order to compensate for the energy required for the manufacturing process it is necessary to drive a car with an Al alloy cylinder block for at least 120,000 km, depending on the selected manufacturing process. This is attributed to the high primary energy content in aluminium alloys and the very low weight reduction achieved (< 1% of the total mass of the car).

Based on the reports of the US National Research Council and National Academy of Sciences we found that break-even distances for energy (BED_e) for Al alloy engine blocks are in the range between 185,000 and 560,000 km. As far as CO₂ emissions are considered, break-even distances (BED_c) lie in the range between 106,000 and 471,000 km depending on the manufacturing process selected and percent fuel savings. For some manufacturing scenarios examined, the break-even distances calculated are close to the expected life of a vehicle. However, for most of the manufacturing scenarios, the break-even distances are well beyond the vehicle life.

Other environmental issues are essential to consider when using Al alloys, namely the recyclability of the alloy and the environmental effects of the production of primary aluminium not just on the energy content but also on the waste products, such as the so called “red mud”. Current legislation does not adequately account for the full energy content of vehicles or indeed

many manufactured products and it behoves legislators and politicians to make justified decisions regarding the use of materials in many applications – not just in transportation.

References

- [1] "Road transport: Reducing CO2 emissions from vehicles | Climate Action." [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles_en. [Accessed: 12-Nov-2018].
- [2] J. M. Allwood *et al.*, *Sustainable materials: with both eyes open*. UIT Cambridge Cambridge, 2012.
- [3] M. Ashby, P. Coulter, N. Ball, and C. Bream, "The CES EduPack Eco Audit Tool--A White Paper." Granta Design, Cambridge, UK, 2009.
- [4] H. Sorger, W. Schöffmann, W. Wolf, and W. Steinberg, "Lightweight Design of Cast Iron Cylinder Blocks," *MTZ Worldw.*, vol. 76, no. 3, pp. 22–27, 2015.
- [5] "GDA: alu.info, statistics 10 21, 2014."
- [6] P. Trechow, "Windstrom treibt Erdgasfahrzeuge an," *VDI Nachrichten. Düsseldorf.*, 2011.
- [7] A. Casadei and R. Broda, "Impact of vehicle weight reduction on fuel economy for various vehicle architectures," *Copy obtained from http://www.autoaluminum.org/downloads/AluminumNow/Ricardo% 20Study_with% 20cover. pdf*, 2007.
- [8] Shiraz Ahmed, "Automotive News." [Online]. Available: <http://www.autonews.com/article/20160418/oem05/304189969/?template=print>. [Accessed: 12-Nov-2018].
- [9] N. R. Council and others, *Cost, effectiveness, and deployment of fuel economy technologies for light-duty vehicles*. National Academies Press, 2015.
- [10] N. R. Council and others, *Assessment of fuel economy technologies for light-duty vehicles*. National Academies Press, 2011.
- [11] G. Design, "CES Edupack Database." Granta Design, Cambridge, 2016.
- [12] E. Pagone, K. Salonitis, and M. Jolly, "Energy and material efficiency metrics in foundries," *Procedia Manuf.*, vol. 21, pp. 421–428, 2018.
- [13] "Aluminum Alloy Heat Treatment Temper Designations." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/reference/aluminumtemper.aspx>. [Accessed: 13-Nov-2018].
- [14] "MAG - Manufacturing Technology." [Online]. Available: <http://www.magi.com/web/en/index.php>. [Accessed: 13-Nov-2018].
- [15] E. Pagone, M. Jolly, and K. Salonitis, "The Development of a Tool to Promote Sustainability in Casting Processes," *Procedia CIRP*, vol. 55, pp. 53–58, Jan. 2016.

- [16] N. R. Council, *Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2015.
- [17] "Industrial Efficiency Technology Database." [Online]. Available: <http://ietd.iipnetwork.org/>. [Accessed: 13-Nov-2018].
- [18] "World Aluminium." [Online]. Available: <http://www.world-aluminium.org/>. [Accessed: 13-Nov-2018].
- [19] "International Carbon Flows | Report | Carbon Trust." [Online]. Available: <https://www.carbontrust.com/resources/reports/advice/international-carbon-flows/>. [Accessed: 13-Nov-2018].
- [20] M. Papanikolaou *et al.*, "Design Optimisation of the Feeding System of a Novel Counter-Gravity Casting Process," *Metals (Basel)*., vol. 8, no. 10, p. 817, Oct. 2018.

Integration gießtechnischer Aspekte in die Entwicklung Großmotor – Gusskomponenten

Dipl.-Ing. **Johannes Heger**, Heger Group Enkenbach-Alsenborn;
Dr.-Ing. **Götz Hartmann, Mathias Bodenburg**, MAGMA, Aachen

Kurzfassung

Die klassischen Anforderungen an Gusskomponenten von Großmotoren haben sich in Jahrzehnten nicht geändert: absolute Robustheit oder zuverlässige Eigenschaften aus dokumentierter Produktion sind und bleiben wichtig. Viele konservative Konstruktionen werden allerdings derzeit überarbeitet oder durch neue ersetzt, da die notwendigen Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz, der Änderungen bei den Betriebsstoffen oder neue Umweltregularien bis in die Konstruktion der Motorenkomponenten durchschlagen. Dabei werden natürlich die heute zur Verfügung stehenden CAE Technologien eingesetzt. Berechnungen des Komponentenverhaltens unter thermischen und mechanischen Lasten sind Stand der Technik ebenso wie rechnerische Voraussagen über Lebensdauer bzw. Dauerfestigkeit.

Ein oft noch akzeptierter weißer Fleck ist die Berücksichtigung der zu erwartenden lokalen Eigenschaften der gegossenen Komponenten: Diese werden üblicherweise für das gesamte Gussteil vorgegeben, wobei die Einhaltung der Vorgaben später durch entsprechende Dokumentationen seitens der Hersteller nachgewiesen werden. Mit Hilfe von Gießprozesssimulatoren lassen sich solche Eigenschaften weitgehend schon während der Komponentenentwicklung voraus berechnen: lokal verteilte Gefügeanteile und daraus abgeleitete lokale mechanische Eigenschaften oder Eigenspannungen im Rohgussteil und nach der Bearbeitung lassen sich nicht nur zum Zeitpunkt der Entwicklung vorausberechnen, sondern mittels virtueller DOE's optimieren. Ebenso können diese DOE's darauf abgezielt werden, verschiedene Design- bzw. Konstruktionsvarianten auf ihre Robustheit in der Gussfertigung hin zu bewerten bzw. zu optimieren.

In diesem Beitrag wird am Beispiel von Gusseisen – Großmotorkomponenten sowohl die Methodik des Frontloadings von rechnerisch ermittelten lokalen Gussteileigenschaften in die Entwicklung, als auch die Anwendung virtueller DOE's zur Prüfung von Design- und Prozessvarianten beleuchtet – beides im Sinne einer modernen, methodischen und integrierten Komponentenentwicklung.

Abstract

The classic requirements for metal cast heavy duty engine components did not change for decades: absolute robustness or reliable properties from a documented or certified production are important and will remain so. But the today's measures to increase the engine's efficiency, to modify for alternative fuels or to adapt to new environmental regulations make it necessary to review and modify existing designs or even to replace them by completely new ones. Of course the actually available CAE technologies build an engineering backbone for that: Simulations of the component behavior under thermal and mechanical load are state of the technology as well as simulated predictions on durability and life time.

One gap in this context which is often accepted is the consideration of expectable local mechanical properties of metal cast components: usually they are specified as uniform values for the entire part. The compliance with the specifications must then be documented by the manufacturer. With the simulation of casting processes such properties can be predicted already during the design phase of components: locally distributed microstructures and the deduced local mechanical properties and residual stresses of the raw casting, after machining or heat treatment can not only be predicted during the design phase, but optimized in virtual DOE's. Such DOE's can also be targeted to assess different design variants for their robustness in casting manufacturing and finally find the best design for this.

In this contribution the method of frontloading simulated local casting properties to the development as well as the application of virtual DOE's for an assessment of design and process variants will be documented on an example of a cast iron heavy duty engine component – both in the sense of an up to date, methodic and integrated engine component development.

1. Gusskomponenten in Verbrennungskraftmaschinen

Bereits 70 Jahre vor ihrem Auftreten in Automotormotoren Ende des 19. Jahrhunderts wurden Komponenten aus Gusseisen wegen ihres Potenzials für Leichtbau und Funktionsintegration in Dampfmaschinen eingesetzt. Seit damals gibt es eine parallele Entwicklung von Motorenkonstruktion und –Leistung auf der einen Seite und Eisenguss-prozessen, -metallurgie und Werkstoffperformance auf der anderen Seite. Rückblickend ist klar, dass sich die Anforderungen der Motorenentwickler und die Möglichkeiten im Eisenguss gemeinsam entwickelt und immer voneinander profitiert haben.

Frühe Eisengusskomponenten wie Kurbelgehäuse weisen ein sehr robustes „Design for Manufacturing“ auf (Bild 1.), was bedeutet dass viele Arten von Gussfehlern akzeptabel waren.



Bild 1: Robustes „Design for Manufacturing“ einiger Gusseisenkomponenten
(Benz Motorwagen 1886, [1])

Im Gegensatz dazu sind heutige Designs nicht einfach zu gießen: komplexe Geometrien werden gefragt, Wandstärkenübergänge, die nahezu komplett Abwesenheit von Gussfehlern, enge Qualitätsvorgaben und strenge Dokumentationen werden in einem Zusammenhang gefordert. Selbst evolutionäre Varianten von Komponentendesigns werfen neue Probleme in der Gussfertigung auf, offensichtlich weil die Prozessfenster zu eng für die einfache Übertragbarkeit bewährter Parameter auf die modifizierten Varianten sind.

So ist festzustellen, dass selbst eine evolutionäre Variante eines Komponentendesigns in gießtechnischer Hinsicht als „erstes seiner Art“ Individuum behandelt werden muss. Als konsequente Folge davon muss eine enge und früh einsetzende Zusammenarbeit zwischen Entwicklern von Gusskomponenten und Gussexperten gefordert werden.

2. Kostenverantwortung und Front Loading

Um 1860 erkannten Entwicklungs- und Fertigungsingenieure, dass die Beeinflussbarkeit und damit die Verantwortung für Fertigungskosten zu ca. 70% in der Komponentenentwicklung liegen. Beim googlen nach „Kostenverantwortung und Kostenverursachung“ erscheinen hunderte Grafiken aus hunderten von Veröffentlichungen, Vorlesungsskripten oder Fertigungshandbüchern, die alle diesen Sachverhalt belegen. (eine aus diesen hunderten: Bild 2.)

In vielen Veröffentlichungen wird das als gegeben vorgestellt, etliche diskutieren aber auch Methoden, die Fertigungskosten auf der Grundlage der Kenntnis und Akzeptanz dieses Sachverhaltes zu reduzieren. Hier findet man dann Begriffe wie „Simultaneous Engineering“ oder „Front Loading“.

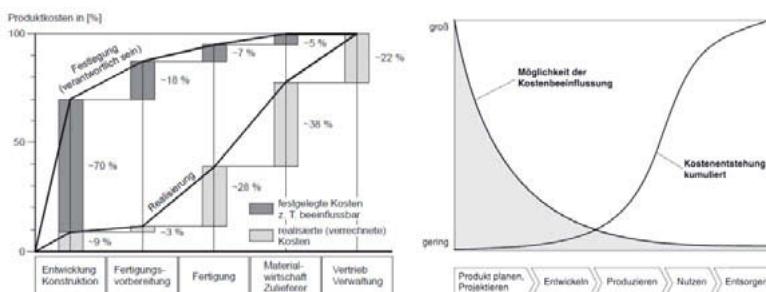


Bild 2: Das Potenzial zur Beeinflussung von Fertigungskosten (links) und die Verantwortung für diese Kosten (rechts) liegen in der Komponentenentwicklung ([2] K. Ehrelsing et al., 2014).

Bei der Entwicklung und Produktion von Gusseisenmotorblöcken seit den 1860ern spielten „Simultaneous Engineering“ und „Front Loading“ eine klare Rolle. Erst neuere Beschaffungs- und Einkaufsstrategien – erstmals gefordert von Ignatio Lopez – formatierten die B2B Kooperationen entlang des Produktlebenszyklus in kleine und leicht kontrollierbare Abschnitte. Als Ergebnis daraus trat die Abteilungs- und Unternehmensübergreifende zieldienliche Kooperation in den Hintergrund, so dass sie mit wenigen Ausnahmen schwierig und selten geworden ist. Um es plakativ auszudrücken: Der Produktlebenszyklus von der Entwicklung zur Serienfertigung wird in Abschnitte in den Händen vieler beteiligter Abteilungen und Unternehmen zerstückelt, die jeweils bevorzugt ihre eigenen Interessen an Budgets, Zeitplänen, Kosten, Profite und Lieferqualität verfolgen.

Aber selbst wenn jeder Teilnehmer dieses schrittweisen Vorgehens sein Bestes liefert, bleiben große Potenziale durch Integration der Prozesskette liegen. Das ist nicht nur frustrierend für jeden guten Ingenieur, sondern sorgen auch für suboptimale wirtschaftliche und administrative Angelegenheiten wie „Time to Market“ oder das Kosten/Profit Verhältnis. Es ist klar, dass in Abwesenheit einer technisch/wirtschaftlichen Verantwortung für die gesamte Prozesskette wesentliche technische und wirtschaftliche Potenziale nicht gehoben werden.

Daraus ergibt sich der hier vorgestellte Ansatz, ganz wesentliche Kosten- und Zeitpotenziale durch die Integration virtueller Gießprozessanalyse und –Optimierung zu heben, auch wenn man in die Zeiten vor Lopez zurückfällt.

2.1 Virtual Assessment von Gussteilperformance und Gießprozess

In den 1980ern erschienen neue Simulationstechnologien für Gießprozesse zunächst in den Gießereien. Sie folgten den ersten, nahe der Entwicklung positionierten Technologien zur numerischen Simulation des Komponentenverhaltens unter Last, und ergänzten die User Community um Fertigungsfachleute für Gießereiprozesse.

Von Anfang an gab es Bestrebungen, zukünftige Ereignisse in der Gusskomponenten-fertigung bereits bei deren Entwicklung vorauszuberechnen. Die Ergebnisse, die man aus der Gießprozesssimulation für Eisengussteile gewinnt, sind:

- Mögliche Risiken für Gussfehler
- Lokale Gefüge und daraus berechnete lokale Eigenschaften
- Lokale Eigenspannungen und Verzug im Gusszustand, sowie im bearbeiteten oder wärmebehandelten Zustand

Dabei stellen die berechneten lokalen mechanischen Eigenschaften höchst wertvolle Informationen für virtuelle Tests (FE-Berechnungen) der Komponentenperformance unter statischen Lasten dar. Lokale Eigenspannungen beeinflussen wiederum das Komponentenverhalten unter Wechselbelasten, also die Dauerfestigkeit. Es ist keinesfalls neu, die Ergebnisse aus Gießprozesssimulationen zur Verbesserung der Voraussagen von FE-Berechnungen heranzuziehen ([3] Kallien, Rösch, 1999).

2.2 Der Wert des „Virtual Casting Test“ Ansatzes

Während der Entwicklung von Gusskomponenten eine Beurteilung von Fertigungsrisiken und Potenzialen verfügbar zu haben, ist von immensem Wert. Im Vergleich dazu ist der Preis dafür gering: Die Kosten für einen maximal detaillierten virtuellen Casting Test z.B. für ein Heavy-Duty Kurbelgehäuse, durchgeführt vor Design Freeze mag bei maximal 1.500€ liegen. Dem gegenüber stehen mindestens eine Größenordnung höhere Kosten für den Abguss und die Vorbearbeitung eines ersten Gussteils, die detaillierte Prüfung aller kritischen Gussteilbereiche, Risikobewertung, Erarbeitung von Verbesserungsmaßnahmen, Änderungen der Gießtechnik und damit der Gussmodelle und womöglich Änderung des Komponentendesigns nach Design Freeze. Ein anderer Faktor ist die Zeit, wo ebenfalls von einem Unterschied von mehr als einer Größenordnung ausgegangen werden kann.

Diese Kostenunterschiede zwischen virtuellem und realen Casting Test sind harte Fakten. Weitere, weiche Fakten kommen dazu: Die Entwicklung einer Gusskomponente mit integrierten Virtual Casting Tests wird wesentlich effizienter, da grundsätzlich robuste Designs im Hinblick auf die Fertigung herauskommen. Die Wahrscheinlichkeit, nach design Freeze auf Grund von gießereitechnisch nicht lösbarer Problemen wieder in die Konstruktion zu gehen, sind auf

ein Minimum reduziert. Gleichzeitig ist ein Virtual Casting Test wesentlich informativer und führt schneller und treffsicherer zu Verbesserungsmaßnahmen als die Untersuchung eines fehlerhaften realen Gussteils. Alles dies führt zu den erwähnten immensen Werten der Virtual Casting Tests.

3. Assessment einer Designänderung an einer Gusseisenkomponente vor der Produktion

Jeder Fertigungsprozess, sei es Schweißen, Schmieden, Tiefziehen, Pulvermetallurgie oder Metallguss prägt die hergestellte Komponente. Im Falle von Gusseisenkomponenten rechnet man mit einer inhomogenen Verteilung der Gefüge und damit der mechanischen Eigenschaften sowie mit Eigenspannungen. Zusätzlich können lokal Gussfehler auf Grund örtlich kritischer Erstarrungs- und Abkühlbedingungen oder der Bildung von Mikrostrukturen, Oxiden oder anderen Einschlüssen auftreten.

Aus diesem Grund können geforderte Eigenschaften örtlich unter- oder überschritten werden. Natürlich gibt es gießereitechnische Maßnahmen, mit denen eine Reihe von Gussteileigenschaften in bestimmten Grenzen eingestellt bzw. kontrolliert werden können. Jedem Entwickler von Gusskomponenten muss jedoch klar sein, dass die Ursachen von ungleichmäßigen mechanischen Eigenschaften, Eigenspannungen und Verzug wesentlich von Designparametern wie z.B. Wandstärkenübergängen, Materialanhäufungen, Radien etc. abhängen und deswegen durch keine Gießereitechnische Maßnahme eliminiert werden können.

Wenn solche Probleme nach Design Freeze, nach Fertigstellung von Werkzeugen bzw. Modellen, im schlimmsten Fall nach Abguss und Bearbeitung der ersten Gussteile auftauchen, sind Zeitverzug, unbudgetierte Kosten und unerquickliche Diskussionen zwischen Gusseinkäufer, Entwickler und Gießerei unvermeidbar.

Sicher besser ist es, die erwähnten Problembereiche vorherzusehen, rechtzeitig vor Design Freeze zwischen Konstrukteur, Guss- und Simulationsexperten zu klären, wenn es noch Freiheitsgrade beim Komponentenlayout gibt ([4] Menne, Weiß et al., 2007).

Als Beispiel wird im Folgenden das Assessment einer Eisenguss-Komponente für einen Mariniediesel (Bild 3.) vor der Auslegung des Gießprozesses mit Hilfe eines „Virtual Casting Tests“ beschrieben. Ziel des Einsatzes der Gießprozesssimulation ist die Prüfung der Gießbarkeit und der Effekte einer aus gießtechnischen Gründen notwendigen Designänderung auf die Eigenschaften des Gussteiles, um letztendlich sicherzustellen, dass das erste Gussteil alle Spezifikationen erfüllt.



Bild 3: Integrated Front End (IFE) für einen GE L250 Inline Marinediesel, Sphäroguss (GJS 400), Gussgewicht 3.100kg. In dem rot markierten Bereich liegen integrierte Kühlwasserrohre.

Für die Gießerei ist die Auslegung des Gießprozesses in Bezug auf Metallurgie, Gießlage, Gieß- und Speisungstechnik sowie der Gießparameter gehobener Standard. Allerdings wurde ein Designdetail genauer untersucht: Für zwei lange Sandkerne, die integrierte Kühlwasserrohre abbilden sollen (s. Bild 3.), wurde das Risiko des Kernbruches durch metallostatische Auftriebskräfte vermutet. Es muss berücksichtigt werden, dass der Kernsand eine Zugfestigkeit von höchstens 25 N/mm² und eine Bruchdehnung von höchstens 1% aufweist. Die Dichteteunterschiede zwischen Kernsand (ca. 1,5kg/l) und der umgebenden Eisenschmelze (7,1kg/l) führt bei den maximal 81cm langen Sandkernen zu einem Auftrieb von 1.100N. Zusätzlich darf nicht vergessen werden, dass ein solcher Sandkern auch schon während des Eingießens der Schmelze versagen kann, wenn diese mit 1.200°C die Unterseite des Kernes aufheizt und hohe Eigenspannungen durch die hohen Temperaturgradienten im Sandkern entstehen. In solchen Fällen ist es üblich, den langen Kern mit zusätzlichen Kernmarken in der Sandform abzustützen (Bild 4.). Allerdings bedeutet eine solche Maßnahme, dass das Gussteil an dieser Stelle eine zusätzliche Öffnung aufweist und ist damit Gegenstand einer Freigabe durch den Komponentenentwickler.

Dazu müssen die möglichen Effekte einer solchen Designänderung durch Gießereifachleute geprüft und für die Entwicklung dokumentiert werden. Im vorliegenden Fall würde die zusätzliche Kernmarke einen kleinen Flansch an der Oberseite des Gussteiles hinzufügen, was Fragen im Hinblick auf erhöhte Risiken für Lunker oder Schrumpfungsoporosität auf Grund einer Erhöhung der lokalen Wandstärke, und auf erhöhte Risiken für zusätzliche Eigenspannungen auf Grund der an gleicher Stelle ungleichmäßigen Abkühlung aufwirft.

Beide Fragen können mit Hilfe der Gießprozesssimulation, die ein Assessment aller denkbaren Effekte der Designänderung ermöglicht, geklärt werden.

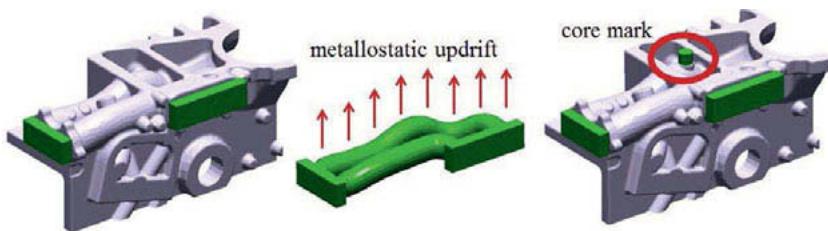


Bild 4: Gießtechnisch kritisches Segment der IFE-Komponente (s. Bild 3.). Der 81cm Sandkern mit einem Durchmesser von 10cm müsste eine Auftriebskraft von 1.100N aus halten. Eine zusätzliche Kernmarke (rechts, rote Markierung) soll den Kern in der Sandform verankern.

3.1. Virtuelles Assessment des Gießprozesses auf Gefüge und Porosität

Das Gefüge von Sphäroguss beginnt sich während der Erstarrung auszubilden, wenn die Größe des Wärmeflusses aus der erstarrnden Schmelze in den umgebenden Formsand und in die Sandkerne die Erstarrungsrate, also das Schmelzvolumen, welches pro Zeit erstarrt kontrolliert. Außerdem beeinflussen einige metallurgische Parameter die Bildungskinetik von Graphitkugeln und die Größenverteilung der eutektischen Zellen. Später kontrollieren die lokalen Abkühlbedingungen – wiederum abhängig von den Bedingungen des Wärmeflusses aus dem Gußteil in die Form – sowie bereits entstandene Erstarrungsgefüge die durch Festkörperumwandlungen entstehenden Gefüge bei Raumtemperatur.

Lunker und Porosität entstehen ebenfalls bei der Erstarrung, wenn die Volumenabnahme beim Übergang von Schmelze zum Kristall nicht durch die Volumenzunahme im Zusammenhang mit der Ausscheidung von Graphit aus in der Schmelze gelöstem Kohlenstoff kompensiert werden kann. Heute, sind die physikalischen Modelle für Formfüllung, Erstarrung, Gefüge- und Eigenschaftsbildung von Gusseisenkomponenten anerkannt ([5] Sturm, Schäfer, 2017) und erlauben eine zuverlässige Voraussage der Einflüsse einer Designänderung wie oben erwähnt (s. Bild 4.) auf potenziell entstehende Porosität und das zu erwartende Gefüge.

Die Designbasis für das Assessment war das Rohgussteil, inklusive Modellschrägen und Bearbeitungszugaben. Es wurde mit der kommerziellen MAGMASOFT Simulations- und Optimierungssoftware mit den Modulen MAGMAiron und MAGMAstress durchgeführt. Der Workflow des Virtual Casting Assessments besteht aus den folgenden Schritten (typischer Zeitaufwand in Klammern):

- Einlesen der 3D-CAD Geometrie in MAGMASOFT (10 min)

- Automatische Vernetzung, Auflösung mm – cm (15 min)
- Definition von Gießparametern in einer DOE (35 min)

Demnach ist es also möglich, mit einem Aufwand von etwa einer Mannstunde eines kompletten Virtual Casting Assessments zu starten. Je nach dem Umfang der virtuellen DOE beträgt der Rechenaufwand Stunden bis Tage.

Bei dem hier vorgestellten Beispiel wurden einige Gießprozessparameter wie Gießtemperatur, Effektivität der Keimbildung und Graphitausscheidung in einer virtuellen DOE mit 60 Varianten, jeweils für die beiden zu vergleichenden Designvarianten mit und ohne zusätzlicher Kernmarke berücksichtigt. So war es möglich, die möglichen Effekte verschiedener üblicher Gießbedingungen auf Qualitätscharakteristika der beiden Varianten abzuprüfen (Bild 5.).

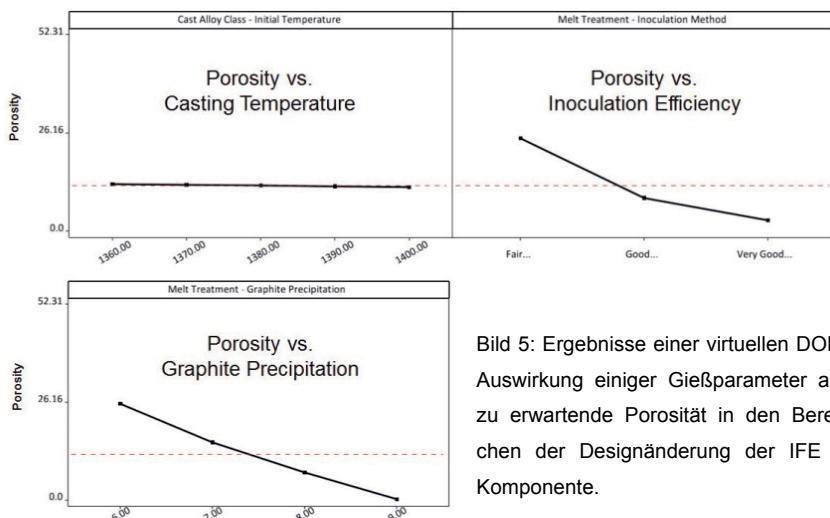


Bild 5: Ergebnisse einer virtuellen DOE, Auswirkung einiger Gießparameter auf zu erwartende Porosität in den Bereichen der Designänderung der IFE – Komponente.

Ein direkter Vergleich der beiden Designvarianten zeigt praktisch keinen Unterschied in der Porosität (Bild 6., Auswertung des Bereiches der Designänderung). Das allgemeine Niveau der Porosität ist sehr niedrig, letztendlich als Ergebnis der kontrollierten Werkstoffanalyse, re-

lativ langer Erstarrungszeiten in den dickeren Bereichen der Gusskomponente sowie effektiven Schmelzebehandlungen, die zu einer hohen Anzahl von Graphitkugeln und einer ausschließlich auftretenden Kugelform des Graphits führen.

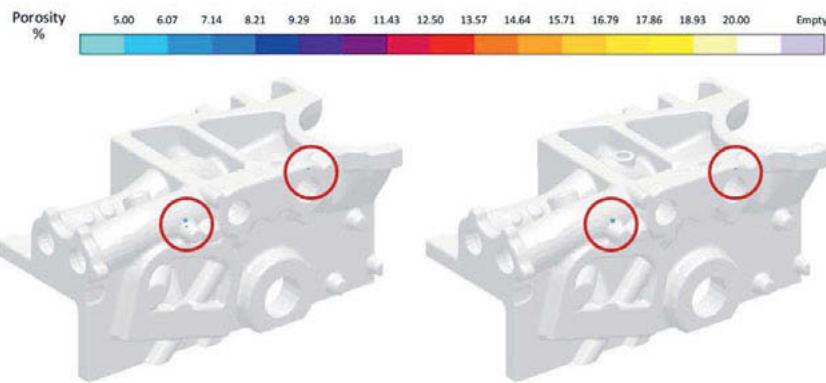


Bild 6: Sehr niedrige Porosität beider Designvarianten, sichtbar innerhalb der roten Markierungen. Die Designänderung (rechte Variante) führt zu keiner Erhöhung des Porositätsrisikos.

Ein weiterer für die Freigabe der Designänderung zu prüfender Punkt ist deren Einfluss auf die lokalen Gussgefüge wie Sphärolitendichte oder Perlitanteil. Die Sphärolitendichte ist die Anzahl der eutektischen Zellen pro Volumen (diese ist die Entsprechung einer Korngröße bei Eisengusswerkstoffen). Die Sphärolitendichte beeinflusst mechanische Eigenschaften wie z.B. die Bruchdehnung. Der Wert des Perlitanteils im Gefüge deutet darauf hin, wieviel des Erstarrungsgefüges Austenit sich bei der eutektoiden Umwandlung in Perlit umgewandelt hat. Deswegen steht der Perlitanteil für mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit oder E-Modul.

E Designänderung beeinflusst weder die Sphärolitedichte (Bild 7a.) noch den Perlitanteil (Bild 7b.) in der Umgebung der Designänderung im Gussteil. In demselben Kontext sind auch die lokalen mechanischen Eigenschaften der beiden zu vergleichenden Varianten gleich. Aus diesem Blickwinkel ist also die vorgeschlagene Designänderung für einen robusten Gießprozess ohne negative Wirkung und kann deswegen bedenkenlos freigegeben werden.

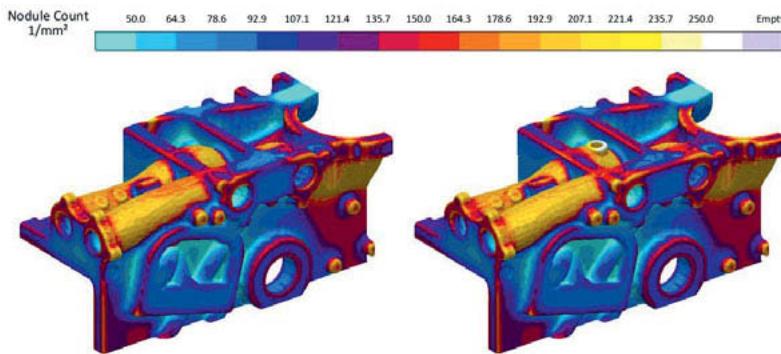


Bild 7a: Die Anzahl der eutektischen Zellen (Sphärolitendichte) wird durch die Designänderung (rechts) nicht beeinflusst.

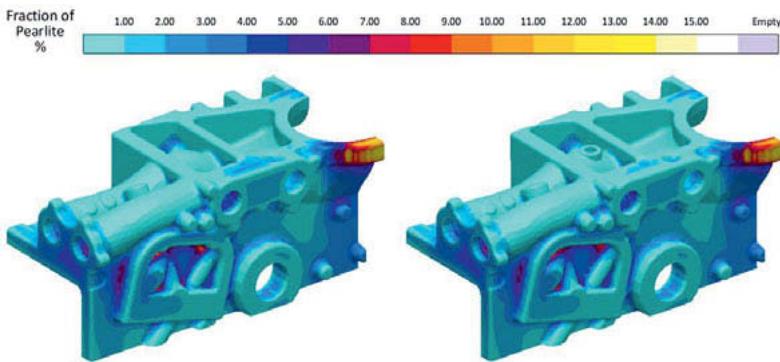


Bild 7b: Der Perliteanteil im Gefüge wird ebenfalls durch die Designänderung (rechts) nicht beeinflusst. Beide Ergebnisse erlauben die Aussage, dass sich auch die lokalen mechanischen Eigenschaften im Bereich um die Designänderung nicht ändern werden.

3.2. Virtuelles Assessment des Gießprozesses auf Eigenspannungen

Ein weiterer Punkt zur Prüfung und Freigabe der Designänderung sind Gussteileigenspannungen, die normalerweise von Wandstärkenunterschieden und sich daraus ergebender ungleichmäßiger Abkühlung der Gusskomponenten ergeben.

Die Bildung von Spannungen während der Erstarrung und Abkühlung von Eisengussteilen ist ein komplexer Vorgang, der durch gekoppelte physikalische, metallurgische und thermomechanische Gegebenheiten beeinflusst wird. Er beginnt bei der eutektischen Erstarrung, wo die Bildung von Austenit aus der Schmelze mit einer Volumenabnahme und die Ausscheidung von Graphit aus dem in der Schmelze gelösten Kohlenstoff mit einer konkurrierenden Volumenzunahme einhergehen. Inhomogene Temperaturen – im Allgemeinen verursacht durch Wandstärkenunterschiede im Gussteil – führen ebenso zu Eigenspannungen wie Festkörperumwandlungen, bei den sich Phasen mit unterschiedlicher Dichte als die Ausgangsphasen bilden.

Die thermomechanischen Modelle zur Berechnung der Eigenspannungsentstehung während der Erstarrung, Abkühlung, Bearbeitung und gegebenenfalls Wärmebehandlung von Eisengusskomponenten benötigt werden, sind ebenfalls hoch entwickelt. Laufende Entwicklung der relevanten Solver und ortschritte in der Rechnerperformance führen zu einer permanent steigenden Zuverlässigkeit Verkürzung der Simulationsrechnungen. Insbesondere wenn zwei oder mehrere Designvarianten im Hinblick auf auftretende Eigenspannungen hin untersucht und optimiert werden sollen, sind die Vorhersagen sehr genau geworden ([6] Thomser et al.).

Im Falle der IFE Komponente, wurde die Gussteilerstarrung und –Abkühlung bis Raumtemperatur beider Designvarianten einem Virtual Casting Assessment auf Eigenspannung unterzogen. Der Vergleich der Variante mit zusätzlicher Kernmarke mit dem ursprünglichen Design weist auf keine unterschiedlichen oder kritischen Eigenspannungen hin (Bild 8.).

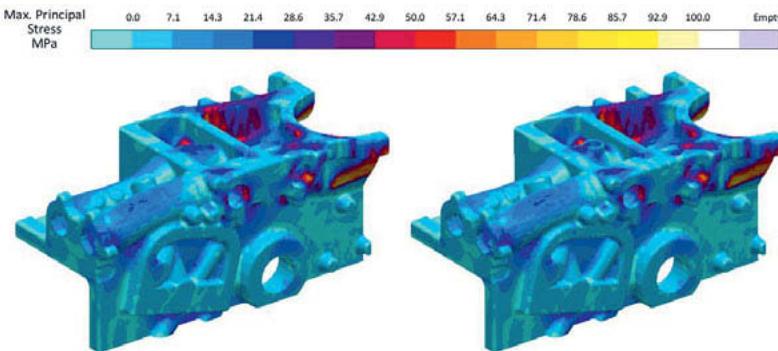


Bild 8: Die Maximalen Hauptspannungen (Zugeigenspannungen) im Gussteilbereich um die Designänderung. werden durch diese (rechts) nicht beeinflusst.

Dieser Check ist auch sinnvoll, um das gesamte Gussteil auf eventuell kritische Eigenspannungen hin zu untersuchen, da diese als Vorspannung des Gussteils einen erheblichen Einfluss auf die Dauerfestigkeit bei zyklischer Beanspruchung haben. Hier weisen die höchsten in beiden Designvarianten auftretenden maximalen Hauptspannungen (also die maximal auftretenden Zugspannungen) Werte um 100 MPa auf, sollten also für einen GJS 400 unkritisch sein

4. Schlussfolgerungen

Die Entwicklung von Groß- und Nutzfahrzeugmotoren geht permanent weite, getrieben von Innovations- und Wettbewerbsdruck, durch den Run um höchste Effizienz, niedrigstes Gewicht und natürlich härter werdende Umweltbestimmungen. Der erreichbare Fortschritt wird dabei durch Entwicklungskapazitäten und –Kompetenzen, Budgets und innovative Kombinationen von Methoden und Werkzeugen im Engineering befeuert

Zu den letztgenannten gehören auch alle Technologien für virtuelles Engineering, die dem Entwickler die Vorhersage der Qualität und der erreichbaren Spezifikationen nach der Fertigung der Komponenten ermöglichen – und damit die Grundlage für Designoptimierungen schaffen, die geeignet sind designverursachten Fertigungsproblemen rechtzeitig zu begegnen.

Eisengussteile werden die zentralen Komponenten in Groß- und Nutzfahrzeugmotoren für einen unvorhersehbaren Zeitraum bleiben. Innerhalb der letzten 30 Jahre wurden mehr als 1000 Mannjahre in die Entwicklung und Verifizierung der Gießsimulation und virtuellen Gusskomponentenoptimierung investiert. Heute ist es Stand der Technik, Programme zur Gießprozesssimulation vorhersagen zu lassen welche Eigenschaften eine Gusskomponente durch die Fertigungsprozesskette aufgeprägt bekommt. Da die Grundlage dafür lediglich die 3D CAD Daten einer Designvariante sind, kann jeder Entwurf auch früh in der Entwicklung geprüft werden. Diese Virtual Casting Assessments laufen im DOE Modus, so dass das Design einer Gusskomponente im Hinblick auf einen robusten Fertigungsprozess entwicklungsbegleitend bis hin zum Design Freeze optimiert werden kann.

In diesem Beitrag wurde das Ergebnis einer Kooperation zwischen Gussexperten der Gießerei und Komponentenentwicklern im Vorfeld der Fertigung dokumentiert: unvermeidbare Risiken für Gussteildefekte wurden mittels Virtual Casting Assessment aufgedeckt und quantifiziert, Verbesserungsmaßnahmen am Gussteildesign wiederum virtuell definiert, geprüft und dokumentiert. Diese Berechnungen erlaubten eine problemlose Freigabe der gießtechnisch notwendigen Maßnahmen.

Simulationstechnologien, im Sinne eines Simultaneous Engineerings von Gussexperten und Komponentenentwicklern vor Design Freeze genutzt, eliminieren Risiken und erlauben den Abguss einer den Spezifikationen entsprechenden Gusskomponente bei ersten mal.

Simulations- und Optimierungstechnologien wie hier beschrieben, sind seit mehr als 10 Jahren hoch entwickelt und zuverlässig, der Wert des simultanen Entwickelns seit mehr als 100 Jahren bekannt. Trotzdem tauchen immer noch zahlreiche Komponentendesigns in Gießereien auf, die ohne Assessment der Gießbarkeit bzw. der Risiken in der Gussfertigung Design Freeze erfahren haben, bei denen mögliche Potenziale moderner Gießtechnik und Metallurgie liegen gelassen wurden und so möglichen Fortschritt und Kosteneinsparungen blockieren.

Literatur

- [1] https://sv.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Benz_Patent_Motorwagen_Engine.jpg
- [2] K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, U. Lindemann, M. Mörtl, „Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren“, p13ff, Springer, 2014
- [3] Kallien, Lothar H., Raimund Rösch: "Einsatz der Simulation bei der Entwicklung eines Aluminium-Kurbelgehäuses", Giesserei Praxis Nr. 1, S 33-34, Januar 1999
- [4] Menne, R.J., U. Weiss, A. Brohmer, A. Egner-Walter, M. Weber and P. Oelling: "Implementation of Casting Process Simulation for increased Engine Performance and reduced Development Time and Costs – Selected Examples from FORD R&D Engine Projects", Proceedings of 28. Wiener Motorensymposium 2007
- [5] Schäfer, W. and J.C. Sturm: "Cast Iron - a predictable material: 25 years of modeling the manufacture, structures and properties of cast iron", Proceedings of 11th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron, September 2017 Jönköping, Sweden
- [6] Thomser, C., J. Olofsson, V. Gurevitch: "Influence of local Microstructure on Stresses, Durability and Fracture Mechanics of Cast Iron Components", Proceedings of 11th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron, September 2017 Jönköping, Sweden

GJV 500Si5: Der Werkstoff für kommende Nutzfahrzeugverbrennungsmotoren?

CGI 500Si5: A new material for heavy duty ICE's?

Dipl.-Ing. **Marc Walz**,

Fritz Winter Eisengiesserei GmbH & Co.KG, Stadtallendorf

Kurzfassung

Bisheriger Standardwerkstoff für hochbelastete Nfz-Zylinderkurbelgehäuse und -Zylinderköpfe war in den vergangenen 10 Jahren der seit 2006 international genormte GJV 450. Grund dafür ist die günstige Kombination aus thermischen und mechanischen Eigenschaften und der Bearbeitbarkeit. Bei der Entwicklung neuer Motoren generationen zeigen sich jedoch zunehmend Probleme, die oft nur noch mit entsprechenden Designkompromissen gelöst werden können. FW beschäftigt sich seit 2010 mit der Entwicklung einer neuen mischkristallverfestigten GJV-Sorte, mit dem Ziel die mechanischen Eigenschaften, insbesondere das thermomechanische Ermüdungsverhalten, zu verbessern. Als Ausgleich zu einer geringfügigen Steigerung der Herstellkosten gegenüber dem GJV 450 zeigt sich als positiver Nebeneffekt eine Verbesserung der Bearbeitbarkeit und eine Reduzierung des Werkzeugverschleißes um bis zu 15%. So dürfte sich unterm Strich ein zusätzlicher kostenseitiger Kundennutzen ergeben.

Abstract

Today's standard material for high performance heavy duty crankcases and cylinder heads is CGI 450 that has been normated internationally since 2006. The reason for that is a beneficial combination between thermal and mechanical properties and machinability. Developing new IC engines more and more problems show up that only can be solved by compromises in the design. Since 2010 FW is developing a new semi solution strengthened CGI material, with better mechanical and especially thermo-mechanical properties. Potential for compensation of slightly higher cost for that material, could be the improvement of machinability with a reduction of up to 15% in tool wear that has been achieved. The result is a material for higher loads with improved cost for machining.

1. Motivation und Zielstellung

Anfang der 1990er Jahre wurde unter anderem auch bei FW damit begonnen, sich intensiver mit GJV (Gußeisen mit Vermikulargraphit) zu beschäftigen. Der Werkstoff ist zwar schon seit Mitte des 20. Jahrhunderts bekannt, die Serienanwendung scheiterte aber an dem komplizierten Herstellprozeß und der schlechten Reproduzierbarkeit. Nach 3 Jahren Entwicklung waren diese Probleme gelöst und es wurde begonnen, Bauteile, zunächst Kleinserien für den Rennsport, aus GJV 500 herzustellen. Ende der 1990er Jahre wurden erste Nutzfahrzeug-Zylinderkurbelgehäuse aus GJV 450 in Großserie produziert. Das besondere Interesse an GJV resultiert aus der günstigen Kombination der thermischen und mechanischen Eigenschaften und es entstand eine richtige Werkstofffamilie, beginnend mit dem vollferritischen GJV 300, der teifferritischen Sorte GJV 400 und der vollperlitischen Sorte GJV 450. GJV 500, bei dem die Steigerung der mechanischen Eigenschaften durch eine Erhöhung des max. zulässigen Kugelanteils auf Kosten der Bearbeitbarkeit erreicht wurde, kam bis auf ein kurzes Intermezzo für ein ab 1998 produziertes PKW V8-Zylinderkurbelgehäuse nie zur Serienanwendung.

Mit dem VDG-Merkblatt W50 erfolgte im März 2002 ein erster Schritt zur Vereinheitlichung der Werkstoffcharakterisierung der einzelnen Werkstoffgüten. Seit August 2006 existiert eine entsprechende ISO-Norm (16112) und seit Februar 2012 die entsprechende DIN-Norm (16079). Im Laufe der Zeit stellte sich heraus, daß GJV 450 den idealen Kompromiss aus mechanischer und thermischer Beanspruchbarkeit für die Anwendung bei Zylinderköpfen und Zylinderblöcken darstellt, so dass bei FW seit einigen Jahren 70.000 to/ anno dieser Bauteile ausschließlich in diesem Werkstoff hergestellt werden.

Mit der Entwicklung von Motoren, die die Abgasvorschrift Euro 6 zu erfüllen hatten, gab es erste Hinweise seitens Kunden, daß es mit GJV 450 zunehmend schwieriger werde, die thermischen und mechanischen Anforderungen an Zylinderköpfen zu erreichen, ohne daß Risse entstehen bzw. ausreichender Restwandstärken nach Anrisse noch vorhanden sind. Grund dafür seien die steigenden Zünddrücke und steigenden Abgastemperaturen. Steigende Temperaturen verlangen nach einer Verbesserung der Wärmeabfuhr, z.B. durch Reduzierung der Flammboeddicke, während höhere Zünddrücke nach mehr Festigkeit bzw. einer Erhöhung der Wandstärke am Kompressionsboden verlangen, um eventuelle Durchrisse zu vermeiden. Ideal wäre also ein neuer Werkstoff, der beiden Anforderungen gerecht würde: Höhere Festigkeit bei besserer Wärmeleitfähigkeit!

2. Versuchsplanung und Materialqualifizierung

Abgeleitet aus den Erfahrungen mit den mischkristallverfestigten GJS-Sorten wurden Legierungen mit Kohlenstoffgehalten zwischen 2,5 und 3,5% und Siliziumgehalte zwischen 3,5 und

5,5% untersucht. Um eine Datenbasis für die üblichen FEM-Berechnungen bei potentiellen Kunden zu generieren, wurde beschlossen, mit der vielversprechendsten Variante reale Bauteile (NFZ-Zylinderköpfe) herzustellen. In Abstimmung mit dem Kunden wurden aus den funktionsrelevanten bzw. kritischsten Bereichen Materialproben entnommen und zur Bestimmung der Wärmekapazität, Dichte, und Temperaturleitfähigkeit bzw. Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Zug-Druck-Wechselfestigkeit und thermischen Ermüdung herangezogen. Es ergaben sich deutliche Verbesserungen beim statischen und dynamischen Festigkeitsverhalten. Die thermischen Eigenschaften zeigten eine geringfügige Verschlechterung. Außerordentliche Verbesserungen konnten hingegen beim TMF-Verhalten festgestellt werden.

3. Motorische Erprobung und Bewertung Bearbeitbarkeit

Für die motorische Erprobung und einer ersten Beurteilung der Bearbeitbarkeit des neuen Werkstoffs wurde ein Probelos aus 15 Zylinderköpfen hergestellt, die alle fertig bearbeitet wurden. Einige dieser Bauteile wurden für Dauerlauf- und Thermoschock-Versuche an Versuchsmotoren verwendet. Außerdem wurden 8 Zylinderkurbelgehäuse gefertigt, von denen 3 ebenfalls für eine motorische Erprobung verwendet wurden.

Zur Bewertung der Bearbeitbarkeit wurden neben den oben erwähnten Bauteilen zusätzlich Bearbeitungsproben ausgeliefert. Resultierend aus allen Bearbeitungsergebnissen, sowohl an realen als auch an Bearbeitungsproben, konnte eine Verbesserung im Werkzeugverschleiß von 10 – 15% festgestellt werden.

4. Fazit und Ausblick

GJV 500Si5 zeigt deutliches Potential zur Steigerung der Werkstoffeigenschaften von GJV. Insbesondere das TMF-Verhalten und die mechanischen Kennwerte lassen eine höhere Belastbarkeit des Werkstoffs vermuten. Erste Bearbeitungsergebnisse deuten auf eine Verbesserung des Werkzeugverschleißes und somit eine Reduzierung der Bearbeitungskosten hin. Vollständige Ergebnisse der motorischen Erprobung sind im Frühjahr 2019 zu erwarten.

Leichtbau bei Großmotorenblöcken

Lightweight construction at large engine blocks

Andreas Wenz, Robert Möller, Dr. Roberto dos Santos,
Gienanth GmbH, Eisenberg

1. Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Möglichkeiten beim Einsatz vom GJV in der Konstruktion von Großmotorenblöcken in der Klasse >1t bis 2t.

2. Abstract

High strength CGI (Compact Graphite Iron) are increasingly substituting previously used classical cast irons alloys in large engine applications, especially in the Class ranging from 1ton to 2ton .

This article will give an overview on the possibilities of using these high strength alloys in the construction of large engine blocks.

3. Anforderungen an Werkstoffauswahl, Entwicklung und Design

Durch die immer höheren Anforderungen wie z.B. durch striktere Abgasgesetzgebungen bei Großmotoren gewinnt die Auswahl des Werkstoffes immer mehr an Bedeutung. Zum Erreichen der stetig steigenden Abgasgrenzwerte und Reduzierung des Verbrauches bei gleicher bzw. höherer Leistung werden Diesel- und Gasmotoren mit immer höheren Einspritz- und Zünddrücken betrieben.

Für den Konstrukteur sind bei der Werkstoffauswahl Festigkeiten, Dehnung und Dauerfestigkeit zu berücksichtigen.

Auch der Bauraum und das Gewicht bei nichtstationären(mobilen) Motoren spielt bei der Auswahl eine wesentliche Rolle.

Bei entsprechender Werkstoffauswahl, z.B. GJS und GJV, und den jeweiligen Eigenschaften des Werkstoffes kann dies bei der Konstruktion berücksichtigt und z.B. mit dünneren Wänden konstruiert werden. Wobei der Werkstoff GJS bei Großmotoren und der Werkstoff GJV im PKW- und Nutzfahrzeugbereich häufig ihre Anwendung finden, so ist der Einsatz von GJV im Großmotorenbereich eher selten bzw. nicht eingesetzt. In unserem Beispiel sprechen wir von einem Rohteilgewicht von 1 bis 2t.

Nach wie vor werden aber auch noch Fragen der Wirtschaftlichkeit geprüft. Die einzelnen Werkstoffe unterscheiden sich nicht nur in ihren Eigenschaften sondern auch bei den Herstellkosten bzw. Gesamtkostenbetrachtung. Auch eine gute Bearbeitbarkeit wird in die Kostenbetrachtung mit einbezogen. So gibt es Neuentwicklungen bei denen der Werkstoff GJL aufgrund seiner guten Dämpfungseigenschaften und Bearbeitbarkeit nach wie vor gewählt wird.

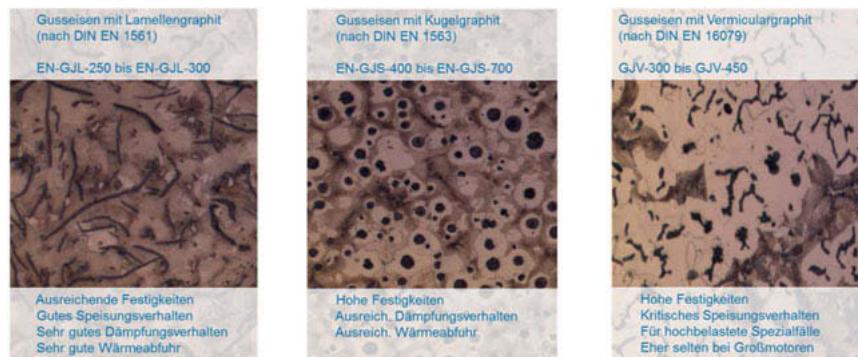


Bild 1: Gusseisenwerkstoffe

Neben den klassischen GJS-Güten gibt es auch zunehmend die Nachfrage von mischkristallverfestigtem Gusseisen mit Kugelgraphit. Dieser Gusswerkstoff zeichnet sich im Vergleich zu dem klassischen GJS und bei gleicher Zugfestigkeit durch eine höhere Bruchdehnung und einen gleichmäßigeren(homogener) Härteverteilung aus. Dadurch erhöhen sich die Möglichkeiten des Konstrukteurs in Bezug auf die gestiegenen Anforderungen an das Bauteil und des Leichtbaupotenzials. Gegenüber dem klassischen GJS ist dieser mischkristallverfestigte GJS mit ferritischem Grundgefüge besser zu bearbeiten was zu Kosteneinsparungen führt.

In unserem Fall gab es bereits Motorblöcke aus dem Nutzfahrzeugbereich mit dem Werkstoff GJV die noch auf einer Formanlage gefertigt werden konnten. Die Erfahrungen aus dieser Entwicklung wollte man für die Weiterentwicklung von noch leistungsstärkeren Motoren mit den Zylindervarianten V16 und V20 nutzen. Die hierzu benötigten Motorblöcke können jedoch aufgrund der Größe nicht auf einer Formanlage gefertigt werden sondern werden im Handformguss-Verfahren hergestellt.

Anhand eines ersten groben Konzeptes (Bild 02) erfolgten die Anfrage bei den verschiedenen Gießereien und die Entscheidung für den zukünftigen Lieferant und Entwicklungspartner. Diese Vorgehensweise ist wünschenswert und zu empfehlen, da gerade vor finaler Festlegung der Bauteilgeometrie und bei der Ausgestaltung von Gussteilen es bereits im Vorfeld wichtig ist auf wesentliche Themen zu achten.

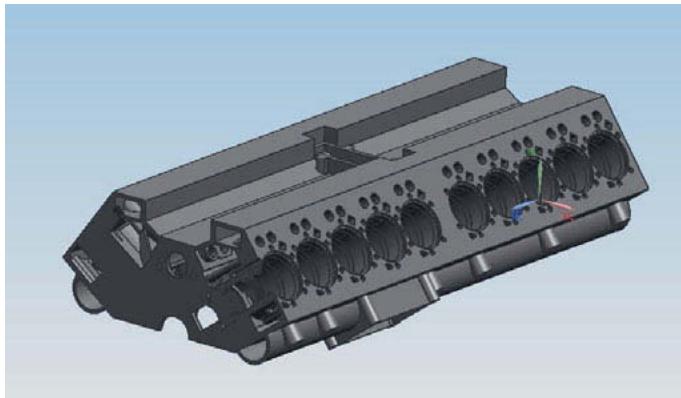


Bild 2: Ausgangskonzept

Sehr oft gibt es bereits bestehende Konstruktionen und die Gießereien müssen versuchen, diese für ihre Fertigung umzusetzen. Änderungswünsche lassen sich zu diesem Zeitpunkt nur noch schwierig einbringen, da die Entwicklung bereits weit fortgeschritten ist. Durch eine frühe Entscheidung des zukünftigen Lieferanten und Entwicklungspartners können viele verschiedene Entwicklungsstufen und Varianten auch mit Hilfe von Simulationsprogrammen seitens der Konstruktion und der Gießerei besprochen, geprüft sowie optimiert werden.

Das Bauteil ist somit, neben der Kostenseite(Vereinheitlichung Kerne, Bearbeitungszugaben etc.) und unter Berücksichtigung der Toleranzen, seinen Anforderungen der Konstruktion, dem Werkstoff, der Gieß- und Formbarkeit optimiert.

Es bleibt zu erwähnen, dass die nachlaufenden Prozessschritte wie Gussnachbehandlung und Prüfung des Bauteils ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Nach letzter Prüfung der CAD-Daten legt der Gießer das endgültige Formkonzept fest und die Modellplanung für die Werkzeugherstellung konnte abgeschlossen werden.

Dieses komplexe Bauteil mit den hohen Anforderungen an die Genauigkeit, kann durch maschinengefertigte Kerne und eine umfangreiche Kernpaketfertigung, bei der mehrere Einzelkernpakete zu einem Gesamtkernpaket montiert werden, umgesetzt werden. Eine allgemeine Wandstärke von 6 mm kann ebenfalls realisiert werden.

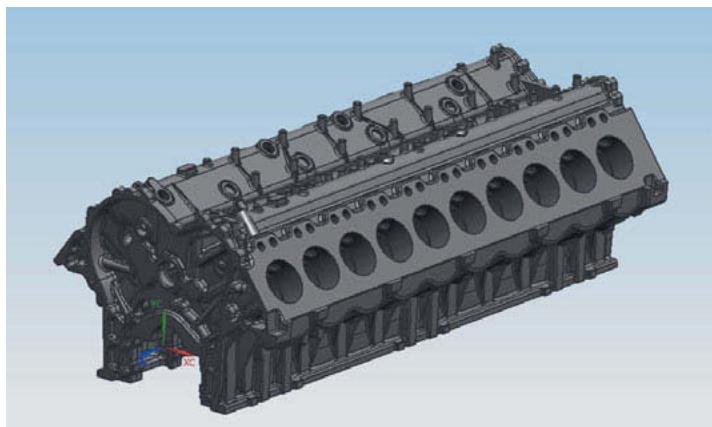


Bild 3: Bauteil im fortgeschrittenen Stadium. Der erste Großmotorblock (1-2ton) in GJV weltweit mit einer Wandstärke von 6mm.

4. Einsatz von Gießsimulation bei Gienanth

Wie bereits erwähnt kamen bei diesem Projekt Simulationsprogramme zum Einsatz. In der Gießereibranche ist es nicht vorstellbar ohne ein Simulationsprogramm Entwicklungs- bzw. Optimierungsarbeit zu leisten.

Das Simulationsprogramm unterstützt die Gussteilkonstrukteure und den Gießer bei der Entscheidungsfindung und Entwicklung der Design- und Fertigungsbedingungen. Bereits zu Beginn lassen sich verschiedene Designstufen und Prozessbedingungen darstellen und gegebenenfalls optimieren. Das Qualitätsrisiko und umfangreiche Versuche können dadurch reduziert werden. Dies hilft beim Erreichen der oft sehr anspruchsvollen Entwicklungszeitfenster.

Neben der Füllung der Form und Erstarrung können viele weitere Themen wie Metallurgie, Auslegung des Anschnittsystems und Speisungstechnik, Abkühlzeiten, etc. betrachtet werden.

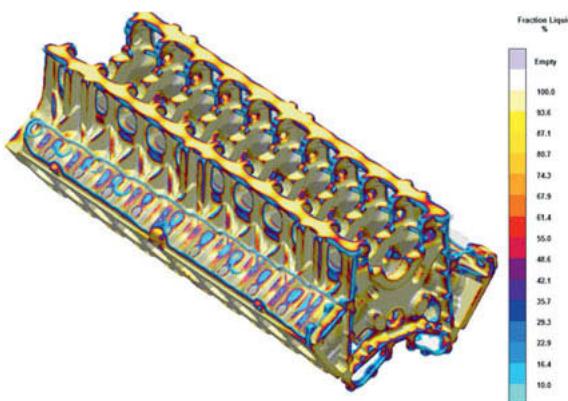


Bild 4: Erstarrung

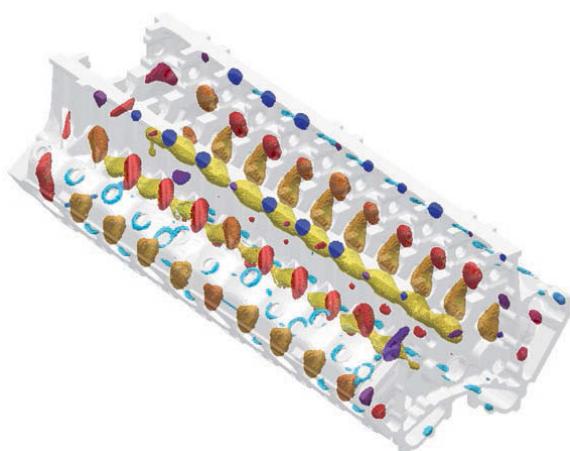


Bild 5: Wärmezentren. Basierend auf dem Rohteil CAD-Modell wird eine Bewertung des lokalen thermischen Zentrums durchgeführt, um die Auslegung des Anschnittsystems und Speisungstechnik.

Bei der Beurteilung der Formfüllung heißt es nicht, was formtechnisch machbar ist, ist auch gießbar, wie z.B. eine Wandstärke von 6mm. Je nach Lage des Bauteils in der Form und der Temperaturverteilung können Bereiche die Gefahr von Kaltlauf bergen. Die Simulation hilft im Vorfeld diese Bereiche zu identifizieren und gegebenenfalls im Design, Änderung des Anschnittsystems, oder Gießtemperatur anzupassen.

Seitens Gienanth betrachten wir nicht nur die Gießbarkeit des Designs.

Durch optimale Auslegung des Anschnittsystems und Ermittlung einer angepassten chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes, die Schmelzebehandlung inklusive Impfung, kann das Bauteil ohne Speiser und mit geringstem Kühleisen-Einsatz gefertigt werden.

Die erforderlichen mechanischen Eigenschaften in den verschiedenen Bauteilbereichen werden ebenfalls erreicht.

5. Gussteil, Messergebnisse

Nach Fertigstellung Modelleinrichtung und Fertigung des Musterteils zeigt sich bei der Qualitätsbeurteilung ob sich der Aufwand gelohnt hat und die bisherigen Annahmen und Ergebnisse in der Realisierung funktionieren.

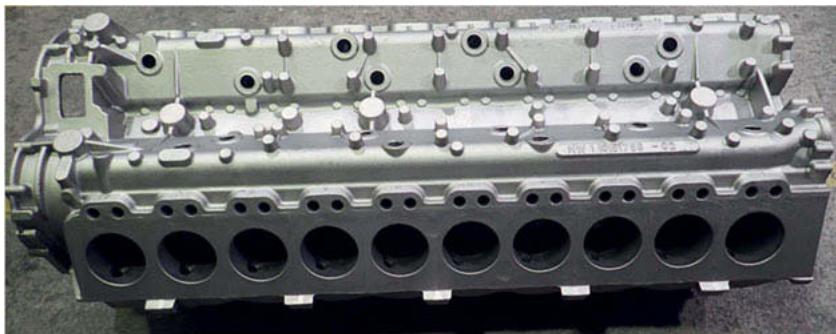


Bild 6: Gussteil

Nach der Überprüfung der Gussqualität erfolgt die maßliche Beurteilung. Neben den taktilen Messmöglichkeiten gibt es die Möglichkeit von optischer Messtechnik. Die optische Messtechnik ist aufgrund der komplexen Bauteilgeometrien und vorhandenen CAD-Daten zu empfehlen und gängige Praxis. Die Überprüfung der Maße und Toleranzen erfolgt durch einen Abgleich der flächenhaft erstellten dreidimensionalen Messdaten mit den CAD-Daten. Die Wandstärken und die Bearbeitungszugaben können ebenfalls geprüft werden.

Nicht alle Bereiche sind immer zerstörungsfrei durch die optischen Messsysteme zu erreichen und das Gussteil ist bei Bedarf für eine 100% Überprüfung der Maßhaltigkeit zu schneiden. Die Einzelergebnisse aus der Vermessung der Schnittstücke können über das Programm zu einem Gesamtmodell wieder zusammengefügt werden. Alle Abweichungen zwischen den Ist- und Soll-Daten werden durch die vorhandenen Flächendaten farbig dargestellt, sodass abweichenden Bereiche visualisiert und lokalisiert werden können.

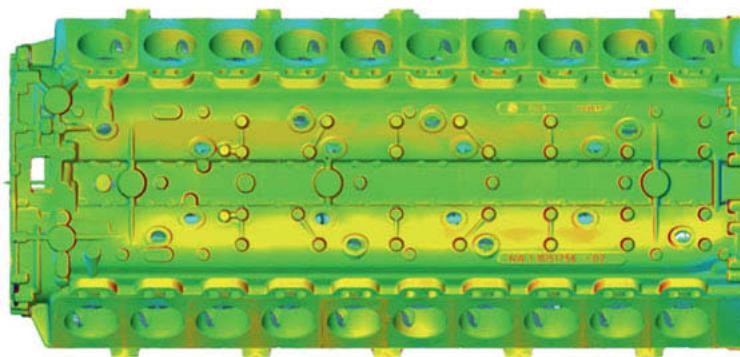


Bild 7: Messergebnis

Anhand der Messwerte, können zur Sicherstellung der optimalen Bearbeitung, Erstaufnahmepunkte für die Bearbeitung angebracht werden. Ein spezielles Programm errechnet die Daten für die automatische Positionierung und Bearbeitung der Aufnahmepunkte.



Bild 8: Ermitteln der Daten für die Aufnahmepunkte

In diesem Fall erfolgt die Qualitätsbeurteilung ohne Beanstandungen und die Musterteile konnten ohne weitere Entwicklungsschleifen verwendet werden.

6. Werkstoffergebnisse

Neben den Werkstoffwerten aus dem parallel gegossenen Probestab, werden zur Verifizierung der Ergebnisse aus den bei der Maßüberprüfung erstellten Schnittstücken, weitere Probestäbe, in Abstimmung mit dem Kunden, aus dem Bauteil entnommen und überprüft. Die einzelnen Bereiche sind aus dem Probeentnahmeplan zu entnehmen.

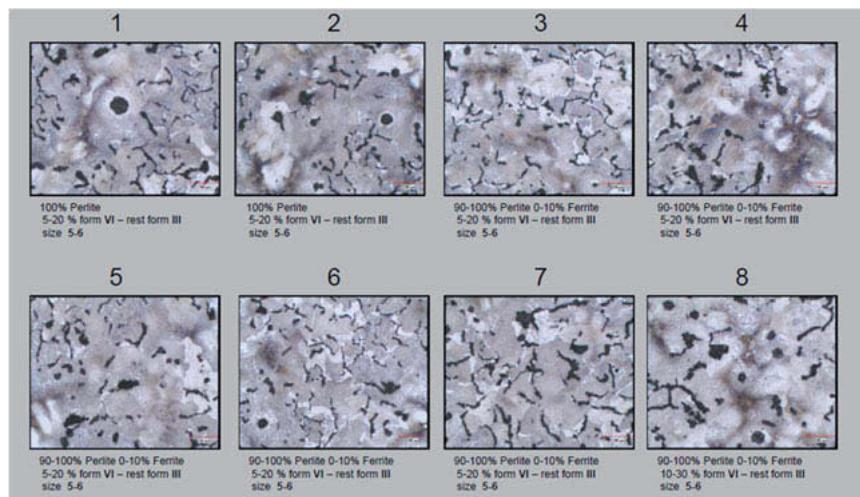


Bild 8: Gefügebilder und Gefügezusammensetzung

Tabelle 1: Werkstoffwerte aus den verschiedenen Bauteilbereichen

Zugversuch DIN EN 10002 - 1

Werkstoff	:	GJV- 450	Kunde	:
Nenndurchmesser	:	10	Modell-Nr.	:
Vorkraft	:	2	N/mm ²	
Geschwindigkeit E-Modul	:	30	MPa/s	
Prüfgeschwindigkeit	:	0,004	1/s	

Prüfergebnisse:

Nr	d ₀ mm	S ₀ mm ²	R _m N/mm ²	R _{p0,2} N/mm ²	A _s %	HB	Block Nr
1	10,1	80,12	466	343	1,6	230	0001
2	10,01	78,70	463	359	1,2	231	0001
3	10,03	79,01	441	342	1,3	219	0001
4	10,05	79,33	457	344	1,6	220	0001
5	10,1	80,12	454	333	1,9	216	0001
6	9,96	77,91	446	340	1,6	216	0001
7	9,96	77,91	452	338	1,7	225	0001
8	9,98	78,23	450	347	1,6	225	0001

7. Zusammenfassung

Gienanth ist die erste Gießerei weltweit die geschafft hat einen Großmotorenblock (1-2ton) mit einer Wandstärke von 6mm in GJV reproduzierbar und qualitätssicher herzustellen. Der Werkstoff GJV mit all seinen Komplexitäten ist beherrschbar.

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen werden bei der Werkstoffauswahl alle Werkstoffeigenschaften bei gleichzeitiger Kostenbetrachtung nach optimaler Möglichkeit ausgenutzt.

Zitat des Konstrukteurs: „Warum soll ich nicht alles fordern, wenn ich es doch bekommen kann.“

Bei mobilen Motoren ist das Gewicht nach wie vor entscheidend. Aber auch beim Ersatz „alter Motoren“ durch die neue Generation leistungsfähigerer Motoren, muss der vorhandene Bauraum optimal ausgenutzt werden.

Es werden stets ambitionierte Entwicklungszeiten mit wenig oder am besten keinerlei Entwicklungsschleifen verlangt. Die Prototypen sollen nah dem Serienstandard sein, damit nach erfolgreicher Erprobung ein rascher Serienanlauf erfolgen kann.

Die Qualitätsansprüche bei Großmotoren orientieren sich inzwischen an den Standards der Automobilindustrie.

Kosten- und Bauraumeinsparungen durch frühzeitige gemeinsame Entwicklung mit dem Kunden von funktions-integrierten Aluminium Sandgussteilen

Ausnutzung der maximal möglichen Optimierungen für die Erstellung von Aluminium Sandgussteilen

Ing. **Patrick A. G. M. Dings**, MGG Netherlands, Tegelen, Niederlande

Kurzfassung

Durch frühzeitige Einbindung der Lieferanten in der Entwicklungsphase kann man die maximal möglichen Optimierungen der Sandgussteile in ein Produkt implementieren. Mit dem Einsatz von Sandkernen gibt es nahezu unbegrenzte Möglichkeiten in Gestaltung von Geometrien wie z.B. Hohlräume, Hinterschneidungen sowie komplexen feinmaschigen Konturen. Man kann verschiedene Funktionen in ein Gussteil integrieren, sodass bei der Bearbeitung und Montage Kosten reduziert werden können. Auch kann Bauraum eingespart werden, da die notwendigen Freiräume zwischen den einzelnen Komponenten entfallen können. Formfüllung- und Erstarrungssimulationen werden in der gemeinsamen Entwicklung als wichtiges Entwicklungstool eingesetzt. Das durch MGG Netherlands angewandte Niederdruckgussverfahren ermöglicht den kostengünstigen Abguss von den entwickelten komplexen Gussteilen. Nachfolgend wird als Beispiel die Entwicklung von einem Aggregateträger für einen 12 Zylinder Dieselmotor von Liebherr vorgestellt.

1. Funktionsintegration in ein Aluminium Gussteil

Bei einem Motor gibt es üblicherweise viele Anbauteile wie z. B. Ölkühler, Ölabscheider, Ölpumpe, Wasserpumpe, Thermostatgehäuse usw. Diese Anbauteile lassen sich auch im Guss miteinander verbinden. Somit müssen die einzelnen Schnittstellen nicht bearbeitet werden und Dichtungen sowie Montagearbeiten entfallen.

Im Bild 1 ist der durch MGG gefertigte Aggregateträger für den Liebherr Motor D 9612 dargestellt. In diesem Aggregateträger sind die oben genannten Funktionen alle integriert. Das verbinden der einzelnen Kanäle konnte mittels komplexen Sandkernen realisiert werden. Das Bauteil wiegt etwa 50 Kg und hat die Abmessungen 900 x 840 x 350 mm. Die Produktion findet auf einer automatischen Formanlage bei MGG statt.

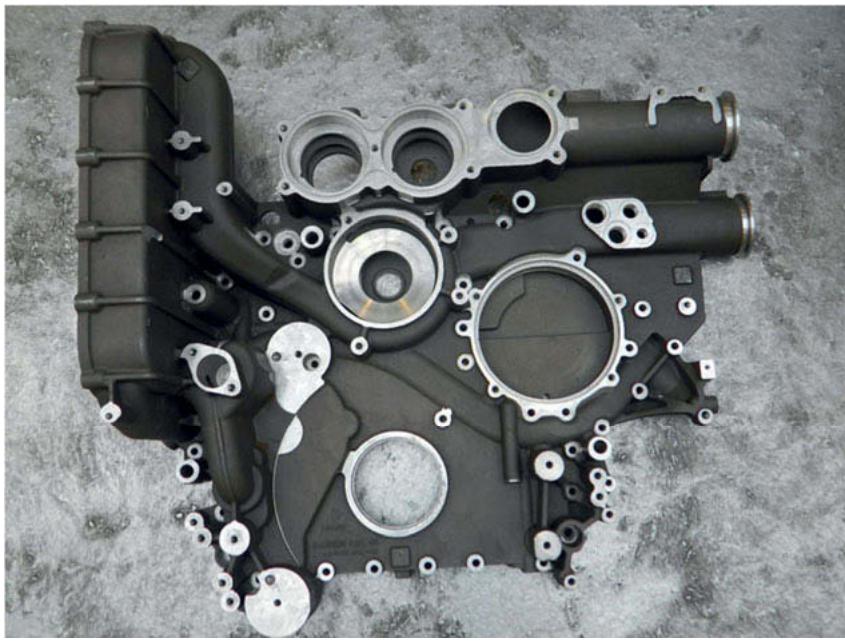


Bild 1: Liebherr Aggregateträger in Legierung EN AC-43000 T6

In Bild 2 sind die einzelnen Bauteile die in dem Aggregateträger integriert worden sind benannt. Die Kühlmittelführenden Kanäle sind blau gefärbt; die ölführende Kanäle sind orange gefärbt. Wie man sehen kann ist links das Ölfiltermodul mit den Ölkühler verknüpft, wobei das Kühlmittel durch die in der Mitte angeordnete Kühlmittelpumpe gespeist wird. Oberhalb dieser Pumpe sind die Thermostatgehäuse angeordnet. Weiter ist auch der Öldruckregler im Aggregateträger integriert. Rechts neben dem Öldruckregler wird die Ölpumpe befestigt. Der Ölabscheider ist rechts vor der Kühlmittelpumpe angeordnet.

Im Umkreis des Aggregateträgers sind Hilfswasserpumpe, Riemenantriebsscheiben, Dynamo und Kraftstofffilter verschraubt.

In Bild 3 ist die Anschraubseite vom Aggregateträger zum Motorblock zu sehen. An dieser Seite gibt es die verschiedenen Anschlüsse für Öl und Kühlmittel zum Motorblock. In Bild 4 ist der komplette D 9612 Liebherr Motor inkl. dem an der Vorderseite angebaute Aggregateträger zu sehen. Erkennbar ist die kompakte Bauweise mit den Anbauteilen auf diesem Aggregateträger ohne die üblichen vielen Leitungen zwischen den einzelnen Komponenten, was mechanische Bearbeitung, Montage und somit Kosten spart!

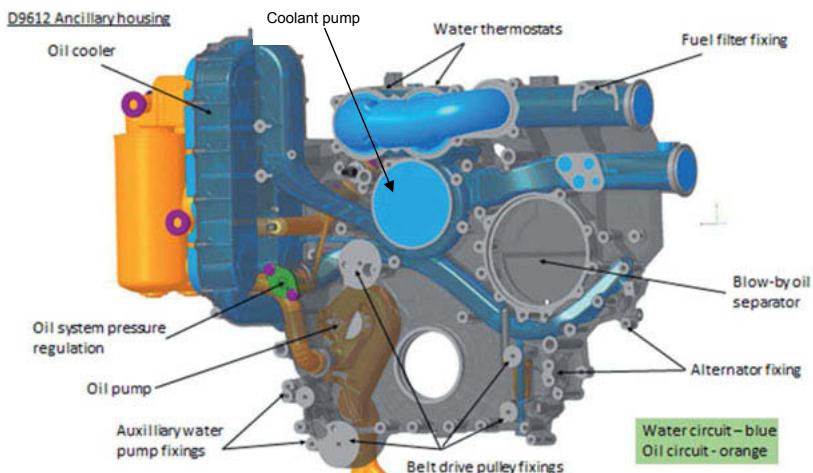


Bild 2: Aggregateträger D 9612 mit Benennung der verschiedenen integrierten Funktionen.

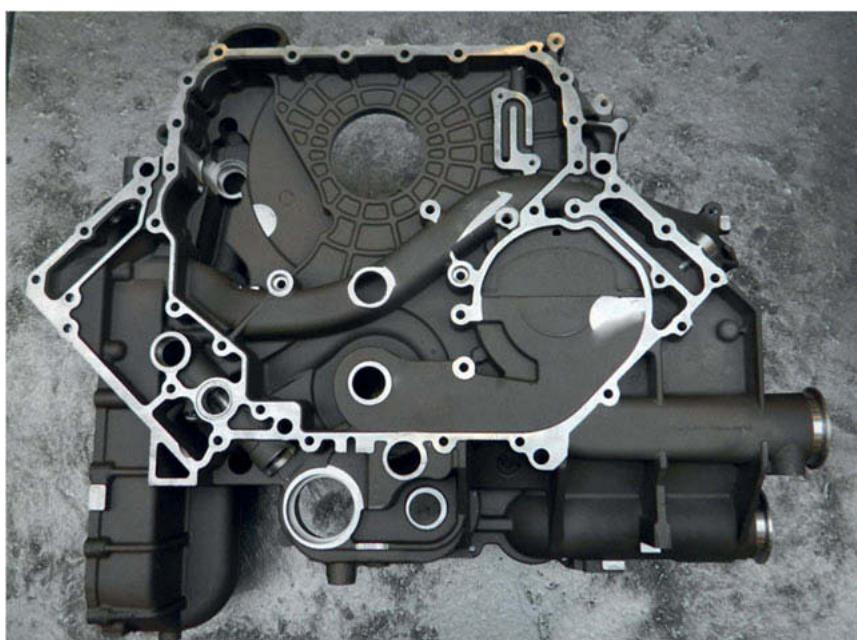


Bild 3: Anschraubseite Aggregateträger zum Motorblock



Bild 4: Liebherr Motor D 9612 mit dem angebauten Aggregateträger

2. Frühzeitige Zusammenarbeit in der Entwicklung und Einsatz von Formfüll- und Erstarrungssimulation als Entwicklungstool.

In dem Entwicklungsprojekt für ein kompliziertes Gussteil wie ein Aggregateträger ist es sehr wichtig, dass der Entwickler sich mit dem Gießer zusammensetzt, um die Machbarkeit der konstruierten Geometrie zu besprechen. Durch eine frühzeitige Kommunikation gibt es oft überraschende Lösungen für den Konstrukteur.

Unter anderem muss berücksichtigt werden, dass Kerne für eine Sicherung der Wandstärkentoleranz abgestützt werden müssen. Wichtig ist auch im frühesten Stadium die Gießbarkeit im Auge zu behalten, damit eine prozesssichere Befüllung und Speisung der konstruierten Geometrie möglich ist. Hier hat MGG die Möglichkeit mit MAGMASOFT die konstruierte Geometrie mittels einer Simulation auf Gießbarkeit zu prüfen. Als Beispiel ist die Formfüllungssimulation in Bild 5 bei 50%iger Füllung des Formholraums zu sehen.

Man kann hiermit prüfen, ob die konstruierte Geometrie sich ohne Kaltlaufrisiken befüllen lässt. Man kann aus diesem Bild erkennen, dass es nach etwa 6 Sekunden Gießzeit bereits innerhalb des Formhohlraums Bereiche gibt die 150 °C Temperaturverlust aufzeigen.



Bild 5: Formfüllungssimulation vom Aggregateträger bei 50%iger Befüllung vom Formhohlraum.

In Bild 6 ist die Erstarrungssimulation nach etwa 3 min. Erstarrungszeit zu sehen. Die durchsichtigen Bereiche sind bereits zu 100% erstarrt und die gelben Bereiche (meist Speiser) sind noch zu etwa 90% flüssig. Wichtig ist es mit dem Konstrukteur im Vorfeld dort wo es von der Bauteilfestigkeit möglich ist, Materialanhäufungen zu reduzieren, um die Erstarrung in den langsam erstarrenden Bereichen zu beschleunigen. Die komplexe Geometrie von dem Aggregateträger hat trotzdem an mehreren Stellen Materialanhäufungen die nachgespeist werden müssen. Die Erstarrungssimulation ist ein wichtiges Tool um im Vorfeld schon zu erkennen, ob die ausgewählten Speiser eine gelenkte Erstarrung ermöglichen, damit keine Lunker im Bauteil entstehen. Ziel ist es die Speiser als letztes erstarren zu lassen nachdem dem an den Speisern der angebundenen Gussteilbereich völlig erstarrt ist. Auch ist der Einsatz von Kühlkokillen für eine Beschleunigung und Lenkung der Erstarrung möglich. Weiter können hohe Porenklassenanforderungen in Dichtbereichen hierdurch besser eingehalten werden.

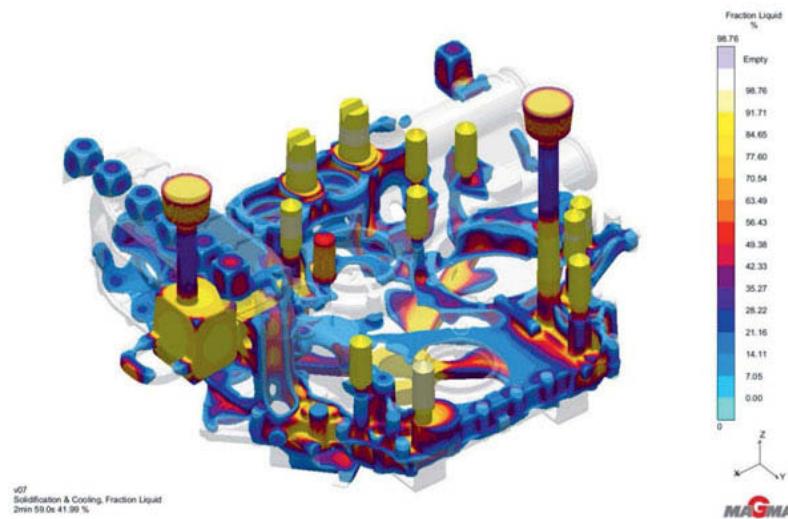


Bild 6: Erstarrungssimulation vom Aggregateträger nach ca. 3 Minuten Erstarrungszeit.

3. Einsatz von Niederdruckgussverfahren um komplexe Geometrie ideal befüllen zu können.

MGG hat seit 2008 die Möglichkeit, die Sandformen im 45 Sek. Takt von der HWS Formanlage mittels Niederdrucktechnologie, von unten zu befüllen. Hierbei ist die für Aluminiumguss optimal steigende Befüllung vom Formhohlraum gewährleistet und führt zur einer erheblichen Reduzierung von Gas- und Oxidbildung welche die Qualität und Festigkeit der Bauteile negativ beeinflussen können. In Kombination mit dem Kernpaket in Bild 7 vom Aggregateträger kann ein Zentralanguss unterhalb des Kernpaketes gemacht werden, wodurch die ideale Befüllung möglich ist. Mit kurzen Laufwegen vom Metall werden unnötige Temperaturverluste vermieden. Ein Weiterer Vorteil ist der reduzierte Kreislaufanteil wodurch weniger Aluminium geschmolzen werden muss und dem damit verbundenem geringeren Putzaufwand. Das alles zusammen spart erhebliche Kosten, wobei gleichzeitig die mittels Niederdruck gegossenen Teile eine deutlich bessere Gefüge Qualität haben als ein vergleichsweise im Schwerkraftguss gegossenes Bauteil. Im Bild 8 ist der gegossenen Rohling vom Aggregateträger im Oberkastenbereich mit den Speisern zu sehen. Die Gussqualität war nach dem ersten Abguss bereits hervorragend, womit sich die Zuverlässigkeit der Formfüllungs- und Erstarrungssimulation in Kombination mit den Niederdruckgussverfahren bewiesen hat.

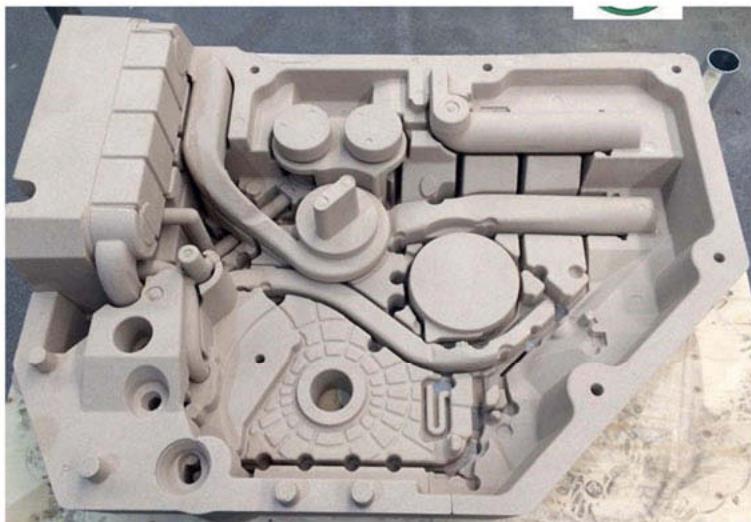


Bild 7: Kernpaket vom Aggregateträger zusammengesetzt aus 23 separate Kernen.



Bild 8: Sicht auf den vom Oberkasten geformten Bereich des Aggregateträgers

Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Gusseisen im Motorenbau durch methodische Integration der virtuellen gießtechnischen Optimierung in die Bauteilentwicklung

Dipl.-Ing. **Mathias Bodenburg**, Dr.-Ing. **Jörg C. Sturm**,
MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Kurzfassung

Die Anforderungen an Gusskomponenten von Großmotoren aus Gusseisen setzen zuverlässige Eigenschaften der Bauteile und robuste Fertigungsprozesse voraus. Durch den Zwang zu Leichtbau werden für die Konstruktion dieser Bauteile die heute zur Verfügung stehenden CAE-Technologien in großem Umfang eingesetzt. Berechnungen des Komponentenverhaltens unter thermischen und mechanischen Lasten sind Stand der Technik. Dabei werden die Materialeigenschaften der gegossenen Komponenten üblicherweise aus der Norm für das gesamte Gussteil vorgegeben. Darüber hinaus werden auch die Eigenspannungen aus dem Gießprozess vielfach nicht berücksichtigt. Diese Herangehensweise führt in der Regel zu großen Sicherheitszuschlägen bzw. Überdimensionierung und verhindert die systematische Er schließung und Nutzung des Werkstoffpotentials.

Die virtuelle Optimierung mit Hilfe der Gießprozess-Simulation kann hier einen substanziel len Beitrag leisten, indem dem Konstrukteur quantitative Informationen über die zu erwartenden lokalen Gefüge und Eigenschaften sowie aus dem Fertigungsprozess resultierende Eigen spannungen schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Designstadium zur Verfügung stehen. Mit diesen Informationen können Wandstärken, Radien, Übergänge etc. basierend auf den lokalen Eigenschaften ausgelegt werden. Das Werkstoffpotential kann gezielt ausgenutzt und eine Überdimensionierung vermieden werden.

1. Wanddickenabhängige Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften von Gusswerkstoffen sind wandstärkenabhängig. Genauer gesagt sind sie eine Funktion der lokalen Eigenschaften, die sich aus möglichen Defekten und dem lokalen Gefüge ergeben. Diese wiederum sind unter anderem eine Funktion der lokalen Ab kühlgeschwindigkeiten. Dies gilt insbesondere für Gusseisenlegierungen und wird entspre chend in der Norm berücksichtigt. Bild 1 zeigt einen Auszug aus der DIN-EN-1561. Die „Norm“-Mindestzugfestigkeit für einen GJL-250 bezieht sich auf einen getrennt gegossenen Probestab mit einem Durchmesser von 30 mm. Dies entspricht einer Wandstärke von 15 mm.

Werkstoff- bezeichnung	Kurzzeichen	Maßgebende Wanddicke in mm		Zugfestigkeit R_m in N/mm ² einzuhaltende Werte im getrennt gegossenen Probestück	Erwartungs- wert im Gussstück
		über	bis		
EN-GJL-250	EN-JL1040	5	10	250 bis 350	250
		10	20	—	225
		20	40	210	195
		40	80	190	170
		80	150	170	155
		150	300	160	—

Bild 1: Auszug aus der DIN-EN-1561 für Gusseisen

Die minimale Zugfestigkeit für angegossene Proben sinkt mit steigender maßgeblicher Wandstärke (vorletzte Spalte). Darüber hinaus gibt es nochmals einen Abschlag beim zu erwartenden Wert im Gussteil (letzte Spalte). Dies hat damit zu tun, dass eine Wand im Gussteil niemals isoliert betrachtet werden kann. Ihre Erstarrungs- und Abkühlgeschwindigkeit wird von angrenzenden Partien und etwaigen Gießhilfen (Speisern, Kühlkokillen etc.) beeinflusst. Es ist somit sehr schwierig, allein über eine lokale Wandstärke die sich einstellenden Gefüge und Eigenschaften vorherzusagen.

Mit Hilfe der Gießprozess-Simulation lassen sich, basierend auf metallurgischen und prozess-technischen Randbedingungen wie chemischer Zusammensetzung, Impfen, Auspackzeit etc., lokale Gefüge und Eigenschaften vorhersagen [1] (Bild 2).

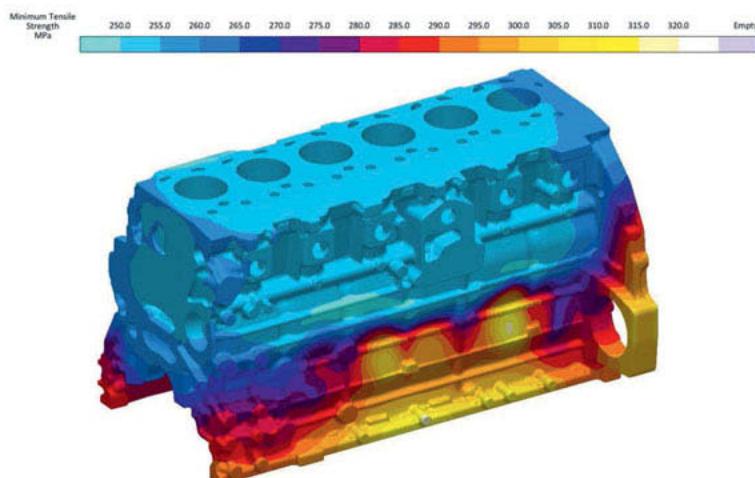


Bild 2: Lokale Mindestzugfestigkeiten in einem LKW-Motorblock

Bild 3 zeigt den Vergleich der gemessenen mit den simulierten Zugfestigkeiten eines Schiffs-dieselkurbelgehäuses. Diese Informationen können über vorhandene Schnittstellen in Programme zur Festigkeits- und/oder Lebensdauerberechnung exportiert werden und stehen dem Konstrukteur somit bereits bei der Auslegung neuer Bauteile zur Verfügung.

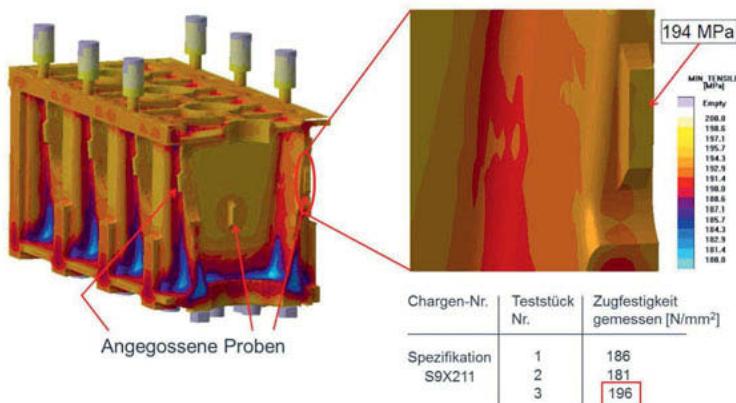


Bild 3: Vergleich der gemessenen mit der simulierten Zugfestigkeit

2. Eigenspannungen und Verzug

Eigenspannungen entstehen durch plastische Verformungen aufgrund lokal unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeiten. Da Gussteile beim Erstarren und Abkühlen aufgrund der unterschiedlichen Wandstärken und Abkühlung immer eine inhomogene Temperaturverteilung zeigen, hat jedes Gussteil bei Raumtemperatur Eigenspannungen [2]. Diese werden dann im Anwendungsfall durch thermische und/oder mechanische Spannungen überlagert und können je nach Belastungssituation die Auslegungssicherheit erhöhen oder erniedrigen.

Die entstehenden Eigenspannungen können auch einen Verzug des Gussteils zur Folge haben, der dann u. U. die nachfolgende Bearbeitung erschwert oder sogar ein Richten des Bauteils notwendig macht [10].

Neben den Temperaturunterschieden im Gussteil beim Erstarren und Abkühlen spielen Prozessbedingungen wie Auspackzeiten, Steifigkeit von Form und Sandkernen und der Zerfall von Sandkernen eine wichtige Rolle für die Entstehung von Eigenspannungen.

Die Bilder 4 und 5 zeigen den Vergleich von gemessenen mit simulierten Eigenspannungen an einem Zylinderrahmen aus GJS-400 für einen Schiffs dieselmotor. Für die Messung der Eigenspannungen wurde die Ringkern-Methode verwendet. Die größere Abweichung bei

Punkt Nr. 7 (Bild 5) erklärt sich aus der Nähe der beiden Messpunkte 7 und 8 zueinander. Das Bohren des Ringkerns beeinflusst auch die Eigenspannungen des Nachbarpunktes.

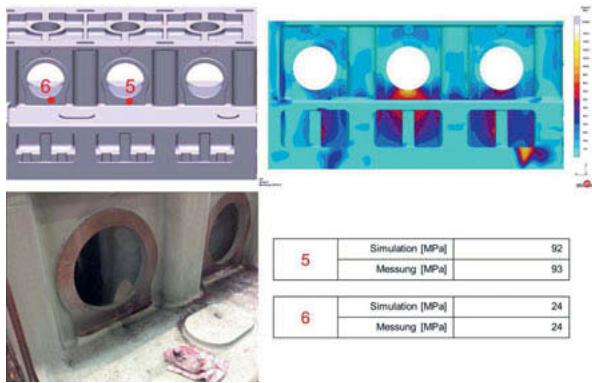


Bild 4: Vergleich der gemessenen und simulierten Eigenspannungen an einem Zylinderrahmen aus GJS-400

Auch die Eigenspannungen eines Gussteils können zur Festigkeits- und/oder Lebensdauerberechnung in CAE-Programme exportiert werden. Dadurch und durch die Kenntnis der lokalen Gefüge und Eigenschaften werden die herstellungsprozessbedingten Besonderheiten eines Gussbauteils berücksichtigt.

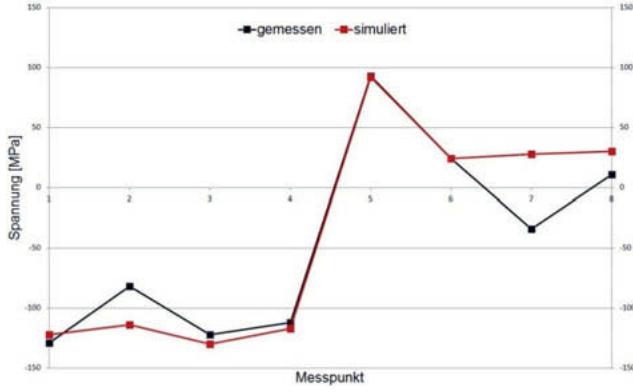


Bild 5: Vergleich der gemessenen Eigenspannungen mit den simulierten an allen Punkten

An einem Motordeckel aus Gusseisen für einen großen Generator wurden die simulierten und gemessenen Verformungen verglichen. Bild 6 zeigt die Abweichungen von der Sollgeometrie an 50 Messpunkten entlang des äußeren Flansches. Die simulierten Werte stimmen gut mit den gemessenen überein.

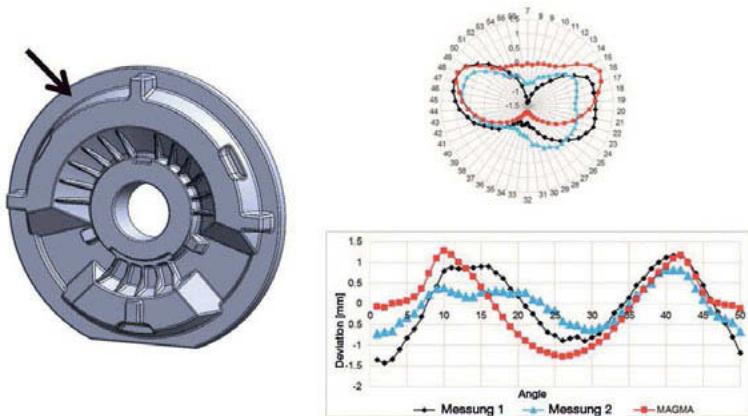


Bild 6: Vergleich von gemessenen und simulierten Verzügen

3. Optimierung eines Zylinderrahmens aus legiertem GJL-250

Der Zylinderrahmen ist das zentrale Strukturbau teil eines Zwei-Takt-Schiffsdieselmotors [3]. Eine 8-Zylinder Maschine besteht beispielsweise aus vier Blöcken mit einem Gewicht von jeweils 15 Tonnen. An einigen Bauteilen entstanden Risse im Betrieb (Bild 7). Der Eckbereich des Inspektionsfensters unterliegt dynamischen Belastungen. Ungünstige Fertigungsbedingungen (Sandeinschlüsse) und relativ hohe Eigenspannungen führten zum Ausfall des Bauteils. Neben einer verbesserten Gießtechnik, um die Gefahr von Sandeinschlüssen zu minimieren, sollte die Konstruktion geändert werden, um das Eigenspannungsniveau zu reduzieren und somit die Gefahr von Rissen allgemein zu senken. Bild 8 zeigt das Resultat der optimierten Geometrie. Die maximalen Hauptspannungen konnten um die Hälfte reduziert werden. Durch lokale Verstärkung einiger Gussteilpartien und Minimierung der Wanddicke an anderen Stellen konnte darüber hinaus eine Gewichtseinsparung von ca. 1.000 kg realisiert werden. Eine geometrische Optimierung mit dem Ziel der Eigenspannungsminimierung ist in der Realität kaum zu realisieren. Es müssten Musterabgüsse hergestellt und die Eigenspannungen aufwendig gemessen werden. Darüber hinaus ist der Vorteil der virtuellen Optimierung, dass über die im ganzen Bauteil vorhandenen Eigenspannungen hinaus auch Informationen über

die Entstehungsgeschichte verfügbar sind. Dies macht eine systematische Optimierung erst möglich. Wenn man die Ursache für ein Problem versteht, findet man auch schneller eine Lösung.

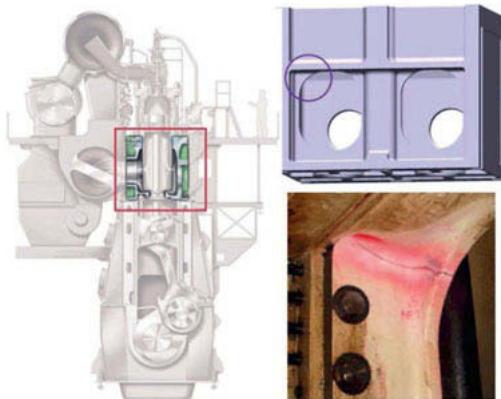


Bild 7: Risse in einem Zylinderrahmen aus legiertem GJL-250

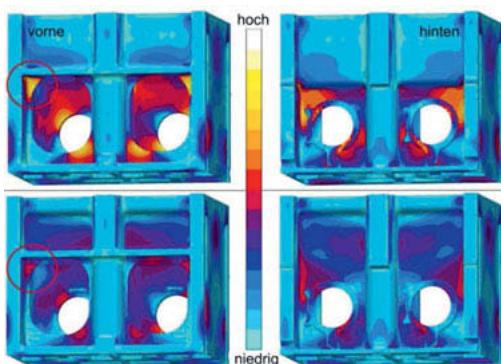


Bild 8: Maximale Hauptspannungen im Bereich des Inspektionsfensters vor (obere Bildhälfte) und nach der geometrischen Optimierung (untere Bildhälfte)

4. Optimierte Lebensdauervorhersage aufgrund lokaler Gefügekenngrößen

Neben den klassischen, statischen mechanischen Eigenschaften aus dem einachsigen Zugversuch (wie Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung) lassen sich mit der Gießprozess-Simulation auch lokale dynamische Materialeigenschaften vorhersagen. Dazu muss der Einfluss der lokalen Gefügebestandteile auf die dynamischen Eigenschaften untersucht werden. Für den Werkstoff GJV-450 wurden hierzu die Gefügemerkmale Nodularität und Perlitgehalt auf die Schwingfestigkeit bei Zug-Druck- und Biegewechselbelastung untersucht [4]. Bild 9 zeigt exemplarisch gemessene Wöhlerkurven für eine GJV-Legierung mit zwei unterschiedlichen Perlitgehalten (81 % und 88 %) [5].

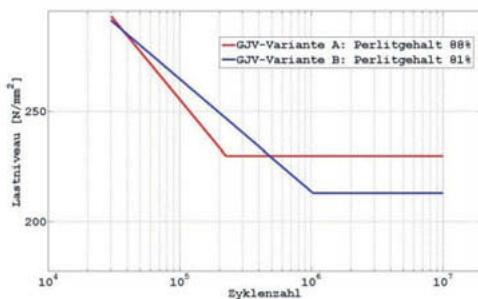


Bild 9: Wöhlerkurven für GJV-450 für unterschiedliche Perlitanteile

Mit diesen Informationen aus der Gießprozess-Simulation (Nodularität und Perlitgehalt) lässt sich die lokale Schwingfestigkeit eines Kurbelgehäuses aus GJV-450 berechnen (Bild 10).

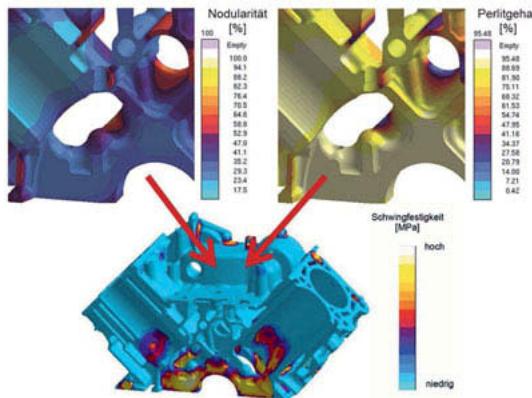


Bild 10: Berechnung lokaler Schwingfestigkeiten für ein Kurbelgehäuse aus GJV-450

Die lokalen Schwingfestigkeiten können dann als Eingangsgröße für die Lebensdauerberechnung genutzt werden. Bild 11 zeigt den Vergleich der berechneten Betriebsfestigkeit im höchstbeanspruchten Bereich des Kurbelgehäuses mit globaler, werkstoffgegebener Wöhlerlinie (linker Seite) und mit Berücksichtigung auf lokalen Gefügen basierender Wöhlerlinien (rechts). Die Bruchlastspielzahl verdoppelt sich bei Berücksichtigung der lokalen Schwingfestigkeiten. Dies erklärt auch, warum in diesem Bereich trotz niedriger rechnerischer Sicherheitsbeiwerte auf dem Prüfstand keine Risse auftraten.

5. Einstellung des Fertigungsfensters für robuste Prozesse

Das Interesse der Gießereien ist es, Gussteile, die die Qualitätsanforderungen ihrer Kunden erfüllen, möglichst ressourcenschonend und kostengünstig herzustellen. Der werkstoff- und verfahrensspezifischen Auslegung einer geeigneten Anschnitt- und Speisertechnik kommt dabei eine entscheidende Rolle zu. Die Gießprozess-Simulation gestattet es, im Vorfeld der Produktion Aussagen über die zu erwartende Qualität der Gussteile zu machen. Darüber hinaus unterstützt sie den Anwender bei der Auslegung einer zielgerichteten Gießtechnik und liefert wertvolle Informationen hinsichtlich der Prozessstabilität.

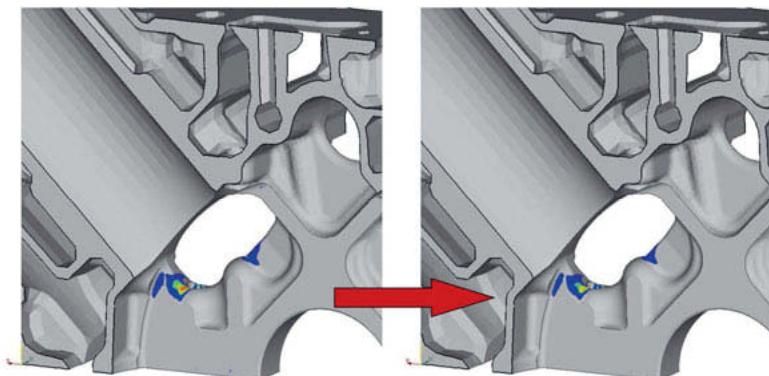


Bild 11: Berechnete Betriebsfestigkeit im höchstbeanspruchten Bereich mit (rechts) und ohne Berücksichtigung der lokalen Schwingfestigkeiten (links)

Ziel ist, ein möglichst großes Prozessfenster zu realisieren, d. h. eine Gießtechnik, die Prozessschwankungen kompensiert oder im Idealfall sogar unempfindlich ist.

Bei der Fertigung eines Abgasrohres aus GJL-250 für einen Schiffsmotor gab es bereits während der Entwicklung Bedenken hinsichtlich kritischer Lufteinchlüsse [6]. Um mögliche Fehler

vor Produktionsbeginn zu vermeiden, sollte die Gießtechnik virtuell optimiert werden. Bild 12 zeigt den ersten Entwurf eines Anschnittsystems mit den resultierenden Lufteinschlüssen im oberen Bereich des Rohres. Das Konzept war, das innere Rohr mit dem äußeren Gehäuse über Stege zu verbinden, um die Luft im Formhohlraum und mögliche Kerngase abzuführen zu können.



Bild 12: Lufteinschlüsse in einem Abgasrohr aus GJL-250

Nach Rücksprache mit dem Kunden, ob diese Modifikation die Funktionalität des Bauteils beeinträchtigen würde, wurde ein Konzept für die Entlüftung erarbeitet. Ziel war es, eine ausreichende Luftabfuhr zu gewährleisten. Variablen waren die Anzahl, der Ort und der Querschnitt der Stege. Die möglichen Varianten wurden über einen virtuellen Versuchsplan simuliert. Bild 13 zeigt die Variationsmöglichkeiten dieses virtuellen Versuchs.

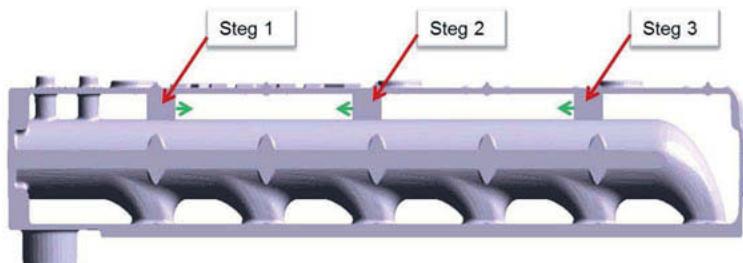


Bild 13: Mögliche Positionen und Querschnitte des virtuellen Versuchs zur Entlüftung

Mit aussagekräftigen Diagrammen kann der Einfluss einzelner Fertigungsparameter (z. B. Anzahl der Stege) auf Qualitätskriterien, z. B. Lufteinschlüsse oder Luftdruck in der Kavität, untersucht werden (Bild 14). Jeder Punkt im Diagramm repräsentiert das Ergebnis eines virtuellen Versuchs. Die Varianten mit zwei bzw. drei Stegen zeigen die besten Ergebnisse, wobei die Version mit drei Stegen den besten Kompromiss aus Lufteinschluss und Luftdruck darstellt. Im Vergleich zum ersten Entwurf konnte die Menge an eingeschlossener Luft durch die optimierte Gießtechnik halbiert werden (Bild 15). Mit dieser Lösung lief die Fertigung des Bauteils technisch und wirtschaftlich erfolgreich.

6. Schwankungen im Fertigungsprozess

Um eine sichere Fertigung qualitätsgerechter Gussteile zu gewährleisten, ist die Einstellung robuster Prozesse vor SOP notwendig. Die Fertigungsparameter müssen so gewählt werden, dass Schwankungen, die entweder schlecht kontrollierbar oder nicht beeinflussbar sind, nicht zu Qualitätsverlusten führen. Häufig ist der Einfluss einer einzelnen Prozessgrösse auf die Qualität, zumindest quantitativ, nicht bekannt. Darüber hinaus können sich Effekte verschiedener Prozessparameter aufheben oder gegenseitig verstärken. Dieses Zusammenspiel der verschiedenen Einflussgrößen lässt sich mit der virtuellen Versuchsplanung, bei der jede Simulation ein einzelnes Experiment ist, systematisch untersuchen.

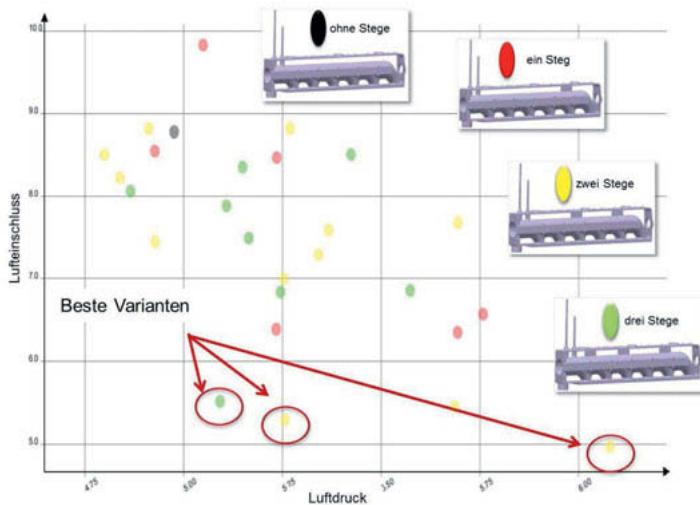


Bild 14: Ergebnisse der virtuellen Versuche

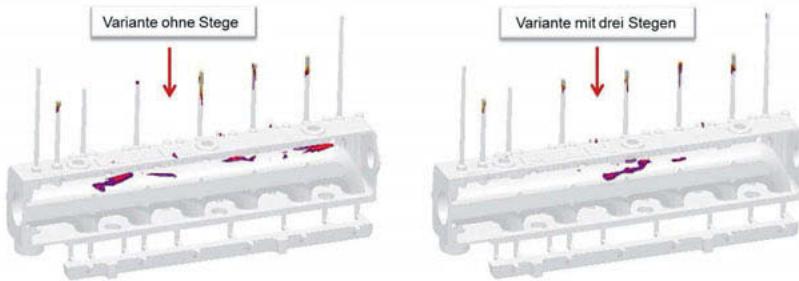


Bild 15: Vergleich des ersten Entwurfs (links) mit der optimierten Variante (rechts)

So können schon im Vorfeld der Produktion Aussagen über geeignete Fertigungsfenster bzw. die Prozessstabilität gemacht werden. Bei einem LKW-Motorblock aus legiertem GJL-250 wurden die chemische Zusammensetzung, die Gießtemperatur sowie die Impfwirksamkeit als wesentliche Prozessparameter identifiziert. In einem virtuellen Versuchsfeld wurden deren Einfluss auf mögliche Porositäten, Härte und Zugfestigkeit untersucht, wobei jeweils die minimal und maximal auftretenden Werte in der Produktion als Randbedingung angenommen wurden. Bild 16 zeigt die einzelnen Parameter und die jeweilige Schwankungsbreite.

Design Variables

Design Variable	Lower Limit (%)	Upper Limit (%)	Step (%)
<input checked="" type="checkbox"/> Kohlenstoffgehalt	3.2	3.4	0.2
<input checked="" type="checkbox"/> Kupfergehalt	0.5	0.7	0.2
<input checked="" type="checkbox"/> Siliziumgehalt	1.7	1.9	0.2
Design Variable	Lower Limit (%)	Upper Limit (%)	Step (%)
<input checked="" type="checkbox"/> Impfwirksamkeit	10.0	150.0	140.0
Design Variable	Lower Limit (°C)	Upper Limit (°C)	Step (°C)
<input checked="" type="checkbox"/> Gießtemperatur	1390.0	1430.0	40.0

Bild 16: Einige Fertigungsparameter und deren mögliche Variation

Kombiniert man die Extreme aller Parameter ergeben sich insgesamt 32 mögliche Varianten. Zusätzlich wurden Ziele für unterschiedliche Qualitätskriterien definiert. Als Ziel können Minima, Maxima oder definierte Bereiche für jeden berechneten Wert festgelegt werden: z.B. geringe Porosität, hohe Zugfestigkeit oder eine vorgegebene definierte Härte. Anhand dieser Ziele können die unterschiedlichen Varianten nach der Simulation ausgewertet werden. Sollte die Anzahl der Simulationen in einem virtuellen Versuchsfeld einen sinnvollen Wert überschreiten, was lange Rechenzeiten zur Folge hätte, so kann mit Hilfe einer autonomen Optimierung aus einer zumindest theoretisch unbegrenzten Anzahl von Varianten mit angemessenem Aufwand der beste Kompromiss aus den gegebenen Parametern berechnet werden. In diesem Fall dienen die Zielfunktionen (z. B. geringe Porosität, hohe Zugfestigkeit etc.) dem Programm als Bewertungsgrundlage für die einzelnen Varianten und ob eine bestimmte Variante weiter verfolgt (optimiert) oder verworfen wird.

Bild 17 zeigt die Rangfolge der berechneten Varianten in Bezug auf die festgelegten Ziele. Im linken Teilbild sind alle Qualitätskriterien gleich gewichtet. Wird ein bestimmtes Ziel wie z. B. die Härte priorisiert, kann man die virtuellen Experimente ohne Neuberechnung neu bewerten (Bild 17 rechts). Bild 18 zeigt in einer Parallelkoordinatendarstellung die Summe aller virtuellen Versuche und deren Ergebnisse. Jede Linie kennzeichnet die Variablen und Zielgrößen für einen Versuch. Um die Lösungen (virtuellen Versuche) herauszufiltern, die z. B. eine geringe Porosität zeigen, kann man den oberen Schieber der Porositätsskala nach unten bewegen (auf niedrige Porositätsniveaus) und erhält so alle Prozessparameter, die zu

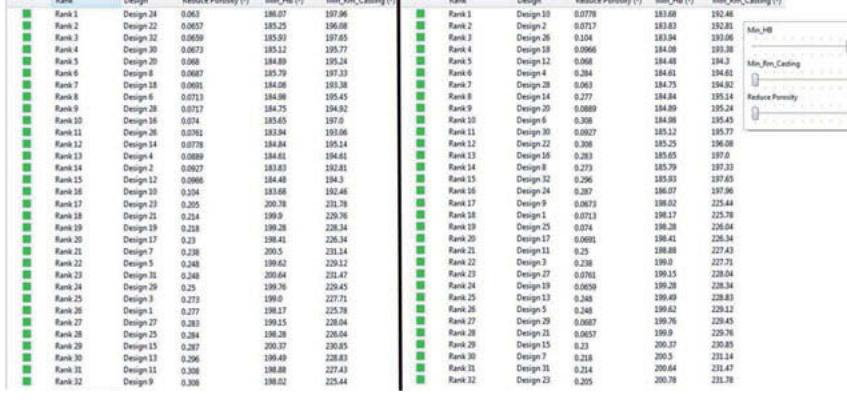


Bild 17: Reihenfolge der besten Varianten aus dem virtuellen Versuchsplänen
(links Gleichgewichtung der Ziele, rechts Gewichtung geringste Härte)

geringen Porositäten führen bzw. diejenigen Bereiche, die man meiden sollte, wenn man ein niedriges Porositätsniveau anstrebt. Bild 19 zeigt, dass in diesem Fall ein innerhalb der Toleranz liegender hoher C- sowie Si-Gehalt angestrebt werden sollte. Die Gießtemperatur sollte an der unteren Grenze liegen und eine gute Impfung sollte gewährleistet sein. Bild 20 zeigt den Vergleich der Porositäten in einem Teilbereich des LKW-Motorblocks, links die Variante entsprechend der minimalen Porosität aus Bild 19 und rechts eine Variante mit maximaler Zugfestigkeit aber größerer Porosität. Durch die interaktive Eingrenzung mehrerer Prozessvariablen auf das gewünschte Fertigungsfenster erhält man sofort das Ergebnis, das diesem virtuellen Versuch entspricht. Auf diese Weise ist ein Vergleich auch vieler unterschiedlicher Varianten sehr leicht möglich.

Die Auswertung der virtuellen Versuche durch Haupteffekt- oder Korrelationsdiagramme zeigt auch auf, wie verschiedene Prozessparameter ein bestimmtes Ergebnis beeinflussen. Bild 21 zeigt, dass z. B. der Cu-Gehalt auf die Porosität keinen Einfluss hat, wohingegen der C-Gehalt und das Impfen einen großen Einfluss ausüben.

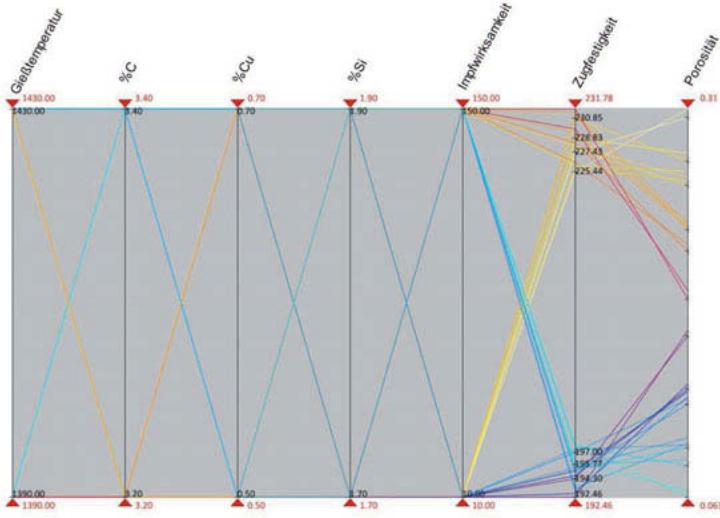


Bild 18: Zusammenfassung aller virtuellen Versuche mit Prozessvariablen und Qualitätskriterien in einem Parallelkoordinatendiagramm

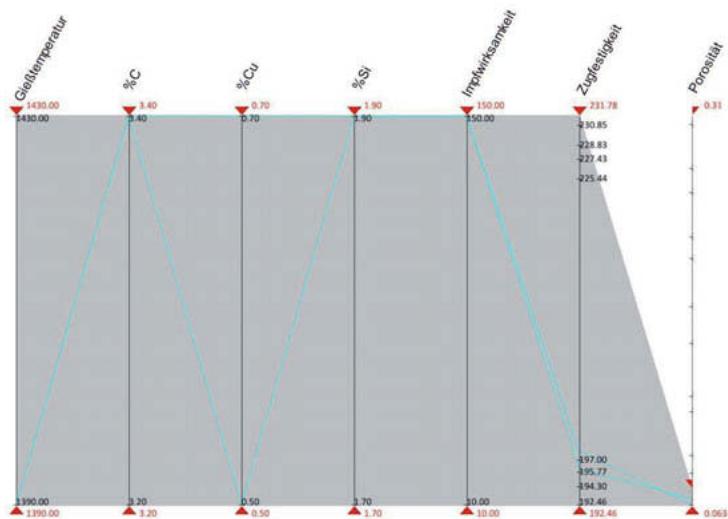


Bild 19: Auswahl aller virtuellen Versuche mit einer geringen Porosität

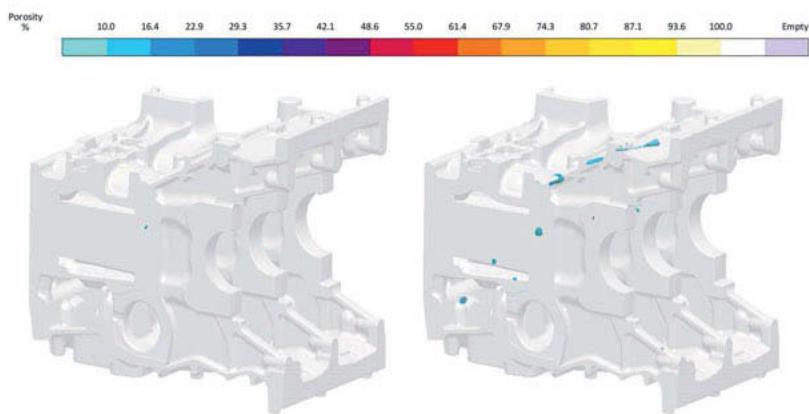


Bild 20: Varianten aus dem virtuellen Versuchsplan mit minimaler und maximaler Porosität

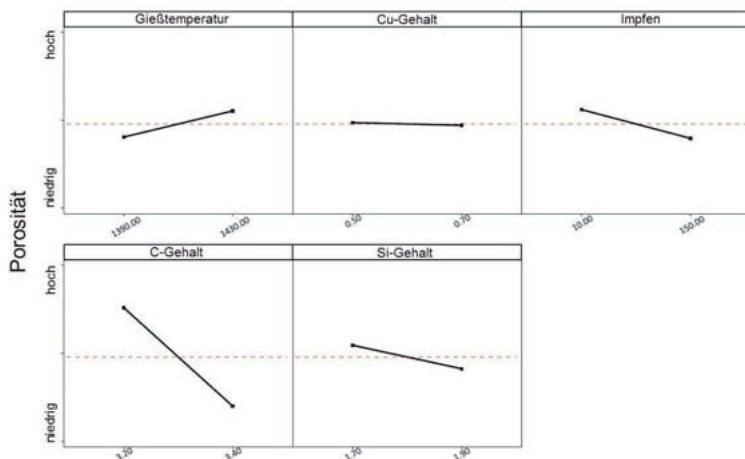


Bild 21: Haupteffektdiagramme mit Sensibilität der Prozessparameter auf Qualitätsmerkmale

7. Zusammenfassung

Die Gießprozess-Simulation erlaubt im Vorfeld der Produktion Aussagen über lokale Gefüge, Materialeigenschaften und Eigenspannungen, die es dem Konstrukteur erlauben, zu einem sehr frühen Zeitpunkt das Design des Bauteils entsprechend anzupassen bzw. zu optimieren. Dieses „Frontloading“ ermöglicht das Ausschöpfen des Werkstoffpotentials und unterstützt gezielt den Leichtbau. In Verbindung mit der systematischen Nutzung der virtuellen Versuchsplanung und autonomen Optimierung können so bereits im Entwicklungsprozess optimierte Leichtbaukonstruktionen und robuste Fertigungsprozesse realisiert werden.

Bild 2 und 20: Mit freundlicher Genehmigung: Daimler AG, Werk Mannheim

Bild 3-5, 7 & 8: Mit freundlicher Genehmigung: MAN Diesel & Turbo

Bild 12-15: Mit freundlicher Genehmigung: Giesserei Heunisch GmbH

Literatur

- [1] Sturm J.C.; Busch, G.: Cast Iron - a predictable material, World Foundry Congress 2010, Hangzhou, China
- [2] Egner-Walter, A.: Berechnung der Entstehung von Spannungen beim Gießen, Hoppenstedt, Gussprodukte '99, 1999
- [3] Rasmussen, N.W.: The use of MAGMASOFT for Production Support at MAN Diesel & Turbo, MAGMA Gusseisen-Seminar, Sinsheim, 2014
- [4] Thomser, C.; Bodenburg, M.; Sturm, J.C.: Optimierte Lebensdauervorhersage von Gusseisen aufgrund lokaler Gefügekenngrößen, Giesserei 101, 11/2014, S. 26-35
- [5] Egner-Walter, A.; Zenker, N.; Fritsche, E.: Vorhersage von Gefüge und lokalen Eigenschaften für Kurbelgehäuse aus GJV, VDI-Fachtagung, 8./9. Februar 2011, Magdeburg
- [6] Optimierung der Gießtechnik, MAGMATIMES, Jahrgang 22, Nr. 1, 2016
- [7] Sturm, J.C.: Prozesssimulation des Werkstoffes Gusseisen mit Vermiculargraphit, Deutscher Gießereitag Berlin, 2002
- [8] Bodenburg, M.; Busch, G.: Gießprozess-Simulation als Baustein innovativen Qualitätsmanagements in Eisengießereien, Casttec 2014, Bielefeld
- [9] Thomser, C.; Langenberg, P.; Kucharczyk, P., Sturm, J.C.: Gießprozess-Simulation und bruchmechanischer Nachweis – aktueller Stand und Ausblick, Giesserei-Special 02/2017, S. 44-53
- [10] Thomser, C.; Zimmermann, J.; Thorborg, J.: Stresses in sand casting – analysis and optimized solutions for improved casting designs and product quality, Gießerei-Special 11/2018

Fatigue estimation on cast-iron crankshafts considering residual stress from heat treatment

Local influence of residual stresses from heat treatment and hardening on fatigue events – simulation and testing

Dipl.-Ing.(univ.) **Tobias Winter**,

Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG, Ruhstorf a. d. Rott;

Dr.-Ing. **Corinna Thomser**,

MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Abstract

Auch im Industriemotorensegment wird zunehmend auf Downsizing gesetzt. Gleichzeitig ist es erforderlich, die Herstellungskosten zu senken, um in einem zunehmend preisgetriebenen Markt bestehen zu können. In diesem Umfeld bietet der Einsatz von Gusswerkstoffen Potenzial, sei es hinsichtlich der Freiheiten bei der Formgebung oder durch Senkung der Herstellungskosten bei der Substitution von Schmiedeteilen durch entsprechend ertüchtigte Gussbauteile. Insbesondere die Verwendung von Gusswerkstoffen im Kurbeltrieb bietet einerseits großes Potenzial zur Kostensenkung. Der kalkulierte Preisvorteil für unser Bauteil gegenüber 38MnVS5 liegt bei über 30%, gegenüber 42CrMo4 nochmals deutlich höher.

Andererseits gilt es, strukturmechanische und tribologische Herausforderungen zu meistern. Die Firma Hatz setzt dabei auf einen kombinierten Ansatz aus Simulation, Komponententests und Motorenversuch.

1. Motivation

Grundsätzlich ist seit Jahrzehnten der Schmiedewerkstoff 42CrMo4 als Material für die Herstellung von Kurbelwellen bei der Firma Hatz etabliert. Dementsprechend groß ist die Erfahrung was die Wärmebehandlung, das Verzugsverhalten, Dauerfestigkeit und die tribologischen Besonderheiten beim Einsatz dieses Werkstoffs betrifft. Bei unserem neuesten Produkt, der wassergekühlten H-Baureihe mit Drei- und Vierzylindermodellen, sollte zum ersten Mal eine Kurbelwelle aus GJS-700 zum Einsatz kommen. Bei der Auslegung des Triebwerks wurde diesem Umstand bereits in der Konzeptphase Rechnung getragen. Dies bedeutet zum

einen gegenüber der Schmiedewelle einen leicht erhöhten Platzbedarf (z.B. für die Ausgleichsgewichte aufgrund der geringeren Dichte gegenüber Stahl), zum anderen muss die Gestaltfestigkeit der Welle an die gegenüber 42CrMo4 deutlich niedrigere Festigkeit (ca. 40% niedrigere Biegegewebehelfestigkeit, zusätzlich stark kerbempfindlicher Werkstoff) angepasst werden. Dementsprechend sind das Kurbelgehäuse, die Lagerbügel etc. an die Gegebenheiten anzupassen. Die niedrigere Steifigkeit aufgrund des Unterschiedes im E-Modul wird dabei durch die aufgrund der niedrigeren Festigkeit notwendige höhere Gestaltfestigkeit überkompensiert.



Bild 1: 4H50 TIC Fan – to – Flywheel

2. Vorgehensweise bei der Auslegung des Kurbeltriebs

Unser klassischer Workflow zur rechnerischen Bewertung eines Kurbelwellenentwurfs ist in Bild 2 dargestellt.

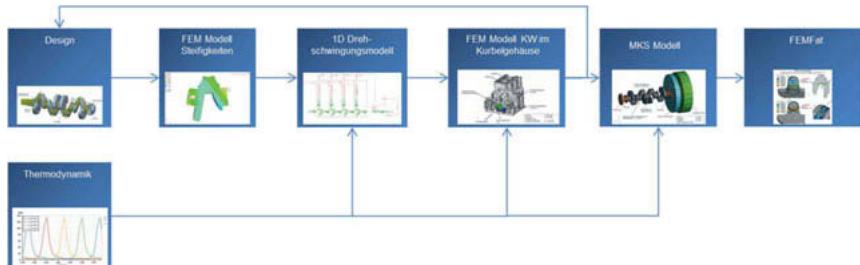


Bild 2: Workflow rechnerische Bewertung Kurbelwelle

Die Zylinderdruckverläufe werden aus der thermodynamischen Vorauslegung übernommen. Zunächst wird ein FE-Modell zur Bild der Steifigkeiten des Kurbeltriebs erstellt. Es wird unter anderem die Torsionssteifigkeit ermittelt sowie die Biegeeigenfrequenz der letzten Kröpfung mit Schwungrad und diversen lt. Lastenheft freigegebenen Anbauten (z.B. Nulllagergenerator, siehe Bild 3) berechnet.

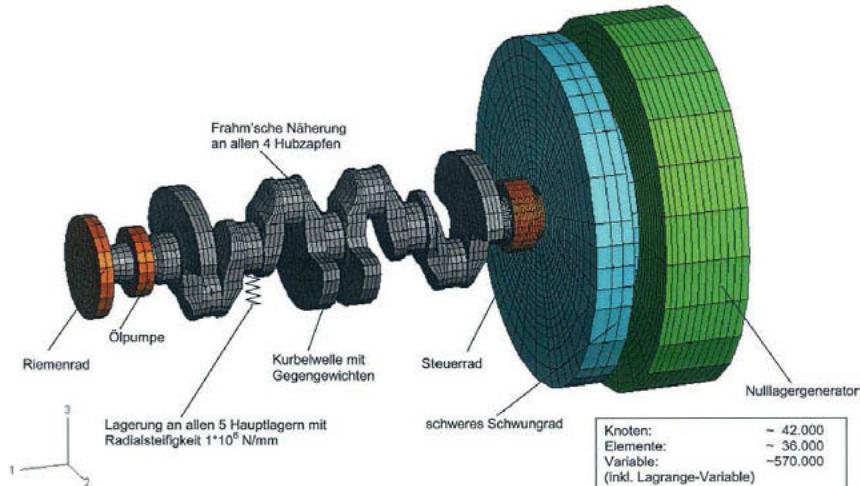


Bild 3: Steifigkeitsmodell des Kurbeltriebs mit Schwungrad und Null-Lager-Generator

Die Torsionssteifigkeiten werden in ein 1D Drehschwingungsmodell übernommen und die dynamisch auftretenden Zusatzlasten ermittelt. Mit diesen Werten wird eine Berechnung der Kurbelwelle im strukturmechanischen Motorumfeld (Kurbelgehäuse, Lagerbügel etc.) durchgeführt. Je nach Ergebnis fließen notwendige Änderungen in das Design ein. Die dynamischen Belastungen im Motorbetrieb – insbesondere mit schwungradseitigen Anbauten – werden in einem MKS Modell ermittelt und für die rechnerische Dauerfestigkeitsbewertung der Kurbelwelle herangezogen, vgl. Bild 4.

Im Falle der Gusskurbelwelle des H50 zeigen die im Rahmen der Konzeptphase durchgeführten Voruntersuchungen, dass eine Wärmebehandlung im Bereich der Radien – sowohl im Hub – als auch im Grundzapfen – unabdingbar sein wird. Besonders nachdem im Hinblick auf eine Minimierung der Reibleistung die Zapfendurchmesser möglichst klein gewählt werden. So wird z.B. aus Festigkeitsgründen auf eine Erleichterungsbohrung im Hubzapfen vollständig verzichtet. Bild 4: Spannungen in der Kurbelwelle unter Gasdruck und max. dynamischem Torsionsmoment

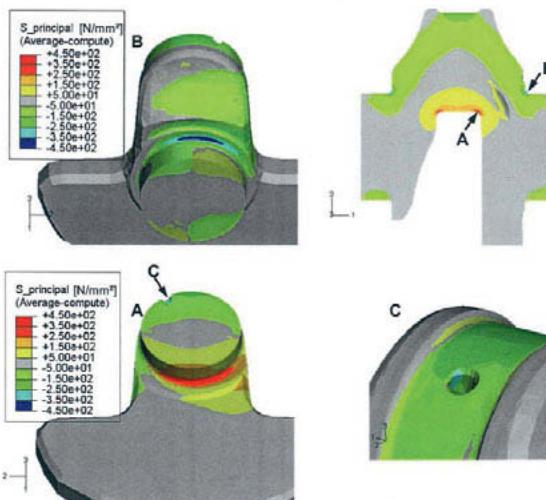


Bild 4: Spannungen in der Kurbelwelle unter Gasdruck und max. dynamischem Torsionsmoment

Eine weitere Besonderheit des H50 Motorkonzepts ist die geschlossene Dichtkontur der Ölwanne, vgl. Bild 5. Sie wirkt zusätzlich limitierend bei den geometrischen Abmessungen der Kurbelwelle (besonders beim Flansch für die Schwungradverschraubung) und erfordert eine dreidimensionale Einlegekurve. Der Absicherung des Kurbelwellenkonzepts kommt insbesondere deswegen größte Bedeutung zu, weil eine Veränderung der Geometrie (Hubzapfen und Grundzapfendurchmesser) aufgrund der gesetzten Randbedingungen nur in extrem engen Grenzen möglich ist.

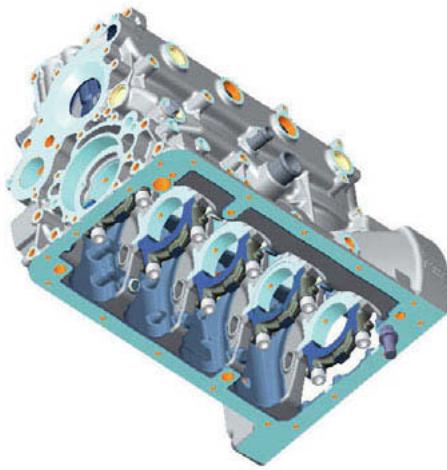


Bild 5: Blick von unten auf das Kurbelgehäuse des 4H50 und die geschlossene Dichtkontur der Ölwanne.

Nachdem das Kurbelwellenkonzept rechnerisch abgesichert ist, werden Prototypenteile beschafft und im Rahmen einer Komponentenprüfung einer Dauerfestigkeitsuntersuchung unterzogen.

3. Komponententest

Zusätzlich zur rechnerischen Absicherung führen wir bereits in der Konzeptphase, idealerweise vor dem ersten Prüfstandsbetrieb im Motor – Komponentenversuche durch. Für den Komponententest von Kurbelwellen steht bei Hatz ein Biege- und Torsionsresonanzprüfstand der Firma Prisma Engineering zur Verfügung, vgl. Bild 6.



Bild 6: Biege – und Torsionsresonanzprüfstand bei Hatz Aufbau für Biegeprüfung



Bild 7: Mit DMS applizierter Wellenabschnitt zur Biegeresonanzprüfung

Die Prüflinge werden entsprechend bearbeitet, mit DMS appliziert und kalibriert, vgl. Bild 7. Dann werden sie in einem Laststeigerungsverfahren einer zerstörenden Prüfung unterzogen. Die Prüfung beginnt bei ca. 80% der ertragbaren Belastung (wird rechnerisch ermittelt), die Grenzlastspielzahl für Durchläufer bzw. für das Erreichen der nächsten Stufe liegt bei 2,0 Millionen Lastwechseln. Durch die mechanisch anspruchsvolle Prüfstandskonzeption liegt die Prüffrequenz je nach Welle bei mindestens 85Hz, im Maximum werden Prüffrequenzen von 95 Hz erreicht. Die 2,0 Millionen Lastwechsel pro Stufe bedürfen also einer Prüfdauer von ca. 6 Stunden. Der Prüfstand ist mit einer sensibel ansprechenden Anrisserkennung ausgestattet, was einen automatisierten Betrieb ermöglicht. Innerhalb eines (Arbeits)tages kann so mindestens eine, teilweise zwei Wellen geprüft werden.

Bei dieser Prüfung werden vor allem Prozessparameter wie Härtefaktor etc. in statistisch relevanter Größenordnung ermittelt und fließen anschließend in die finale Dauerfestigkeitsbewertung ein.

4. Ergebnisse der Komponentenprüfung

Ohne rechnerische Berücksichtigung (und Durchführung) einer Wärmebehandlung liegt die kritische Stelle erwartungsgemäß im Bereich des Hubzapfenradius. Die Prüfungsergebnisse stehen in guter Korrelation mit den vorausberechneten ertragbaren Werten für Biegung und Torsion. Mit gehärteten Radien zeigt die Komponentenprüfung ein anderes Schadensbild.

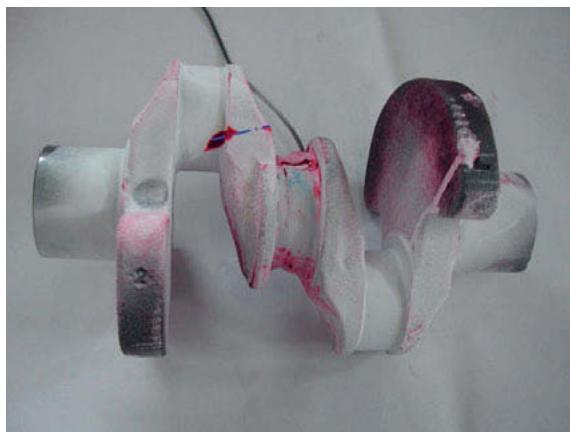


Bild 8: Prüfling nach Testende mit Anrisssmarkierung

Obwohl die Spannungsverteilung einen Anriß im Bereich des Hubzapfenradius erwarten ließe – vgl. Bild 9 – fallen alle Prüflinge im Bereich der Kurbelwange aus.

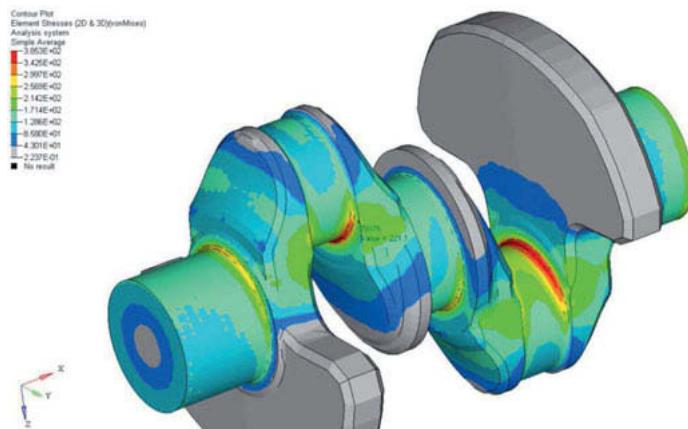


Bild 9: Vergleichsspannung GEH für Torsionsprüfung.

Diese Beobachtung lässt sich folgendermaßen erklären: Bei der Torsionsprüfung treten im Bereich der Wange Spannungsamplituden auf, die in etwa der Dauerfestigkeit des ungehärteten Werkstoffs entsprechen.



Bild 10: Vergrößerung Hubzapfen und Kurbelwange mit deutlich erkennbarem Einflussbereich der Wärmebehandlung

Die höhere Belastung in den Radien steht einer gesteigerten Festigkeit durch die Wärmebehandlung gegenüber, sodass der Punkt mit der höchsten Schädigung nicht im Radius liegt, sondern am Übergangsbereich zur Kurbelwange. In Bild 10 ist dieser Bereich am realen Bauteil vergrößert dargestellt. Man erkennt farblich deutlich die Wärmeeinflusszonen der Radienhärtung. Diese Beobachtung lässt sich gut mit der lokalen Verteilung der Dauerfestigkeit in dem wärmebehandelten Bauteil in Einklang bringen. Wird diese in der rechnerischen Dauerfestigkeitsbewertung berücksichtigt, ergibt sich auch hier wieder ein stimmiges Bild. Die Höhe des Härtefaktors (Steigerung der Dauerfestigkeit im Radiusbereich durch Härtung) wird aus den Versuchen rückgerechnet und das Modell entsprechend angepasst. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt eine Freigabe des Konzepts für die A-Musterphase und den Motorenversuch.

5. Dauerlaufergebnisse im Motorenversuch

Nachdem die Konzeptfreigabe für das Bauteil erfolgt ist, werden mehrere Prototypen im befeuerten Betrieb am Prüfstand erprobt. Trotz unkritischer Beurteilung in der Berechnung traten bei zwei der Dauerlaufmotoren nach jeweils ca. 1000h m Betrieb Kurbelwellenbrüche auf.



Bild 11: Gebrochene Vierzylinderwelle nach ca. 1000h Dauerlauf im Motor

Beide Wellen wurden einer detaillierten Untersuchung zugeführt. Unter anderem wurden REM Aufnahmen der Bruchstelle angefertigt, um den Rissausgangspunkt zu detektieren. In beiden Fällen findet sich der Anrißpunkt im Bereich der Schwungradverschraubung, genauer im Gewindeggrund.

Aufgrund des kleinen Reibdurchmessers und der schwierigen Verschraubungssituation (vgl. Bild 12) wurde der Schraubverband in der Konzeptphase eingehenden Betrachtungen unterzogen. Das Hauptaugenmerk lag dabei allerdings auf der Drehmomentübertragungsfähigkeit.

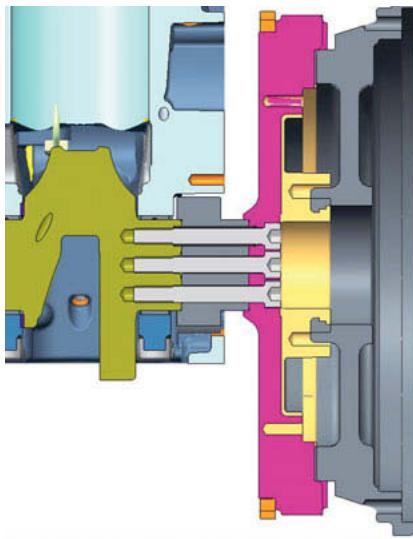


Bild 12: Verschraubungssituation Schwungrad, Kurbelwelle, Steuerzahnrad

Nach Auftreten der Schäden wird ein detailliertes FE-Modell der letzten Kröpfung mit kompletter Modellierung der Schraubenverbindung erstellt. Zwar zeigt die Berechnung im Bereich der hinteren Gewindegänge (Bruchausgangsbereich) unter maximaler Torsionsbelastung leichte Spannungsüberhöhungen. Diese liefern jedoch keine hinreichende Erklärung für die beiden Kurbelwellenbrüche.

6. Berücksichtigung der Eigenspannung aus Härtung des Lagersitzes

Wie in Bild 12 zu erkennen ist, liegt die Schwungradverschraubung vollständig innerhalb der Lagerfläche des schwungradseitigen Hauptlagers. Der Lagersitz wird wie üblich aus Verschleißschutzgründen gehärtet.

Im Rahmen der Prozessführung beim Härteten wird darauf geachtet, keine Gefügeveränderung im Bereich des Gewindes erzeugen. Allerdings ist aufgrund der Platzverhältnisse nicht auszuschließen, dass sich Eigenspannungszustände (insbesondere Zugeigenspannungen) aus der Wärmebehandlung bis ins Gewinde erstrecken.

Aus diesem Grund soll eine detaillierte rechnerische Analyse des Härtevorgangs und der sich darauf ergebenden Spannungszustände im Wellenende durchgeführt werden.

Während alle anderen Berechnungen überwiegend bei Hatz hausintern durchgeführt werden, greifen wir bei der Beurteilung und Berechnung der Eigenspannung aus Härtung auf die Expertise der Firma Magma GmbH zurück.

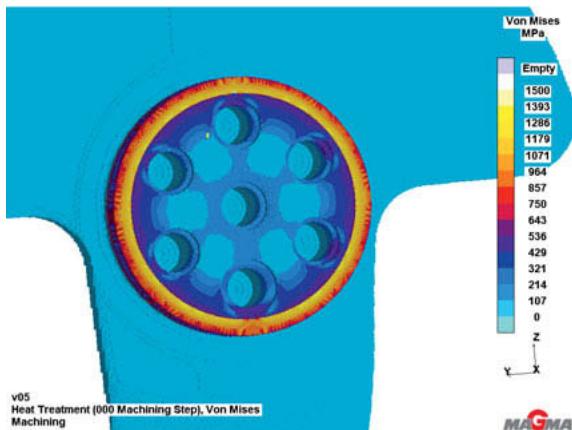


Bild 13: Vergleichsspannung GEH nach Härtung der Lagerfläche und Fertigbearbeitung der Kurbelwelle

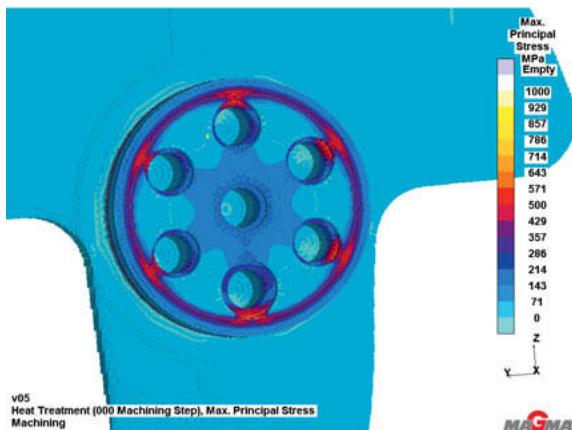


Bild 14: Erste Hauptspannung nach Härtung der Lagerfläche und Fertigbearbeitung der Kurbelwelle

Unterstützende Eingangsgröße für die Berechnung sind die Prozessparameter der Härteanlage sowie zahlreiche Schlifffotos und Härteverlaufsmessungen, die im Rahmen der Untersuchungen angefertigt werden. Wie in Bild 14 zu erkennen ist, liegen in den äußeren Gewindegrenzen durchaus festigkeitsrelevante Zugeigenspannungen vor.

Werden diese berücksichtigt, zeigt die rechnerische Dauerfestigkeitsbewertung des Wellenendes ein deutlich anderes Bild. Der Sicherheitsfaktor im Anrißpunkt liegt bei $S=1,05$. In Verbindung mit der geringen Bruchdehnung und Kerbempfindlichkeit des Werkstoffes GJS-700 wird dies als deutlich zu gering eingestuft.

Als Abhilfemaßnahme wurden folgende Punkte identifiziert

- Verringerung der EHT und damit Reduzierung der Zugeigenspannungen im Gewindegrund
- Umstellung der Gewindeherstellung von Schneiden auf Formen (Einbringung von Druckeigenspannung, Reduzierung der Mikrokerbwirkung)
- Reibwerterhöhende Maßnahmen im Kontaktbereich, um den Schraubverband dynamisch ruhig zu stellen und die Spannungen im Gewinde aus Schraubenverschränkung zu reduzieren

Nach Umsetzung der Maßnahmen verliefen sowohl die entsprechend der Erfahrung modifizierten Komponentenprüfungen als auch der Motorenversuch komplikationslos.

Präzise Werkzeuge für exzellenten Guss

Konstante Kerne aus ökonomischen Werkzeugen

Daniel Smolny, Lahnwerk GmbH, Biedenkopf

Kurzfassung

Das Zusammenspiel von Materialien, Technologien und Kundenanforderungen prägt den modernen Werkzeugbau mehr denn je. Die vielfältigen Möglichkeiten müssen unter ökonomischer, praktischer und zielführender Betrachtung ein Ganzes ergeben.

Die Basis „erlaubt ist, was funktioniert“ gemischt mit Fakten und Zahlen aus Industrie 4.0 eröffnet ein großes Spielfeld, dass es zu besetzen gilt.

Wie dies durch einen modern aufgestellten Werkzeugbau umgesetzt werden kann, wird anhand von Beispielen und Analysen aufgezeigt.

Die Herausforderung, auf einer gemeinsamen Plattform Gießereitechnologie 4.0 zu gestalten und somit eine Basis für die Zukunft von leichterem, präziserem und somit ökonomischerem Guss zu legen, ist die Motivation, der wir folgen.