

# Gießtechnik im Motorenbau 2017

Potenziale für die nächste  
Generation von Fahrzeugantrieben



# VDI-Berichte 2304

## VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH



# Gießtechnik im Motorenbau 2017

Potenzziale für die nächste  
Generation von Fahrzeugantrieben

Magdeburg, 01. und 02. Februar 2017



# VDI-Berichte 2304

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

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

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

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

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

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092304-8

## Inhalt

	Seite	
Vorwort	1	
<b>Guss E-Motoren</b>		
<i>H. Rottengruber, S. Zeilinga, E. Todsen</i>	Konzepte für E-Antriebe und deren Relevanz für die Gießereitechnik	3
<i>T. Hametner, A. Harrison, T. Holzmüller, R. Kobler, D. Andessner</i>	Entwicklung und Prototyping eines Elektromotoren- gehäuses mit integriertem Kühlkonzept mittels Nieder- druckguss	15
<i>C. Heiselbetz, F. J. Feikus, L. Kniewallner, M. Rafetzeder, R. Fernandez, M. Speicher, D. Schnubel, G. Stalec</i>	Herausforderungen E-Drive Komponenten – Gießtechnische Lösungen	29
<b>Produktentwicklung Komponenten</b>		
<i>S. Dengler, H. Meishner</i>	The new Audi 2.5l TFSI five cylinder engine for the new Audi TT RS – A lightweight design high performance engine	41
<i>I. Papadimitriou, K. Track</i>	Leichtbau-Potenzial von Kurbelwellen durch den Einsatz hohl-gegossener Konstruktionen	69
<i>N. Wöckel, A. Kramer, T. Wunsch</i>	Das Kurbelgehäuse des neuen Porsche V8 Turbomotors	91
<i>R. Richter</i>	Eigenspannungsoptimierung von Zylinderköpfen mithilfe der Simulation	107

<i>G. Vogeletzang, J. Anhalt, H. Kämpfe</i>	Die Zylinderköpfe der neuen Porsche Boxermotoren-familie	123
<i>B. Jung, A. Weißbenner</i>	K1 Prototyping – Druckgussprototypen in 12 Wochen	151

## Werkstoffe und Gießverfahren

<i>L. Hartmann, T. Heller</i>	Doppelguss mit neuem Speisersystem und anorganischen Kernen	157
<i>W. Schöffmann, C. Knollmayr, B. Kaltenegger, M. Rafetzeder, B. Stauder</i>	Höchstleistungs-Otto-Zylinderkopfentwicklung in Aluminium – Zylinderkopf für höchste spezifische Leistung in Serienanwendungen	165
<i>D. Schnubel, M. Speicher, L. Kniewallner, F. J. Feikus</i>	Aluminium-Motorblöcke der neuesten Generation im CPS®-Verfahren	189
<i>T. Stürzel</i>	Entwicklung von Al-Legierungen durch Nutzung von JMatPro®	205

## Prozesskette – Entwicklung – Fertigung – Qualität

<i>M. Reichle</i>	Gussteileinstandsetzung mittels Laserschweißen – Wie Gießereien, Bearbeiter und OEMs ihre Effizienz, Rendite und Prozesssicherheit nachhaltig steigern können	211
<i>N. W. Rasmussen</i>	Qualitätsmanagement für eine globale Motorenfertigung	221
<i>N. Gramegna</i>	Foundry 4.0: Smart casting process control and real time quality prediction	227

## Vorwort

Die VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau“ ist im Laufe von 16 Jahren zum wichtigsten Forum für Gießer und Motorenbauer im deutschsprachigen Raum geworden. Am 1./2. Februar 2017 werden sich zum 9. Mal rund 400 Führungspersönlichkeiten und technische Experten in Magdeburg treffen, um auf hohem technischem Niveau zu diskutieren, sich über Innovationen und Trends im Markt auszutauschen und schließlich neue Ideen sowie wissenschaftliche Erkenntnisse zu erfahren. Den Rahmen bilden die Tagungsbeiträge aus Gießerei, Motorenentwicklung und von Hochschulen sowie die begleitende Fachausstellung der einschlägigen Unternehmen.

Das gemeinsame Thema der Gusskomponenten im Motorenbau bleibt spannend:

- Stellen die aktuellen Veränderungen durch E-Mobilität oder Downsizing die klassischen Motoren- und Komponentengießereien vor neue Herausforderungen im Hinblick auf Gusswerkstoffe, Form- und Kernherstellungsverfahren, Entwicklungspartnerschaften und Qualitätssicherungskonzepte?
- Welche Gussteileigenschaften fordern die Motorenentwickler, welche Eigenschaften können die Gießer durch innovative Werkstoffe, Verfahrensvarianten oder Wärmebehandlungsverfahren realisieren?
- Wie weit ist die gießtechnische Simulation, wie integriert mit FE- und Lebensdauerberechnungen, wie belastbar ist virtuelles Prototyping?
- Wie erscheinen die viel zitierten und diskutierten „Industrie 4.0“-Szenarien im Spannungsfeld zwischen Motorenentwicklung und Gussproduktion?
- Welche Innovationsbeiträge liefern Hochschulen und Universitäten, welche Neuerungen werden durch Preis-, Kosten- und Zeitdruck initiiert?

Diese und weitere Fragen stellen sich den technischen und wissenschaftlichen Experten und Führungskräften, die an der 9. VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau“ teilnehmen werden. Die Themenbereiche der Tagung werden diese Fragen bündeln, die einzelnen Tagungsbeiträge werden Antworten geben und Diskussionen anregen.

Sie dürfen ein gefülltes und qualifiziertes Programm, Raum für Gespräche im kleinen und großen Kreis und eine inspirierende Tagung erwarten!

Im Namen des Programmausschusses

**Dr.-Ing. Götz C. Hartmann**

MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen



# Konzepte für E-Antriebe und deren Relevanz für die Gießereitechnik

Prof. Dr.-Ing. **Hermann Rottengruber**,  
Dipl.-Ing. **Stephan Zeilinga**, Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Eike Todsen**,  
Fakultät für Maschinenbau, Institut für mobile Systeme,  
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

## Kurzfassung

Der Diesel-Abgasskandal der vergangenen Jahre in Kombination mit den weltweit strenger werdenden gesetzlichen Vorschriften zur Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Minimierung sorgen derzeit für Unsicherheit in der Automobilbranche.

Der Technologiewechsel weg vom Verbrennungsmotor hin zur elektrifizierten Antreiben wird von vielen Seiten derzeit massiv propagiert. Dieser Beitrag soll einen aktuellen Stand der kurz- und mittelfristig verfügbaren alternativen zum verbrennungsmotorischen PKW aufzeigen. Mit Hilfe einer grundlegenden Technologienanalyse wird auf die Möglichkeiten und geänderten Anforderungen an die Fahrzeug- und Gießereiindustrie eingegangen.

## Abstract

The recent diesel-gate exhaust gas-emissions scandal in combination with the increasingly stringent legal requirements for minimizing pollutant- and CO<sub>2</sub>-emissions are currently causing uncertainty in the automotive sector.

The technology change from the internal combustion engine (ICE) to the electrified drive is currently being massively propagated by many stakeholders. This paper is intended to give a current status of the short- and medium-term alternatives to the ICE driven car. A fundamental analysis of the technology is used to examine the possibilities and changed requirements for the future of vehicle- and foundry-industry.

## **Welche Antriebe werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten im PKW-Sektor bestimmend sein?**

Wohl keine andere Fragestellung zum Themenkomplex „Automobil“ ist in der öffentlichen Diskussion derart präsent. Ob nun auf schwindende Erdölreserven, den Kraftstoffpreis, die CO<sub>2</sub> Bilanz oder die Schadstoffemissionen fokussiert wird, überall wird schnell der Ruf nach der Ablösung konventioneller Otto- und Dieselmotoren als Antriebseinheit im Automobil laut. Dennoch halten sich Ottomotoren und im Besonderen in Europa Dieselmotoren standhaft als die beliebtesten Antriebsvarianten.

Der Grund hierfür ist sehr einfach zu benennen:

Mit herkömmlichen Kraftstoffen betriebene Verbrennungsmotoren haben in Relation zum Kundennutzen einen überragenden Kostenvorteil. Denn wie der Wortstamm „auto“ im Wort „Automobil“ schon aussagt, die Autonomie, also nichts anderes als die Reichweite, ist neben den Kosten der wichtigste Vorteil des verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs.

Dennoch mehren sich insbesondere in den letzten Jahren die Anzeichen, dass sich in vielen Märkten ein Paradigmenwandel abzeichnet. Getrieben durch die Ressourcen- und Klimadiskussion der letzten Jahre, kam seit Herbst 2015 eine emotional aufgeheizte Debatte, die Schadstoffdiskussion, hinzu. Bisher von den zuständigen Kommunen noch nicht umgesetzte Immissions-Regularien, hier speziell die Stickoxidbelastung, betreffend, scheinen nun zu einem echten Problem zu werden. Insbesondere für PKW und LKW mit Dieselmotoren drohen Fahrverbote in Ballungsräumen. Diese möglichen Mobilitätseinschränkungen in Innenstädten können dazu führen, dass dieselgetriebene Fahrzeuge stark an Attraktivität verlieren. In anderen Teilen der Welt wie USA, Indien und China drohen Fahrverbote oder Zulassungsbeschränkungen für Fahrzeuge mit jeglichen Verbrennungsmotoren bereits seit einigen Jahren.

[1]

Da die Flottenverbrauchsziele mit konventioneller Antriebstechnologie in vielen Fahrzeugmärkten, insbesondere für deutsche Fahrzeughersteller, nur mit einem signifikanten Anteil an Dieselfahrzeugen erreichbar sind, ergibt sich ein Problem. Um aktuelle und zukünftige Emissionsvorgaben und Verbrauchsziele zu erfüllen wird es mittelfristig besonders für den Dieselmotor enorm schwierig unterhalb der aktuell fallenden Kosten für vergleichbare elektrifizierte Antriebe zu bleiben. Sobald sich bei vergleichbarem Kundenutzen die Gestehungskosten für ein Elektrofahrzeug und ein verbrennungsmotorisch angetriebenes Fahrzeug gleichen, ist der sog. "Tipping Point" erreicht. Dann ist mit einer exponentiell stei-

genden Nachfrage an Elektrofahrzeugen zu rechnen. Das heißt, der derzeitig noch zaghafte Einstieg in die Elektromobilität wird sich in der kurz- und mittelfristigen Zukunft stark beschleunigen. [2] Hinzu kommt, dass einige Staaten und Volkswirtschaften, u. A. auch Deutschland, im Zuge des drohenden Klimawandels konkret über den Ausstieg aus fossilen Energieträgern nachdenken. Dazu gehört dann auch ein Verkaufsverbot von konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben. [3]

Die steigende Nachfrage an elektrifizierten Fahrzeugen, wird dabei Hybrid- und Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) umfassen. Der Umstieg zum reinen Elektrofahrzeug wird sich über Hybridantriebe vollziehen. Für eine Vielzahl von Anwendungen und Fahrzeugvarianten wird auch langfristig ein hybrider Antriebsstrang die optimale Lösung bleiben. Dennoch, es ist Zeit darüber nachzudenken, wie sich der Markt für Fahrzeugantriebskomponenten vor dem Hintergrund dieser Veränderungen umgestalten wird.

Die verschiedenen Antriebstopologien Mild Hybrid, Plug-In Hybrid, Vollhybrid oder der batterieelektrische Antrieb stellen teilweise komplett andere Anforderungen an die Antriebskomponenten.

Einen großen Anteil am zukünftigen Fahrzeugmarkt ab 2020 werden konventionell verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge mit einer unterstützenden E-Maschine, sog. Mild-Hybride haben. Mit deren 48 Volt-Bordnetz ist elektrisches Fahren nicht sinnvoll möglich, aber elektrische Unterstützung und der sog. Segelbetrieb ermöglichen große Verbrauchseinsparungen. Die Kosten für den elektrischen Antriebsstrang sind durch den Entfall eines Hochspannungssystems im Fahrzeug und einer limitierten Batteriekapazität sehr attraktiv. [1]

Voll-Hybride Fahrzeugantriebe die durch die Plug-In Funktionalität, mit Reichweiten bis zu 80 bzw. 100 km rein elektrisch betrieben werden können, stellen eine Brückentechnologie dar. Viele Gesetzgeber weltweit machen diese Technologie aufgrund günstiger Regeln zur Verbrauchs- und damit CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnung für die Fahrzeughersteller sehr attraktiv. Der Grund liegt darin, dass sich mit derartigen Fahrzeugen die Flottenziele für Verbrauch und Emissionen sehr einfach erreichen lassen.

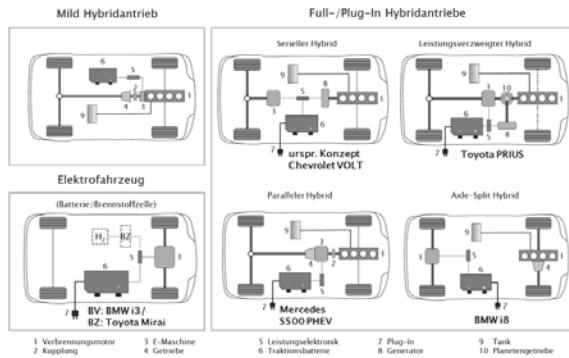


Bild 1: Übersicht der unterschiedlichen Hybridantrieb-Topologien [4]

Wie aus der Abbildung 2 zu entnehmen ist, haben Plug-In Hybrid-Elektrische Fahrzeugkonzepte (PHEV) in Bezug auf den Antriebsstrang und das elektrische System die höchste Systemkomplexität. Sie bieten aber durch die beide Antriebe ein höchst attraktives Nutzungskollektiv an. Gleichzeitig kommen vergleichsweise kleine und damit gegenüber rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) kostengünstigere Batterien zum Einsatz. Auch schwere und große leistungsstarke Fahrzeuge, die einen hohen Deckungsbeitrag für die Fahrzeughersteller liefern, lassen sich mit dieser Technologie sinnvoll darstellen.

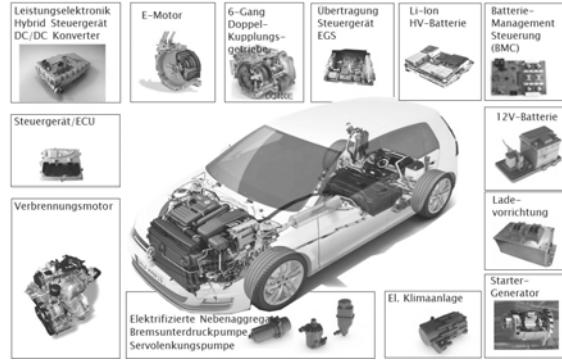


Bild 2: Komponenten eines PHEV-Antriebsstrangs im PKW

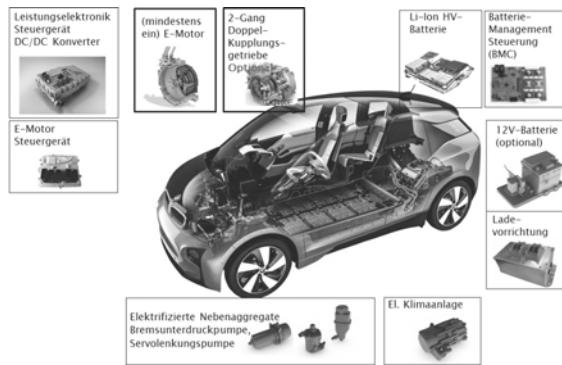


Bild 3: Komponenten eines BEV-Antriebsstrangs im PKW

Das BEV weist eine deutlich niedrigere Systemkomplexität (Abbildung 3) auf Fahrzeugebene auf. Dennoch erfüllen viele Einzelkomponenten, insbesondere die Energiespeicher, noch nicht die Kosten und Entwicklungsziele um mit konventionellen Antrieben, insbesondere der Kombination aus Ottomotor und Elektromaschine in einem hybriden Antriebsstrang, mithalten zu können. Einzig die lokale Emissionsfreiheit stellt einen signifikanten Vorteil dar.

Ebenso ergeben sich durch unterschiedlichste Antriebstopologien neue Freiheitsgrade im Fahrzeugbau. Durch die Möglichkeit einen Einzelradantrieb umzusetzen ergeben sich interessante Möglichkeiten die Fahrdynamik und die Raumgestaltung im batterieelektrischen Fahrzeug zu verbessern. (vgl. Abbildung 4)

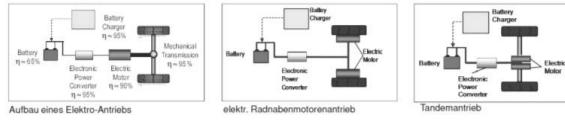


Bild 4: BEV-Antriebstopologien im PKW

Für elektrische Maschinen gibt es drei übliche Bauarten: Die permanent erregte Synchronmaschine (PSM), die Asynchronmaschine (ASM) und die fremd erregte Synchronmaschine (ESM). Die Hybridsynchronmaschine (HSM) ist eine Ableitung der PSM mit sog. vergraben Magneten, die den Vorteil höherer Wirkungsgrade in Kombination mit niedrigeren Kosten für magnetische Bauteile mit sich bringt. Alle Maschinentypen sind prinzipiell für den Ein-

satz in Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssträngen geeignet und haben eine ausreichende technologische Reife erreicht (vgl. Abbildung 5).

Aber auch in einem reinen Elektrofahrzeug bleiben gegossene Metallteile wichtige Schlüsselkomponenten. So weisen elektrische Maschinen mit dem Gehäuse und den Trägern für die Wicklungen mindestens zwei Großkomponenten auf, welche als Gussteile ausgeführte werden können. Zudem sind sowohl die E-Maschinen in der zentralen Antriebstopologie als auch noch mehr die sog. Radnabenmotoren auf optimierte Gusskomponenten angewiesen, wie z. B. der Abbildung 6 zu entnehmen ist. [5]

	ESM Elektrisch erregte Synchronmaschine	PMS Permanentenrechte Synchronmaschine	HMS Hybrid- Synchronmaschine	ASM Asynchronmaschine
<b>Kennwerte</b>				
<b>Magnetmasse</b>	0 %	100 %	50 % (sog. „vergraben“ Magneten?)	0 %
<b>Dauermoment bezogen auf aktives Rotorvolumen</b>	40 – 50 Nm/l	40 – 50 Nm/l	40 – 50 Nm/l	20 – 30 Nm/l
<b>Wirkungsgrad (<math>\eta</math>)</b>	92 %	88 %	ca. 92 %	86 %
<b>Dynamik</b>	< 250 ms	ca. 10 ms	wenige 10 ms	wenige 100 ms
<b>Einsatz</b>	Renault Kangoo	Toyota Prius, e-Golf, die meisten aktuellen PHEV	BMW i3	TESLA Modelle

Referenz

Bild 5: Übersicht über die elektrischen Maschinen in BEV und PHEV

## Mechanische Konstruktion und Leichtgewichtskonzept

### Kompletter Motor

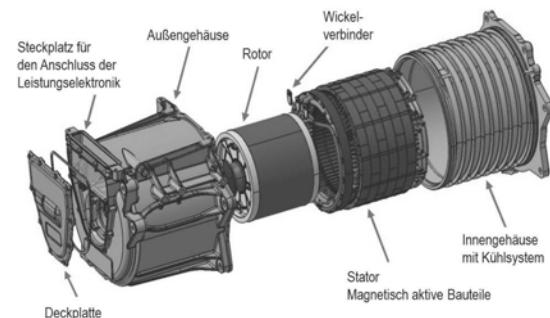


Bild 6: Gussteile für Elektromaschinen [5]

Weitere Schlüsselkomponenten der Elektromobilität sind die Speichersysteme, bei denen noch enormer Entwicklungsbedarf besteht. Nicht nur die einzelnen Zellen, welche für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert werden müssen, bedürfen noch signifikanter Weiterentwicklung. Auch die Zusammenführung der einzelnen Zellen zu Batteriesystemen sowie deren Betriebssicherheit unter kundennahen Betriebszuständen bergen noch große technische Herausforderungen.

Batteriesysteme müssen zum einen die Betriebssicherheit gewährleisten und zum anderen eine Konditionierung der Speicherzellen ermöglichen. Dazu sind teils komplexe Gehäusestrukturen erforderlich, welche sinnvollerweise in Aluminiumguss ausgeführt werden können. Dabei stellt neben der teils verschachtelten Geometrie von Kühl- und Heizzugängen die Größe eine prozesstechnische Herausforderung für die Gießerei dar.

Zur Erreichung einer maximalen Reichweite ist bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen neben der Optimierung der Batteriekapazität der Leichtbau keine so wichtige Anforderung mehr, da durch die Rekuperationsfähigkeit die Bremsenergie in den meisten Lastfällen zurückgewonnen werden kann. [2] Dennoch, hier lohnt es sich weiterhin über alternative Materialien wie bspw. Magnesium-Legierungen für Batteriegehäuse und anderen Einbausungen der elektrischen Komponenten nachzudenken, da die Größe und Komplexität dieser Bauteile das Handling im Produktionsprozess erschwert. Hier zeichnet sich ein wichtiger Trend für zukünftige Guss-Komponenten in der Elektromobilität ab. Thermisch dauerfeste und tribolo-

gisch optimierte Groß-Komponenten werden weniger im Fokus der technologischen Entwicklung stehen. Eigenschaften wie strukturoptimiert und kostengünstig werden neben der elektromagnetischen Verträglichkeit zu den wichtigen Kerneigenschaften gehören. Die elektrischen und elektromagnetischen Eigenschaften der vergossenen Materialien sind insbesondere dann von entscheidender Bedeutung, wenn diese in den verwendeten elektrischen Maschinen im elektrischen oder magnetischen Fluss eingesetzt werden.

Aber es gibt noch weitere, nicht vom Gesetzgeber oder aus Umweltschutzbelangen angegebene Gründe für den Wechsel zur Elektromobilität. Das vollautonome oder zumindest ein teilautonomes Fahren mit minimalen Eingriffen durch den Fahrer und die immer stärker nachgefragte Konvektivität im Fahrzeug haben einen Mehrwert für den Kunden. Was zu einem sehr starken Zugeffekt auf dem Markt führen wird.

Der Bedarf an elektrischer Energie für autonome und hoch-konvektive Fahrzeuge wird aufgrund der leistungsfähigen Rechner, Steuereinheiten, Sensorik und Aktuatorik, welche unter allen möglichen Umständen dauerhaft und ggf. auch redundant betriebssicher funktionieren müssen, so groß, dass leistungsfähige elektrische Energiespeicher im Fahrzeug vorliegen müssen.

- ✓ Mobilitätsdienste
- ✓ Internet
- ✓ Social Media
- ✓ Argumented Reality

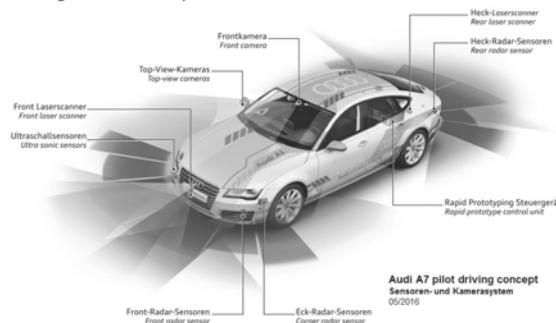


Bild 7: Automobile Konvektivität und autonomes Fahren [6]

Die im Zuge der Fortschritte auf dem Gebiet der Elektromobilität einwickelten Batteriesysteme bieten sich hierfür an. Ebenso erscheint eine Erhöhung der Spannungslage auf mindestens 48 Volt im PKW-Bereich oder auch darüber hinaus mittelfristig mehr als sinnvoll.

Diese Systeme können dann im Prinzip auch problemlos einen teil- oder vollelektrifizierten Antriebsstrang im Fahrzeug bedienen. Dann wird ein zusätzlicher verbrennungsmotorischer Antriebsstrang, zumindest auf der Kurz- und Mittelstrecke bis 200 km Reichweite, nach heutiger Sicht, wohl eher uninteressant werden.

## Zusammenfassung

Die Emissions- und Immissionsdiskussion der letzten Monate hat, neben der Notwendigkeit die gesetzlich vorgeschriebenen CO<sub>2</sub>-Minderungsziele zu erreichen, dazu geführt, dass der Wandel hin zur Elektromobilität bis zum Jahr 2030 gefordert wird. Ob sich die teils kontrovers diskutierten Mobilitätsszenarien umsetzen lassen ist heute noch völlig offen.

Außer Zweifel steht, dass sich der PKW-Markt in den kommenden Jahren massiv verändern wird. Die elektrifizierten Fahrzeuge werden im Vergleich zu den letzten Jahren deutlich an Marktanteilen gewinnen und das nicht nur in Deutschland [7] und Europa [8] sondern auch weltweit. (vgl. Abbildung 8)

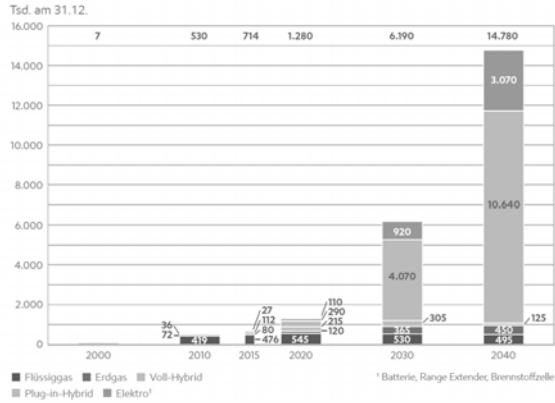


Bild 8: Pkw-Bestand – alternative Antriebe in Deutschland bis 2040 [7]

Mit Beginn des kommenden Jahrzehnts werden sowohl die Herstellkosten als auch die Kosten über die Fahrzeuglebensdauer (**Total Cost of Ownership**, TCO) konkurrenzfähig zu den Kosten von Dieselfahrzeugen sein. [1,2]

Zur Erfüllung der CO<sub>2</sub>-Ziele und von lokalen „Zero-Emission“-Vorgaben wird ein höherer Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) zwingend erforderlich sein. Dennoch werden Verbrennungsmotoren auf der Langstrecke und im Bereich der Heavy-Duty-Motoren als Antrieb bestimmt bleiben. Genauso werden die Marktanteile elektrifizierter Fahrzeuge auch nicht global auf 100 % steigen. Die weltweite elektrische Lade-Infrastruktur, insbesondere in Schwellenländern und in Flächenstaaten, wird in den nächsten Jahrzehnten nicht in dem Maße bereitgestellt werden können, sodass ein vollständiger Wechsel zum BEV vollzogen werden kann. Auch wird es weltweit nicht möglich sein innerhalb der kommenden Jahrzehnte die Stromproduktion auf 100% regenerativ erzeugen und damit CO<sub>2</sub>-neutralen Strom umzustellen. Daher werden die sog. Hybridfahrzeuge (Plug-In-Hybride und 48 Volt-Mild-Hybride) sicherlich noch auf nicht abschätzbarer Zeit über Verbrennungsmotoren verfügen. Aber auch für die Elektromobilität bleibt die Gießereitechnik eine wichtige Schlüsseltechnologie, denn:

- Motorenkomponenten (Motorgehäuse, Wicklungsträger, etc.),
- Batteriegehäuse inklusive der Konditionierung der Batteriezellen und
- Leistungselektronikgehäuse

sind wichtige und wertige Schlüsselkomponenten in einem teil-elektrifizierten oder batterie-elektrischen Fahrzeug.

Der Fokus der F&E Aktivitäten in der Gießereibranche wird sich nach heutiger Einschätzung allerdings verändern. Möglichst kompakte, thermisch und tribologisch hoch belastete Bauteile werden in elektrifizierten Antriebssträngen weniger wichtig sein. Das Handling und die effiziente Produktion großer geometrisch komplexer Bauteile mit dem Fokus auf Kostenoptimierung und günstiger Massenverteilung im Fahrzeug bekommen einen deutlich höheren Stellenwert. Zudem wird die Digitalisierung für künftige Fahrzeugkunden wohl wichtiger als der Antrieb sein! Dies führt sicherlich dazu, dass in autonom fahrenden Fahrzeugen die Art der Antriebsmaschine eher nebensächlich sein wird und die Emotionalität in Bezug auf den Antrieb, welche beim verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug vielmals zur Kaufentscheidung beiträgt, unweigerlich an Gewicht verliert.

## Literatur

- [1] Fröhlich K., Sheer Driving Pleasure of the Future. Drivetrain Development at BMW, 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2016
- [2] Lienkamp M., Status Elektromobilität 2016 oder wie Tesla nicht gewinnen wird, <https://www.researchgate.net/publication/304247929> - abgerufen am 26.10.2016
- [3] <https://www.welt.de/wirtschaft/article158634739/Bundesländer-für-Verbot-von-Benzin-und-Dieselautos.html> - abgerufen am 19.10.2016]
- [4] Rottengruber H.; Todsen E., Gießtechnisch relevante Trends in der Motoren-technik, Giesserei: Zeitschrift für Technik, Innovation und Management., Giesserei-Verlag, Düsseldorf, Heft 8 2015
- [5] Merwerth J., The Hybrid-Synchronous Machine of the New BMW i3 & i8 – Challenges with Electric Traction Drives for Vehicles, Workshop University Lund, Sweden, 20.3.2014
- [6] <https://www.audi-mediacenter.com/de/pilotiertes-fahren-3651>  
- abgerufen am 22.10.2016
- [7] ExxonMobil, Energieprognose Deutschland 2016-2040, Hrsg.: ExxonMobil Central Europe Holding GmbH, 2016 <http://cdn.exxonmobil.com/~/media/germany/files/energieprognose/energieprognose2016.pdf> - abgerufen am 25.10.2016
- [8] Otto Ch., Alte Stärken und neue Chancen, Automobil Industrie 09/2016, 61. Jg., Vogel Business Media



# Entwicklung und Prototyping eines Elektromotorengehäuses mit integriertem Kühlkonzept mittels Niederdruckguss

**Thomas Hametner MSc,**

**Dipl.-Ing. Dr. mont. Angela Harrison,**

LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH,

Austrian Institute of Technology, Ranshofen, Austria;

**Thomas Holzmüller MSc,**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien, Austria;

**Dipl.-Ing. Ralf Kobler, Dipl.-Ing. Dietmar Andessner,**

LCM, Linz, Austria

## Kurzfassung

Die weltweite Bevölkerungsanzahl nimmt ständig zu, dies passiert vor allem in städtischen Gebieten. Daher ist die derzeitige Ausgestaltung der urbanen Güterdistribution in den Fokus der Klimapolitik geraten. Die speziell auf den Einsatz von Elektrofahrzeugen zugeschnittene Entwicklung und experimentelle Implementierung neuartiger Güterlogistikkonzepte für dicht besiedelte Gebiete spielt auch eine entscheidende Rolle. Für das leichte Nutzfahrzeug „EVC R7“ wurde deshalb am LKR ein dreiteiliges Elektromotorengehäuse im Niederdruckgießverfahren hergestellt. Die modulare Bauweise ermöglicht einen universellen Einsatz und bietet somit ein großes Marktpotential. Das Konzept liefert innerhalb der Europäischen Union einen wesentlichen Beitrag zum Bestreben der CO<sub>2</sub>-neutralen Gütertransportlösungen in städtischen Zentren bis 2030. Eine weitere Innovation bietet das bereits im Guss berücksichtigte integrierte Kühlkonzept, wodurch nachträgliche Bearbeitungsschritte entfallen.

## Abstract

Worldwide the population is growing, especially in urban areas. Therefore, the organization of freight distribution in urban area has reached the focus of policy on energy and climate. The development and experimental implementation of novel freight logistic concepts for urban areas, especially the use of electric vehicles, play a main role.

For this purpose, a three-part electric motor housing for the light utility vehicle "EVC R7" was manufactured at the LKR by using the low-pressure casting process. The modular design

allows general use and further offers a great market potential. The concept provides a significant contribution within the European Union to the objective of CO<sub>2</sub>-neutral freight transport solutions in urban centers by 2030. Another innovation is provided by the integrated cooling concept, which has already been taken into consideration in the casting process, eliminating subsequent processing steps.

## 1. Einleitung

Um dem Innovationsdruck durch die bestehende und zukünftige Gesetzgebung hinsichtlich der erlaubten Emissionshöchstwerte gerecht zu werden, entwickelt nahezu jeder Automobilhersteller neben Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren auch solche mit alternativen Antriebssystemen. Ein Grund für diese Entwicklung ist die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Grenze für Neuwagen innerhalb der Europäischen Union. Diese liegt derzeit bei 120 g/km und wird ab 2020 auf 95 g/km gesenkt. Zur Erreichung dieser Ziele werden bei überschreiten Strafzahlungen bzw. CO<sub>2</sub>-Steuern fällig. Viele etablierte Hersteller haben bereits erste Serienfahrzeuge mit Hybrid- oder reiner Elektrotechnologie am Markt. Elektroautos können im Vergleich zu konventionell betriebenen Fahrzeugen Kosten- und Effizienzvorteile mit sich bringen. Wichtig wird daher auch die Entwicklung an der neuesten Generation von Lithium-Ionen-Batterien mit deutlich größeren Reichweiten sowie eine Weiterentwicklung der gesamten Elektronik [1].

Da bis 2030 laut EU-Vorgaben die Logistik in urbanen Zentren im Wesentlichen CO<sub>2</sub>-neutral bewerkstelligt werden soll, bieten sich vor allem für Transport- und Zustelldienste im städtischen Raum innovative Elektrofahrzeuge an. Die Weiterentwicklung in diesem Bereich ist von großer Bedeutung [2, 3].

Das Projekt EMILIA (Electric Mobility for Innovative Freight Logistics in Austria) ist einer der Leuchttürme der Elektromobilität des Klima- und Energiefonds. Das übergeordnete Projektziel besteht in der Verringerung der negativen Auswirkungen auf die ökologische und wirtschaftliche Lebensfähigkeit von Städten. Kurier- und Paketdienste haben durch viele kurze Strecken und Einzelfahrten einen hohen Anteil an städtischer Umweltverschmutzung sowie den entstehenden Lärm, Verkehr und Emissionen. Um einen Beitrag zur gewünschten Richtung zu liefern, wurde innerhalb eines Teilprojektes für das Fahrzeug „EVC R7“ ein neuer, hocheffizienter Elektromotor mit hohem Wirkungsgrad, geringem Gewicht und niedrigen Kosten entwickelt. Das Elektromotorengehäuse wurde in einer modularen Bauweise, bestehend

aus drei Einzelteilen, mit dem Niederdruckgießverfahren aus einer AlSi7Mg-Legierung hergestellt.

Der Beitrag liefert einen Überblick über die prognostizierte Marktentwicklung der Elektromobilität und das Niederdruckgießverfahren an sich. Den Hauptteil bildet die Entwicklung des genannten Gehäuses.

## 2. Prognostizierte Marktentwicklung der Elektromobilität

Zur Marktentwicklung in diesem Segment sind mehrere Studien zu finden. Diese Zahlen dienen einer groben Einschätzung der Größenordnung der potenziellen Marktentwicklungen:

- Laut einem aktuellen Bericht von Navigant Forschung, erhöhen sich die weltweiten Verkäufe von elektrisch angetriebenen Leicht-Nutzfahrzeugen von 2,7 Mio. in 2014 auf voraussichtlich 6,4 Millionen Stück im Jahr 2023 [4].
- Die Forschung von Bloomberg New Energy Finance legt nahe, dass die Batteriepreise in Zukunft sinken werden. Elektrofahrzeuge werden in den 2020er Jahren eine wirtschaftlichere Alternative als Benzin oder Diesel-Pkw in den meisten Ländern darstellen. Die Studie prognostiziert, dass bis zum Jahr 2040 der Verkauf von Elektrofahrzeugen auf 41 Millionen zunimmt. 35 % davon sollen Leichtlastfahrzeugverkäufe sein. Dies wären neunzig Mal mehr als 2015 [5].
- Im nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesrepublik Deutschland von 2009 wird vom Ziel zur Steigerung der Elektrofahrzeuge gesprochen. Dabei sollen 2020 bis zu 1 Million und 2030 sogar über 5 Millionen Elektrofahrzeuge innerhalb Deutschlands erreicht werden. Deutschland soll dabei als Leitmarkt für die Elektromobilität dienen [6]. Es ist allerdings anzumerken, dass bis 2015 lediglich 18.948 Elektroautos in Deutschland zugelassen wurden [7].
- Eine Untersuchung des österreichischen Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2014 unterscheidet zwischen zwei Prognosen hinsichtlich der Entwicklung von Elektrofahrzeugen. Dies ist zum einen die „Business As Usual“-Prognose (BAU) mit der Berücksichtigung von bisher geplanten Maßnahmen und Anreize, sowie zum anderen eine idealisierte Prognose mit der Bezeichnung „With Additional Measures“ (WAM). Laut der aktuellen BAU-Prognose sollten in Österreich bis 2020 etwa 66.000 und bis 2030 etwa 900.000 Elektrofahrzeuge zugelassen sein. Bei idealisierten Bedingungen nach der WAM-Prognose sollte der Anteil von Elektrofahrzeugen bis 2020 auf rund 174.000 und bis 2030 1,6 Millionen ansteigen. Idealisierte Bedingungen sind zum Beispiel finanzielle Anreize, Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie Strom aus erneuer-

baren Energieträgern. Da sich im Jahr 2014 etwa 2.000 Elektro-Pkw und 400 Plug-In-Hybrid-Pkw im österreichischen Fahrzeugbestand befanden, wird ein in dieser Untersuchung ein immenses Wachstum prognostiziert [8].

Die Entwicklungen deuten auf ein großes Marktpotential elektrisch angetriebener Logistikanwendungen hin.

### 3. Niederdruckgießen von Aluminiumlegierungen

Das Niederdruckgießverfahren wird vorwiegend zur Produktion von hochwertigen Aluminiumbauteilen genutzt [9]. Über ein Steigrohr gelangt die Schmelze infolge eines geringen Überdrucks in die Kokille und erstarrt unter diesem Druck von etwa 500 mbar. Die Druckhöhe ergibt sich aus der zu überwindenden Steighöhe und der Dichte der Metallschmelze [10, 11]. Um die Gussqualität nicht negativ zu beeinflussen und folglich Turbulenzen zu vermeiden, ist es wichtig, einen möglichst laminaren Schmelzefluss während der gesamten Formfüllung zu gewährleisten. Andernfalls kann es wie beim Druckguss zu eingewirbelten Gasporen kommen [12]. Nach dem Erstarren der Randschicht wird der Gießdruck zum Zweck der Dichtspeisung und zur Reduzierung des Volumenschwundes erhöht. Der Dichtspeisungsdruck erreicht dabei einen bis zu 30% höheren Druck, als beim konventionellen Schwerkraftkokillenguss. Während der Nachdruckphase kommt es durch Formkühlung bereits zur Erstarrung an der Bauteiloberfläche. Nach Druckentlastung wird die Form geöffnet und das Bauteil kann manuell oder mittels automatisierter Greifer- bzw. Robotersysteme entnommen und weiterverarbeitet werden [10, 12, 13].

Im Vergleich zum Schwerkraftguss bietet das Niederdruckgießverfahren folgende Vorteile [10, 13]:

- Saubere Gussteilqualität, da die flüssige Schmelze stets unterhalb der schwimmenden Oxidschicht entnommen wird
- Turbulenzarme Formfüllung
- Ausführung flexibler Druckkurven
- Druckspeisung sorgt für ein oxid- und porenares Gefüge
- Wirtschaftliches Arbeiten durch geringen Kreislaufmaterialanteil (<20%)
- Hoher Automatisierungsgrad möglich

Basierend auf diesen Effekten lassen sich die gewünschten Anforderungen in Bezug auf hohe Belastbarkeit und spezifische Festigkeit realisieren. Der Einsatz von Mehrfachkokillen kann verwirklicht und somit eine hohe Wirtschaftlichkeit in Kombination mit hohem Automatisierungsgrad der Prozesskette (hohe Reproduzierbarkeit) ermöglicht werden. Es wird sowohl die Verwendung von Sandkernen als auch eine hohe Maßgenauigkeit und somit endkontournahe Fertigung durch dieses Gießverfahren ermöglicht [13, 14]. In Abbildung 1 ist eine schematische Druckkurve aus dem Niederdruckgießprozess abgebildet. Der Druck wird in Phase I aufgebaut und die Metallschmelze gelangt bis zum Anschnitt. In Phase II wird die Formfüllung vollzogen, in Phase III der Nachdruck für den Ausgleich des Volumenschwundes aufgebracht. Abschließend erfolgt die Druckentlastung und das Bauteil kann nach der Erstarrung entnommen werden [12].

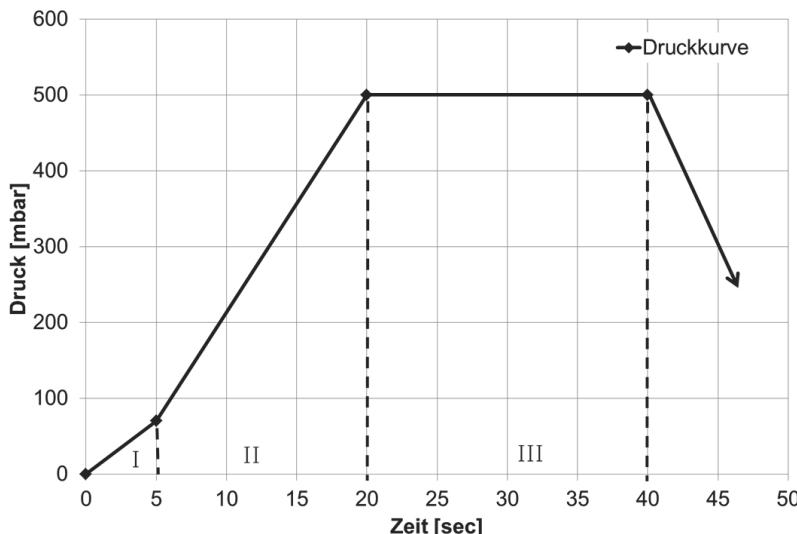


Bild 1: Darstellung einer schematischen Druckkurve während des Niederdruckgießprozesses [nach 12]

Die Anwendungsbereiche in der Bauteilauslegung können in drei Hauptbereiche unterteilt werden: Sicherheitsbauteile (Energie absorbierend), Strukturauteile (hohe Festigkeit) und Hochtemperaturbauteile (hohe Kriechbeständigkeit) [15]. Das Verfahren eignet sich durch gesteuerte Druckfüllprozesse besonders gut für die Herstellung von dünnwandigen Guss-

bauteilen. Bevorzugt werden rotationssymmetrische Bauteile, wie etwa Aluminiumfelgen, in diesem Verfahren hergestellt [13].

#### 4. Prototyping eines Leichtbau-Elektromotorengehäuses

Um einen Beitrag zur gegenwärtigen Marktentwicklung zu liefern, wurde im Projekt EMILIA (Electric Mobility for Innovative Freight Logistics in Austria) ein Elektromotor für das Leicht-Nutzfahrzeug „EVC R7“ hergestellt. Spezifische technische Entwicklungsziele waren eine Gewichtsreduktion des Motors um 20 %, sowie eine Ausdehnung der Reichweite um 15 %. Mit der Trennung von Getriebe- und Motorgehäuse durch einen Zwischenflansch, wurde ein vielseitiger Einsatz des Elektromotors ermöglicht. Abbildung 2 zeigt die dreiteilige Bauweise des Gehäuses inklusive Elektronikkomponenten in der Schnittansicht. Durch die universelle Einsatzmöglichkeit bietet das Konzept ein großes Marktpotential und liefert damit einen wesentlichen Beitrag zur Förderung der Elektromobilität innerhalb Europa. Als Gussformen wurden Sandformen verwendet, welche mit Hilfe von modernen 3D-Druckern im Rapid-Prototyping-Verfahren hergestellt wurden.

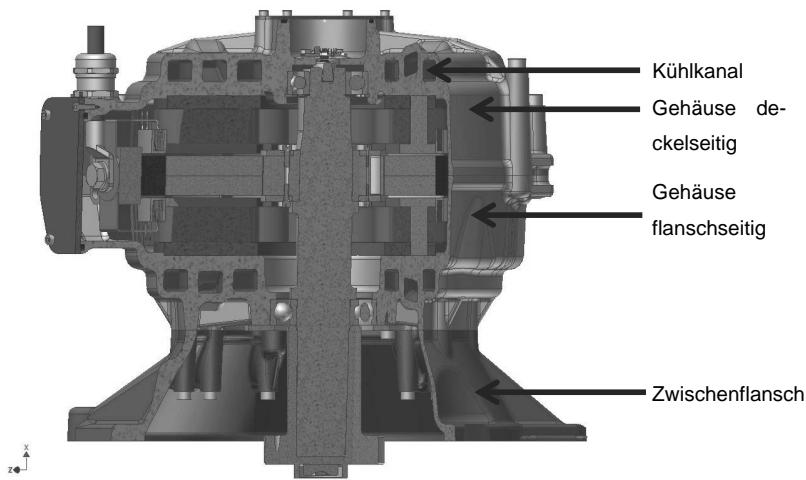


Bild 2: AISi7Mg-Elektromotorengehäuse bestehend aus drei Einzeilein Formfüll- und Erstarrungssimulation

Um die gießgerechte Bauteilgeometrie und die Konstruktion des Gießsystems zu beurteilen, stellt die Formfüll- und Erstarrungssimulation mit dem Softwarepaket NovaFlow&Solid CV™ stets einen wesentlichen Prozessschritt vor dem Gießbeginn dar. Bereits in der Vergangenheit wurden am LKR erfolgreich Bauteile hergestellt, die mit Sandformen abgegossen wurden. Dies waren unter anderem ein Steuerungselektronikgehäuse und ein Getriebegehäuse für einen Elektroantrieb.

Für die Simulationen mit NovaFlow&Solid CV™ wurden neben der Schmelze/Formtemperatur und der zeitabhängigen Druckkurve auch die Größe des Tiegels, die Menge der Schmelze sowie der Durchmesser, die Länge und die Eintauchtiefe des Füllrohres berücksichtigt. Somit werden auch der minimal notwendige Gegendruck und diejenige Zeit miteinbezogen, die die Schmelze benötigt, um durch das Füllrohr bis zum unteren Rand der Sandform zu steigen [16]. Abbildung 3 zeigt eine abgeschlossene Simulation des vollständig gegossenen Gehäusedeckels am Beginn der Nachdruckzeit, vergleiche Phase III in Abbildung 1.

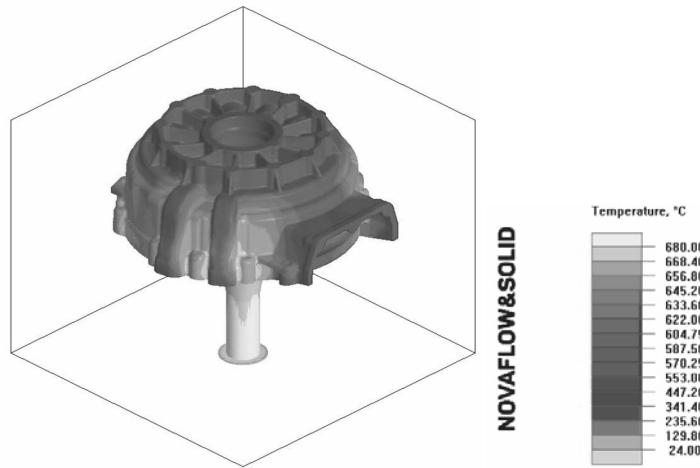


Bild 3: Vollständig gegossener Gehäusedeckel am Beginn der Nachdruckzeit  
Gießtechnische Herstellung

Nach erfolgreicher Simulation wurden die komplexen Gussformen mit modernen 3D-Druckern im Rapid-Prototyping-Verfahren aus Quarzsand, gebunden mit Furanzharz bzw. anorganischen Silikatbinder, hergestellt und direkt im Niederdruckgießprozess eingesetzt. Das 3D-Druckverfahren bietet hervorragende Möglichkeiten um komplexe Formen herzustellen. Die schnelle und wirtschaftliche Herstellung von Sandformen und -kernen erfolgt praktisch nach CAD-Datensatz und eignet sich so hervorragend für den Prototypenguss. Ein niedriger Bindergehalt sorgt für ein Verglichen mit traditionellen Herstellverfahren gutes Verhalten beim Ausgasen und Entkernen der gedruckten Formen. Abbildung 4 zeigt die gedruckten Sandformen und -kerne mit Kernstützen. Als Kernstützen wurden sowohl speziell für den Aluminiumguss geeignete extrudierte Polystyrol-Hartschaumstoff-Kernstützen als auch Aluminiumkernstützen verwendet. Die schwer entflammbare Kunststoff-Kernstütze hält den Kern so lange in Position, bis dieser von der Schmelze vollständig umspült ist und einer gleichmäßigen Belastung unterliegt.

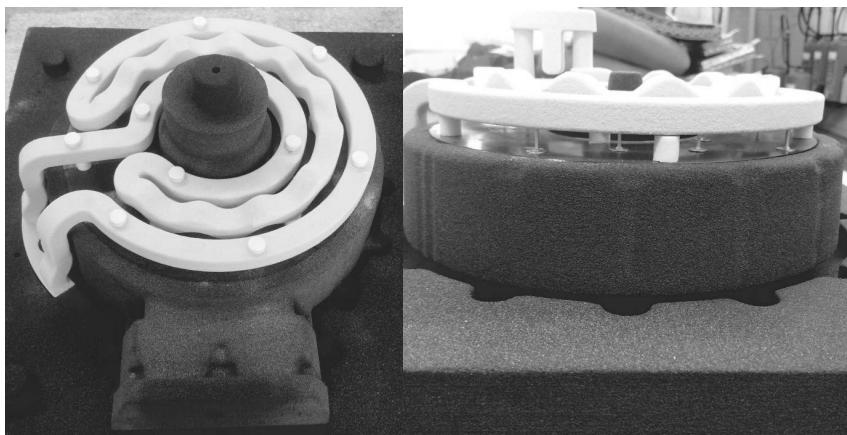


Bild 4: 3D-gedruckte Sandformen

Die Gehäuseteile wurden mit der bestens für den Niederdruckguss geeigneten AlSi7Mg-Legierung abgegossen. Durch die Spülung mit Argon konnte ein Dichteindex von 2,1 eingestellt werden. Dieser Wert deutet auf einen geringen Wasserstoffgehalt in der Schmelze hin. Tabelle 1 zeigt die Legierungszusammensetzung und den Dichteindex.

Tabelle 1: Legierungszusammensetzung, Angaben der Gehalte in Gew.-% und Dichteindex

Legierungsbezeichnung	Al	Si [%]	Mg [%]	Ti [%]	Dichteindex
AlSi7Mg	Rest	7,1	0,36	0,14	2,1

Eine wesentliche Neuerung stellte das integrierte Kühlkonzept dar, wodurch nachträgliche Bearbeitungsschritte entfallen können. Realisiert wurde der Kühlkanal durch einen Sandkern mit anorganischen Silikatbinder, in Abbildung 4 weiß dargestellt. Dieser wurde mit der „Corecracker Station“ vorgelockert und anschließend mit dem „Swingmaster 315 R“ (beide Anlagen von FILL GmbH) entkernt. Letzte Reste wurden per Hand entfernt. An der „Corecracker Station“ arbeiten pneumatisch betriebene Schlaghämmere mit einer Schlagfrequenz von 20 Hz. Der „Swingmaster“ bringt bei einer Dreh- und Schwingbewegung Beschleunigungswerte von über 250 m/sec<sup>2</sup> auf das Bauteil auf. Der vorgebrochene Sandkern Gussteils wird durch diese Beschleunigung weiter zerrieben und nach außen transportiert. Durch die komplexe Geometrie stellte sich dieser Prozess als große Herausforderung dar. Die technischen Daten wurden der FILL-Homepage entnommen. Nach der mechanischen Bearbeitung am LKR wurden die Gehäuseteile den Projektpartnern übergeben und gemeinsam mit der Axialflussmaschine und der Elektronik ins Fahrzeug eingebaut.

### Axialflussmaschine

Die Axialflussmaschine, dargestellt in Abbildung 5, zeichnet sich vor allem durch sehr hohe Momentendichten bei kurzen Baulängen aus. Dieser Vorteil entsteht rein aus geometrischen und nicht aus elektromagnetischen Gründen. Das Drehmoment eines Elektromotors ist proportional zur magnetischen Kraft die zwischen Rotor und Stator generiert wird, multipliziert mit dem Hebelarm, der die Kraft in ein Drehmoment wandelt. Während bei Radialflussmaschinen mit der Länge  $l$  das Drehmoment nur quadratisch mit dem Luftspaltradius  $r_{Luftspalt}$  wächst,

$$T_{RFM} \propto \underbrace{2 \cdot r_{Luftspalt} \cdot \pi \cdot l}_{\text{Fläche}} \cdot r_{Luftspalt} \propto r_{Luftspalt}^2 \quad (1)$$

generiert die Axialflussmaschine ein Drehmoment proportional zur dritten Potenz des Motor-durchmessers:

$$T_{AFM} \propto r_o^2 \pi \left( \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2} \right) \cdot \underbrace{\frac{r_o}{2}}_{\text{Fläche}} \cdot \underbrace{\left( \frac{\lambda - 1}{\lambda} \right)}_{\text{Hebel}} \propto r_o^3 \quad (2)$$

Wobei  $\lambda$  der Quotient von Motoraußendurchmesser und Motorinnendurchmesser darstellt:

$$\lambda = \frac{r_o}{r_i} \quad (3)$$



Bild 5: Doppelseitige AFM mit Ferrit-Magneten

Aus diesem Grund weisen Axialflussmaschinen ein scheibenförmiges Design auf und sind speziell für automotive Anwendungen sehr interessant, da hier oft hohe Drehmomente, geringes Gewicht, kompaktes Design sowie hohe Effizienz gefordert wird.

Um der Forderung eines kostengünstigen Antriebs gerecht zu werden, wird in diesem Fall auf Selten-Erd-Magnete verzichtet und stattdessen kostengünstige Ferrit-Magnete eingesetzt. Bei Ferritmagneten ist wichtig die Luftspaltfläche magnetisch maximal auszunutzen. Bei geblechten Varianten kann der Wickelkopfbereich magnetisch nicht genutzt werden. Durch den Einsatz von SMC-Materialien, und die damit verbundene Möglichkeit den Fluss in allen drei Dimensionen führen zu können, ist es nun möglich auch diesen Bereich zur Drehmomenterzeugung zu nützen und ist in Abbildung 6 veranschaulicht.

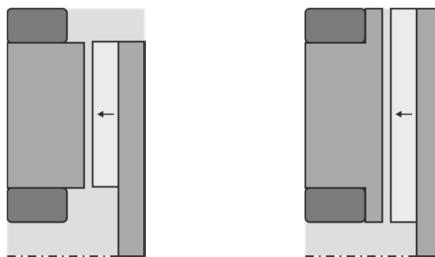


Bild 6: Links: Geblechte Variante; Rechts: Variante mit SMC-Statormaterial

Somit ist es möglich die Erreger-Luftspaltflussdichte von ca. 0.3T auf eine Flussdichte im Statorzahn von über 1T zu konzentrieren (Abbildung 7). Dadurch werden Statorflussdichten ähnlich wie bei Motoren mit Selten-Erden-Magnete erreicht und es ist im direkten Vergleich ein ähnlich hoher Wirkungsgrad möglich.

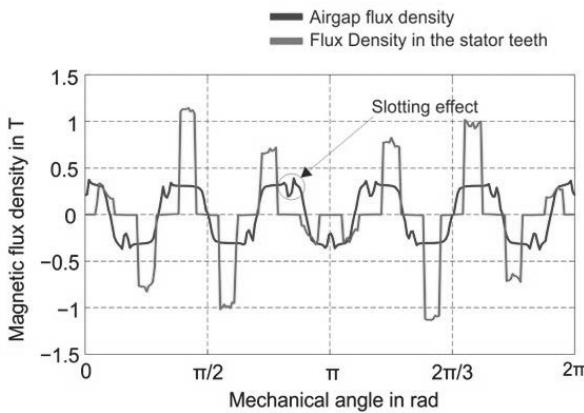


Bild 7: Erreger-Flussdichte im Luftspalt sowie konzentrierte Flussdichte im Statorzahn

## **Elektronik**

Passend zum Gehäuse wurde eine Leistungselektronik entwickelt, welche zum ansteuern des Motors nötig ist. Diese besteht aus sechs Leistungsschaltern mit zugehörigem Spannungszwischenkreis, der dazugehörigen Steuerungselektronik und einer Wasserkühlung. Bei der Entwicklung wurde besonders auf eine hohe Leistungsdichte geachtet. Der Prototyp der hier entwickelten Hardware ist in Abbildung 8 abgebildet. Es ist von oben nach unten die Steuerelektronik, das Leistungsmodul und die Wasserkühlung zu erkennen.

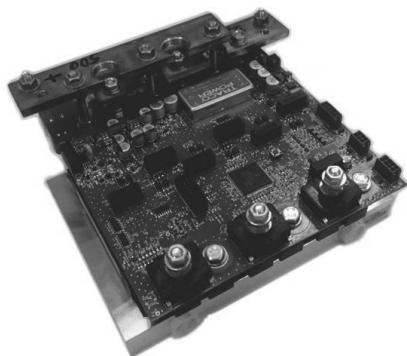


Bild 8: Prototyp der Elektronik

Die Leistungsschalter sind in Form eines Moduls ausgeführt. Dieses Modul ist vom Schaltungstyp B6 und verwendet Silizium IGBTs als Schaltelemente mit paralleler Freilaufdiode. Die eingesetzten IGBTs haben ein Schaltvermögen von bis zu 600 A und 600 V und können bis zu einer Dauerleistung von 55 kW eingesetzt werden. Die Verwendung eines Moduls erlaubt eine höhere Leistungsdichte im Vergleich zu diskreten Bauteilen. Der Einsatz einer Wasserkühlung erlaubt eine weitere Steigerung der Leistungsdichte.

Das Herzstück der Steuerelektronik bildet ein Digitaler Signal Prozessor vom Typ TMS570 von Texas Instruments. Zusätzlich sind Messwandler für Ströme, Spannungen und Temperaturen untergebracht. Der DSP misst diese Größen und berechnet mit Hilfe eines Maschinenmodells eine feldorientierte Regelung um die Maschine optimal zu betreiben. Zusätzlich verfügt die Elektronik über eine CAN-Schnittstelle um mit anderen Komponenten kommunizieren zu können.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurde der bestehende Elektromotor des „EVC R7“ erfolgreich durch einen neuen Motor substituiert. Zur Ermittlung optimaler Gießparameter sowie Speiser- und Angussgeometrien wurde vorab eine Formfüll- und Erstarrungssimulation durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden Sandformen, gefertigt mit modernen 3D-Druckern im Rapid-Prototypen-Verfahren, hergestellt und anschließend im Niederdruckgießverfahren mit einer AlSi7Mg-Legierung abgegossen. Das Leichtbaugehäuse liefert gemeinsam mit der effizienten Elektronik einen Beitrag zum EU-Ziel, bis 2030 eine CO<sub>2</sub>-neutrale Logistik innerhalb städtischen Zentren zu ermöglichen.

Derzeit ist ein Folgeprojekt zur weiteren Optimierung des Gehäuses in der Antragsphase. Dabei sollen die Kühlkanäle und die Gehäusegeometrie hinsichtlich Leichtbaupotentials geringfügig abgeändert werden. Die Entscheidung des Fördergebers steht zum Zeitpunkt des Beitrages noch aus.

## Danksagung

Die Autoren danken der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG, dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) und dem Land Oberösterreich für die Unterstützung dieser Forschungstätigkeit im Rahmen des Förderungsprogrammes Leuchttürme und Demonstrationsprojekte der E-Mobilität.

## 7. Literaturangaben

- [1] Servatius, H.-G., Schneidewind, U. u. Rohlfing, D.: Smart Energy: Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
- [2] Europäische Kommission: Weißbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, Brüssel 2011
- [3] Austriatech, Elektromobilität 2015 Monitoringbericht, Wien 2016
- [4] Martin, R.: Navigant Research, 20. Januar 2015.  
<https://www.navigantresearch.com/newsroom/sales-of-light-duty-electric-vehicles-are-expected-to-reach-6-4-million-annually-by-2023> [Abgerufen am 18. Oktober 2016]

- [5] MacDonald, J.: Bloomberg New Energy Finance, 25. Februar 2016.  
<http://about.bnef.com/press-releases/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040/> [Abgerufen am 18. Oktober 2016]
- [6] Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität, Berlin 2009
- [7] Statista - Das Statistik-Portal:  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/> [Abgerufen am 18 Oktober 2016].
- [8] Pötscher, F.: Szenarien zur Entwicklung der Elektromobilität in Österreich bis 2020 und Vorschau 2030, Umweltbundesamt GmbH, Wien 2015
- [9] Zhang, L. u. Wang, R.: An intelligent system for low-pressure die-cast process parameters optimization. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 65, (2013) S. 517-524
- [10] Schmidt, P.: Entwicklung des Niederdruck-Hohlteilgießverfahrens, Technische Universität Bergakademie Freiberg Diss. 2010
- [11] Van Basshuysen, R. u. Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [12] Fu, P., Luo, A. A., Jiang, H., Peng, L., Yu, Y., Zhai, C. u. Sachdev, A. K.: Low-pressure die casting of magnesium alloy AM50: Response to process parameters, Journal of Materials Processing Technology 205 (2008) S. 224-234
- [13] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie: Niederdruck-Kokillengießen – ein Herstellungsverfahren für Leichtmetallgussteile mit besonders hohen Anforderungen an Festigkeit, Dehnung, Druckdichtheit und Schweißbarkeit, Düsseldorf 2009
- [14] Kammer, C.: Magnesium Taschenbuch, Düsseldorf: Aluminium Verlag 2000
- [15] K. Pettersen, K.; Bakke, P. u. Albright, D.: Magnesium Die Casting Alloy Design, Magnesium Technology 2002, (Ed.: H.I.Kaplan), TMS-AIME, 2002, S. 241-246
- [16] C. J. Angermeier, A. M. Horr und A. Harrison, „Full through Process Simulation for Low Pressure Die Casting – From Casting to Design,“ Materials Science Forum, Vols. 794-796 (2014) S. 118-123

## Herausforderungen E-Drive Komponenten – Gießtechnische Lösungen

## Challenges E-Drive Components – Solutions in Casting Technology

**Franz Josef Feikus, Leopold Kniewallner,  
Christian Heiselbetz, Nemak Europe;  
Michael Rafetzeder, Ricardo Fernandez, Nemak Linz;  
Marcus Speicher, Dirk Schnubel, Nemak Dillingen;  
Grzegorz Stalec, Nemak Poland**

### Einleitung

Die fortschreitende Ressourcenverknappung sowie der steigende Aufwand bei der Erschließung neuer Quellen und bei der Rohölförderung führen zu einem Preisanstieg für den Betrieb von klassischen Verbrennungsmotoren. Zudem treiben weltweit steigende CO<sub>2</sub>-Emissionen bei gleichzeitig wachsendem Umweltbewusstsein die politische Energiewende, welche sich durch eine strengere Gesetzgebung und staatliche Förderprogramme ausdrückt. Die Elektromobilität und die damit einhergehende Elektrifizierung des Automobils gewinnen somit an Aufmerksamkeit. Durch die Nationale Plattform Elektromobilität wird dieser Weg vorangetrieben und konkretisiert<sup>1</sup>. Es herrscht jedoch bis dato kein Konsens darüber, wann Elektroantriebe mehrheitlich zum Einsatz kommen werden und in welchen Anteilen sich Hybridlösungen, also eine Kombination aus Verbrennungs- und Elektroantrieb, am Markt etablieren werden.

Durch die Elektrifizierung des Antriebstrangs wird der Bedarf an Gusskomponenten zur Umsetzung der Elektromobilität deutlich steigen. Die tiefgreifende Veränderung der Fahrzeugstruktur und der verbauten Komponenten wird die Gießereibranche nachhaltig beeinflussen: Eine Vielzahl an Gusskomponenten des konventionellen Antriebstrangs (Motorblock, Zylinderkopf, Getriebegehäuse etc.) wird sich hinsichtlich der spezifischen Anforderungen verändern und der Anteil vollständig neuer Gussteile des elektrischen Antriebs wird deutlich ansteigen. Gleichzeitig wird die Notwendigkeit zum Leichtbau und die

---

<sup>1</sup> vgl. [www.nationale-plattform-elektromobilitaet.de](http://www.nationale-plattform-elektromobilitaet.de)

damit einhergehende Gewichtsreduzierung die Bedeutung für Gusskomponenten aus NE-Metall-Werkstoffen wie Aluminium weiter vorantreiben.

Von großer Relevanz sind in diesem Kontext das Gehäuse des Elektromotors sowie das Batteriegehäuse. Dabei handelt es sich um Bauteile, die durch die Integration zusätzlicher Funktionen (wie bspw. Kühlkanäle) eine hohe Komplexität aufweisen. Außerdem ist mit zunehmender Elektrifizierung zu erwarten, dass die Abmessungen der Gusskomponenten wachsen und die Seriengrößen steigen werden. Dies stellt insbesondere die Produktentwicklung und die Fertigungstechnik vor große Herausforderungen.

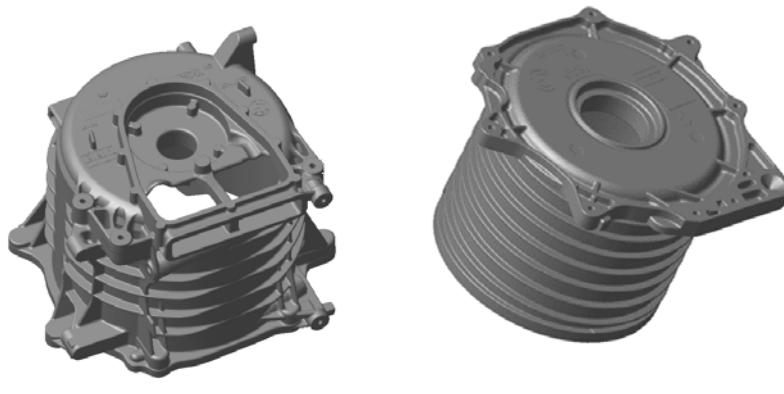
Neue Prozesse und Verfahren entlang der Wertschöpfungskette sind erforderlich, um die Anforderungen an die neuen Gussteile zu erfüllen. Dies betrifft in erster Linie den Gießprozess selbst. Je nach Komplexität der Gussform und entsprechender Stückzahl ist ein geeignetes Gießverfahren nach wirtschaftlichen und technologischen Kriterien vorzusehen. Die Anforderungen an die Bauteile, insbesondere nach Dictheit und crashrelevanter Stabilität, sind dabei hoch. Darüber hinaus sind dem Gießen nachgelagerte Bearbeitungs-, Füge- und Montageschritte zu berücksichtigen. Die hierfür erforderlichen Kompetenzen sind vielfältig und erfordern eine gesamtheitliche Betrachtung der ganzen Prozesskette. Die dem Gießprozess nachgelagerten Fertigungsschritte werden damit in der Wertschöpfungskette an Bedeutung gewinnen.

Im Folgenden werden die Herausforderungen von E-Drive Komponenten aus Aluminium unter Berücksichtigung potentieller Gießverfahren näher beleuchtet.

### Zweiteilige Elektromotorengehäuse im Druckgießverfahren

Der prozentuale Anteil der Elektromotoren im Antriebsstrang von PKWs liegt heute noch im einstelligen Bereich. Entsprechend niedrig sind bislang die gefertigten Stückzahlen. Das aktuelle Design des Gehäuses für den Elektromotor des BMW i3/i8 ist für eine Fertigung im Druckguss ausgelegt. Dabei sind die Anforderungen an das Gussteil durchaus anspruchsvoll. Zur Erfüllung der Spezifikationen an die Bauteilfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit kommt eine AlSi-Gusslegierung mit niedrigen Eisen- und Kupfergehalten zum Einsatz. Das Gehäuse wird mit einem flüssigen Medium gekühlt. Zur Realisierung der aufwändig gestalteten Kühlkonfiguration, die den Motor umlaufend umschließt, wurde das Gehäuse zweiteilig ausgelegt, siehe **Abbildung 1**, um die Eignung für eine Fertigung im Druckgießverfahren zu ermöglichen, da bis heute keine großserientaugliche Technik zur Darstellung von Kernen mit

Hinterschnitten verfügbar ist. Die verschiedentlich publizierte Salzkerntechnik erfüllt nicht die außerordentlich hohen Anforderungen an die zu fertigenden inneren Kerne der Elektromotorengehäuse. Die Produktion der Gussteile erfolgt auf einer komplett eingerichteten Gießzelle. Zur Erfüllung der Festigkeitsanforderungen werden die Teile unter Anwendung von Vakuum abgegossen und anschließend wärmebehandelt. Eine besondere Herausforderung an die Gießtechnik stellen die Abdichtungsflächen des Innengehäuses gegenüber dem Außengehäuse dar, siehe **Abbildung 2**. Eine nahezu porositätsfreie Oberfläche erfordert dabei die Einhaltung eines sehr engen Prozessfensters.



Gussgewicht 6,7 kg

Außengehäuse

Gussgewicht 4,5 kg

Innengehäuse

Bild 1: zweiteiliges Gehäuse für den Elektromotor des BMW i3/i8



Bild 2: Abdichtungsbereiche mit umlaufenden O-Ringen im Innengehäuse mit erhöhten Anforderungen an die Gussteilporosität

Neben der Einhaltung der Porositätsanforderungen ist aufgrund der engen Maßtoleranzen ein besonderes Augenmerk auf das Teilehandlung nach der mechanischen Bearbeitung zu legen.

### Einteilige Elektromotorengehäuse

Über das oben beschriebene und in der Serienfertigung etablierte zweiteilige Design des Elektromotorengehäuses zeichnen sich für zukünftige Elektromotoren abweichende Designs ab. Der erkennbare Trend zur Erhöhung des Integrationsgrades auch für elektrische Antriebe der neuesten Generationen, z.B. durch die Vereinigung von Leistungselektronik, E-Motor und Getriebestufe in einem integralen Gehäuse, bietet hier Herausforderungen, die im Druckgießverfahren nicht erfüllt werden können. Die komplexe Gestaltung und die aufwändigen Kühlkonfigurationen machen das Niederdruckgießen und den CPS®-Kernpaket-sandguss zu Verfahren der engeren Wahl.

Angelehnt an aktuelle Konzepte wurde ein Elektromotorengehäuse-Demonstrator entwickelt, der sowohl im Niederdruck-Kokillenguss wie auch im Kernpaketverfahren gegossen werden kann, siehe **Abbildung 3**. Dabei wurde das Grunddesign gezielt um nicht funktionsrelevante, gießtechnische Herausforderungen wie z.B. ungünstig gelegene Massenanhäufungen an

Rippenknotenpunkten erweitert um die Potentiale beider Verfahren umfassend bewerten zu können.

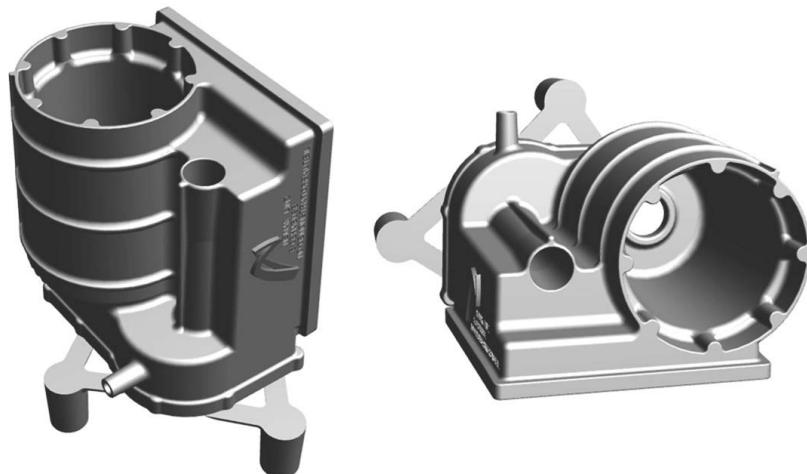


Bild 3: Einteilig gegossenes Demonstrator-Gehäuse mit hoher Komplexität hier ausgelegt für die Niederdruckgießtechnik

Der Demonstrator bietet:

- Bauraum für den Stator
- Bauraum für die Leistungselektronik
- Anbindung des Getriebes bzw. Antriebsflansch.

Die Anforderungen an den Leichtbau bei einem eng begrenzten Bauraum werden durch minimale Wanddicken (3 mm) eine filigrane Rippenstruktur (dünnwandige Versteifungsrippen) sowie auf ein Minimum reduzierte Füllrippen gewährleistet.

Gießtechnisches Highlight ist die Darstellung des komplex geformten Wassermantels, der den Statorsitz nahezu vollständig umschließt, siehe **Abbildung 4**.

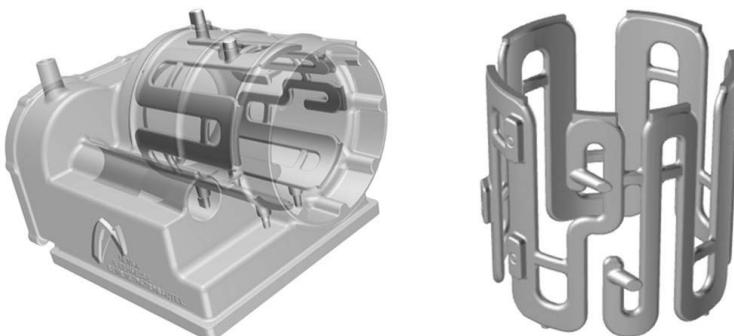


Bild 4: Komplex geformter Kühlkanal für das Demonstrator-Gehäuse

Das **Niederdruckgießverfahren** zeichnet sich durch seine gezielt gesteuerte Formfüllung aus. Damit ist es möglich, abhängig vom zu füllenden Querschnitt die optimale Füllgeschwindigkeit einzustellen und so die Entstehung von Oxiden und Lufteinschlüssen auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die Verwendung von Mehrfachsteigrohren lassen sich im Gussstück verteilt liegende Wanddickenanhäufungen optimal zur Nachspeisung erreichen und dadurch schwindungsbedingte Porositäten ebenfalls weitgehend unterdrücken. Entscheidend unterstützt wird das Speisungsvermögen durch eine Vielzahl separat ansteuerbarer Werkzeug-Kühlkreise. Darüber wird die erforderliche Ausrichtung des Temperaturgradienten im Gussteil zum Speiser hin entsprechend eingestellt. Die Werkzeugtemperierung übernimmt aber auch bei der Formfüllung eine wichtige Funktion. Insbesondere entfernt vom Steigrohr liegende dünnwandige Bereiche lassen sich nur fehlerfrei füllen, wenn die Werkzeugtemperaturen ausreichend hoch liegen. Unter diesen technischen Rahmenbedingungen wird erreicht, dass die Gussstücke die hohen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, 0,2% Dehngrenze, ...) erfüllen.

Das **CPS®-Verfahren** als etablierter Prozess zur Herstellung funktionaler, hochbelasteter Al-Motorblöcke zeichnet sich in besonderer Weise durch die Vereinigung von Designfreiheit, Produktivität und hohen mechanischen Eigenschaften aus. Eine Spezialität im CPS®-Verfahren ist die Darstellung komplexer, teils sehr filigraner Kanal-Geometrien, so dass sich hier interessante Anknüpfungspunkte zur Erweiterung des Anwendungsfeldes für das CPS®-Verfahren bieten. Zudem eignet sich das Kernpaketverfahren, speziell in Kombination mit der „werkzeuglosen“ additiven Herstellung von Kernen, zur schnellen Prototypenfertigung. So

können verschiedene Designvarianten schnell und effizient in funktionale Prototypen umgesetzt werden. Dabei werden quasi ab dem ersten Teil bereits die Funktionseigenschaften des möglichen Großserienprozesses abgebildet.

Dieser Logik folgend wurden die ersten Prototypen für den Elektromotorengehäuse-Demonstrator in der Entwicklungsgießerei von Nemak Dillingen mit vollständig gedruckten Kernpaketen hergestellt.

Durch die enge Verzahnung der Nemak Produktentwicklungszentren konnte eine schnelle Realisierung vom Bauteildesign bis zum Abguss der ersten Prototypen im Kernpaket erreicht werden. Die eigentliche Herausforderung war die gießtechnologische Prozessentwicklung zur Darstellung solch neuartiger Bauteile im CPS®-Verfahren. Ausgangspunkt der Arbeiten in Dillingen war wie beschrieben das Demonstrator Datenmodell. Hierauf aufbauend wurde dann die Konzeptionierung des Gießprozesses auf Grundlage der virtuellen Prozessentwicklung mittels Füll- und Erstarrungssimulation erarbeitet. Parallel wurde ein entsprechender Kernpaketaufbau entwickelt um die ersten Abgüsse in der Entwicklungsgießerei von Nemak Dillingen durchzuführen. Da diese Arbeiten Bestandteil eines laufenden größeren internen F&E-Projektes waren, wurde bewusst das 3d-Drucken als Kernherstellungsverfahren gewählt. Zum einen war es so möglich vertiefende praktische Erfahrung mit dieser noch recht jungen Fertigungstechnologie zur Potentialabschätzung für zukünftige Anwendungsfelder zu sammeln und zum anderen können so effizient unterschiedliche Designvarianten, z.B. der WassermanTELgeometrie in kleiner Stückzahl ohne zusätzliche Werkzeugkosten hergestellt werden.

## Batteriegehäuse

Ein weiteres neues Anwendungsfeld für Gussteile in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sind die Batteriegehäuse. Hier zeichnet sich allerdings ein Wettbewerb unterschiedlicher Fertigungsverfahren ab. Hybride Lösungen, bei denen Gussteile mit Blechformteilen und/oder Pressprofilen kombiniert werden, sind vorstellbar. Aufgrund der zunehmenden Größe der Gehäuse wird auch an modularen Konzepten entwickelt. Damit wird es schwieriger bezüglich der erforderlichen Stückzahlen und Einzelteilgrößen belastbare Aussagen zu machen. Als sicheres Designmerkmal ist aber festzustellen, dass die Gehäuse aufgrund der starken Wärmeabgabe bei hoher Belastung der Batterien alle mit einer effizienten Kühlung ausgestattet sein müssen. Je nach Verwendung in Hybrid- oder reinen Elektrofahrzeugen können auch die Anforderungen an die Gehäuse variieren. Korrosionsbeständigkeit, Dicht-

heit sowie EMV- und Crashanforderungen müssen bei der Konstruktion solcher Gehäuse berücksichtigt werden.

Bei Gehäusen ohne eine komplexe Kühlung ist bei hohen Stückzahlen vor allem das Druckgießen ein bevorzugtes Gießverfahren. Die dazu verfügbaren Maschinengrößen (max. 4500 t) limitieren derzeit die Anwendung für noch größere Gehäuse. Modulare Konzepte, die ähnlich wie beim Verbrennungsmotor, den Aufbau unterschiedlicher Leistungsklassen und Reichweiten ermöglichen, bieten Ansätze mit hohem Potenzial für zukünftige Anwendungen. In **Abbildung 5** ist ein mögliches Konzept prinzipiell dargestellt.

Eine andere Option sind Hybridlösungen. Ein Al-Gussteil wird mit Profilen ergänzt, dadurch können ebenfalls größere Abmessungen erzielt werden. Die Beherrschung der erforderlichen Verbindungstechniken ist dabei eine entsprechende Voraussetzung.

Sind komplexe Kühlkreisläufe erforderlich, dann ist das Druckgießen nicht mehr das bevorzugte Verfahren. Vor allem das Niederdruckgießen ermöglicht den Einsatz von Sandkernen oder das Eingießen von Rohren um eine optimierte Kühlung erzielen zu können. Beim Eingießen ist ein reproduzierbarer Übergang zwischen Gussteil und Insert von entscheidender Bedeutung für eine effiziente Kühlwirkung. In **Abbildung 6** ist ein entsprechender Demonstrator dargestellt, mit dem diese grundlegenden Untersuchungen durchgeführt werden. Die Vollständige Formfüllung und die Werkstoffwahl für die Rohre sind nicht die einzigen Herausforderungen, die bei diesen Herausforderungen beherrscht werden müssen. Hierzu müssen auch die Simulations-Werkzeuge weiterentwickelt werden, um in Zukunft die Auslegung solcher Lösungen zu erleichtern.

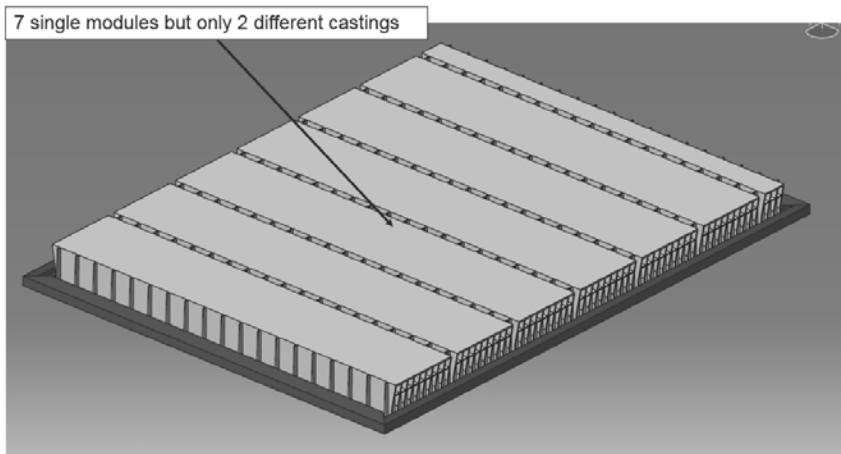


Bild 5: Modulares Konzept für den Aufbau eines Batteriemoduls mit Druckgussgehäusen  
(Gehäusemodulgewicht: 9,5 kg)

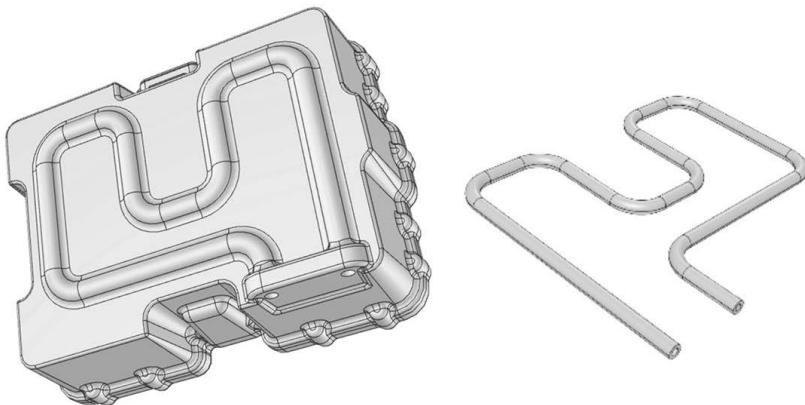


Abbildung 6: Demonstrator für ein Batteriegehäuse mit integrierten Kühlkanälen

Beim Einsatz von Sandkernen ist die vollständige Entfernung des Sandes, vergleichbar wie in Zylinderblöcken und Köpfen, eine entsprechende Herausforderung.

Wie bereits angemerkt, wird es bei diesen Komponenten in der nächsten Zeit einen verstärkten Wettbewerb der Verfahren geben, um Kosten und Gewicht zu optimieren.

## Zusammenfassung

Als aktuelle Konsequenz in der Entwicklung der Elektroantriebe für Personen-Kraftwagen werden eine große Anzahl verschiedener neuer Komponenten benötigt, die aufgrund ihrer Komplexität bevorzugt als Gussteile konstruiert werden. Dies betrifft vor allem die Elektro-Motoren-, Batterie- und Steuergehäuse. Hier ist ein enormer Entwicklungssprung zu verzeichnen. Aufgrund der hohen Leistungsdichten sowie auch durch die zunehmende Funktionsintegration, teilweise versehen mit aufwendigen Innen-Kühlkonfigurationen, sind die Komponenten heute sehr anspruchsvoll in der Herstellung. Sie erreichen damit eine Komplexität, die der des Verbrennungsmotors näher steht, als herkömmliche E-Antriebe. Es ist dabei noch nicht auszumachen, welche Gießverfahren bevorzugt zur Anwendung kommen werden.

Aktuelle Designs von Elektro-Antriebs Komponenten sehen komplexe Kühlkonfigurationen vor. Am Beispiel einer **zweiteiligen Lösung** wird aufgezeigt, dass eine Herstellung im **Druckgießverfahren** möglich ist. In der Produktentwicklung ist dabei ein besonderes Augenmerk auf die Qualität der Dichtflächen zu legen, die durch besondere Maßnahmen im Gießprozess oder durch eine nachgeschaltete Gefügeoptimierung eingestellt werden.

Alternativ dazu werden aktuell aber auch **einteilige Lösungen** entwickelt, die sich nur durch Einsatz komplex geformter Kerne realisieren lassen. Hier kommen alternative Gießverfahren für eine Serienfertigung in Frage. Die Wahl des Gießverfahrens, bevorzugt das **ND-Kokillengießverfahren** oder **der CPS®-Kernpaket-sandguss**, hängt dabei von der Komplexität und geforderten Stückzahl ab. Aufgrund der angenäherten Rotationssymmetrie eines Elektromotorengehäuses ist das Niederdruckgießverfahren dazu besonders geeignet. Das laminare Fließen der Schmelze in den Formhohlraum garantiert ein Minimum an nichtmetallischen Einschlüssen und sichert damit die hohen Qualitätsanforderungen ab. Das CPS®-Verfahren wird vor allem dann gießtechnisch eine Alternative darstellen, wenn der Integrationsgrades bei Gehäusen für Elektroantriebe zunimmt, z.B. durch die Vereinigung von Leistungselektronik, E-Motor und Getriebestufe in einem integralen Gehäuse. Weiterhin bietet das CPS®-Verfahren interessante Optionen insbesondere durch seine vielfältigen geometri-

schen Gestaltungsmöglichkeiten, die insbesondere bei der Gestaltung gegossener innenliegender Wasserkühlkreisläufe zur Anwendung kommen können.

Ein neues Anwendungsgebiet für Aluminium-Gussteile eröffnet sich im Bereich der **Batteriegehäuse**. Diese Gehäuse zeichnen sich durch eine flächige, weite Erstreckung aus, so dass das Druckgießen eingesetzt werden kann. Einige Konstruktionen sehen aber ebenfalls aufwendige Kühlkanäle in einer Komplexität vor, die mit dem Druckgießverfahren nicht realisierbar sind. Bei diesen Designs ist das Niederdruckgießen das bevorzugte Gießverfahren, da es erlaubt, unter Verwendung von Mehrfachsteigrohren die Kavität fehlerfrei zu füllen.



# The new Audi 2.5l TFSI five cylinder engine for the new Audi TT RS – A lightweight design high performance engine

Dr.-Ing. **Stefan Dengler**, AUDI AG, Ingolstadt;  
Dipl.-Ing (FH) **Henning Meishner**, Nemak Europe GmbH

## Einleitung

Die Geschichte der Fünfzylinder-Ottomotoren bei Audi beginnt im Jahr 1976. Im damaligen Audi 100 (Typ C2) kommt erstmals ein 2,3l Saugmotor mit 85 und 100 kW Leistung zum Einsatz. Gleichzeitig stellt dieser Motor den Aufbruch für Audi in die automobile Oberklasse dar. Über den weiteren Lebenszyklus werden zusätzliche Derivate entwickelt, erstmals auch in Kombination mit Turboaufladung. Leistet der R5-Turbomotor im legendären Urquattro von 1980 noch 147 kW sind es am Ende der Lebenszeit bis zu 232 kW im RS2 Avant. Parallel hierzu gesellen sich zahlreiche Weltmeisterschaftserfolge im Rallyesport mit dem Höhepunkt der Pikes Peak Bergfahrt 1987 mit einem Audi Sport Quattro S1 mit 440 kW / 590 Nm. Absolute Maximalleistung erbringen die Aggregate in der IMSA-GTO Rennserie im Jahr 1989 in den USA mit bis zu 530 kW / 720 Nm. Danach gibt es eine Pause von fast 20 Jahren, ehe im Frühjahr 2009 mit dem TT RS erstmals wieder ein Turbo aufgeladener 5 Zylindermotor in einem Audi Serienfahrzeug vorgestellt wird. Dieser R5 der neuen Generation kombiniert ein Grundtriebwerk des in Mexiko gefertigten 2.5l Saugmotors mit dem erfolgreichen Audi TFSI-Brennverfahren und der damals aktuellsten Aufladungstechnologie. Schon in dieser ersten Generation setzt sich die Erfolgsstory der R5-Motoren fort. Mit seinem unvergleichbaren Klangbild reihen sich 7 Siege in Folge beim bekannten Motoren-Award „international engine of the year“ in seine Geschichte ein. Aktuell findet das Aggregat seinen Einsatz im RS3 Sportback und RSQ3. Auf dieser Basis erfolgt nun eine grundlegende Überarbeitung des Triebwerks.

## Introduction

The history of five-cylinder petrol engines from Audi starts in 1976. The Audi 100 (type C2) launched in that year marked the first-time application of a 2.3l naturally aspirated engine in 85 kW and 100 kW power variants. That engine at the same time embodied Audi's move into

the luxury car class. Over the rest of its life cycle, additional derivatives were developed, also for the first time combined with turbocharging. From the I5 turbo engine's 147 kW power output in the legendary original quattro in 1980, the culmination at the end of the life cycle was the 232 kW engine in the RS2 Avant. These developments were accompanied by numerous world championship triumphs in rallying, the highlight being the victory of a 440 kW/590 Nm Audi Sport quattro S1 in the 1987 Pikes Peak International Hill Climb. The absolute maximum power extending up to 530 kW/720 Nm was achieved by the engines used in the IMSA-GTO race series in the USA in 1989. There was then a break of almost 20 years before a turbocharged five-cylinder engine was again featured in an Audi production car, the TT RS launched in the spring of 2009. That new-generation I5 combined the basic powertrain of the 2.5l naturally aspirated engine built in Mexico with the successful Audi TFSI combustion method and the latest turbocharging technology of the time. That first generation immediately resumed the success story of the I5 engines. With its incomparable sound, the unit achieved seven consecutive International Engine of the Year awards. It is currently featured in the RS 3 Sportback and RS Q3. Now the engine is being applied as the basis for a fundamental revision of the powertrain.

## 1 Entwicklungsziele

Der Entwicklung liegen folgende Ziele zugrunde:

- Deutliche Performancesteigerung:  
Trotz der bereits überragenden Fahrleistungen für ein Fahrzeug der Kompakt-klasse soll sowohl in der Maximalleistung als auch in der Elastizität ein neuer Spitzenwert im Segment erreicht werden.
- Signifikante Gewichtsreduzierung:  
Mit der Anordnung des Motor-Getriebeverbandes vor der Vorderachse kommt dem absoluten Motorgewicht eine entscheidende Rolle hinsichtlich einer hohen Querdy namik zu. Ein konsequenter Leichtbauansatz führt an dieser Stelle zu nochmals ge steigerten Rundenzeiten im Rennstreckeneinsatz.
- Nochmalige Bauraumverkürzung:  
Oberstes Ziel ist eine Integration des Aggregates in den modularen Querbaukasten (MQB), ohne signifikante Änderungen an der Struktur des Vorderwagens vornehmen zu müssen. Am Ende der Entwicklung kann die kurze Einbaulänge des Vorgängers nochmals reduziert werden.

- Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Werte:

Gute Verbrauchswerte und Hochleistungsmotoren müssen nicht zwangsläufig im Widerspruch stehen. Eine Reihe von Reibungsmaßnahmen und modernste Einspritz- und Aufladungstechnologie, sowie der Einsatz des zweistufigen Audi Valvelift System (AVS) auf der Auslassseite führen zu einer deutlichen Verbrauchsminderung gegenüber dem Vorgängeraggregat.

- Erfüllung aller zukünftigen Abgasstandards:

Das Aggregat ist für einen weltweiten Einsatz konzipiert und erfüllt somit die kommenden Abgasstandards der Gesetzgebungen EU6, C6 und ULEV.

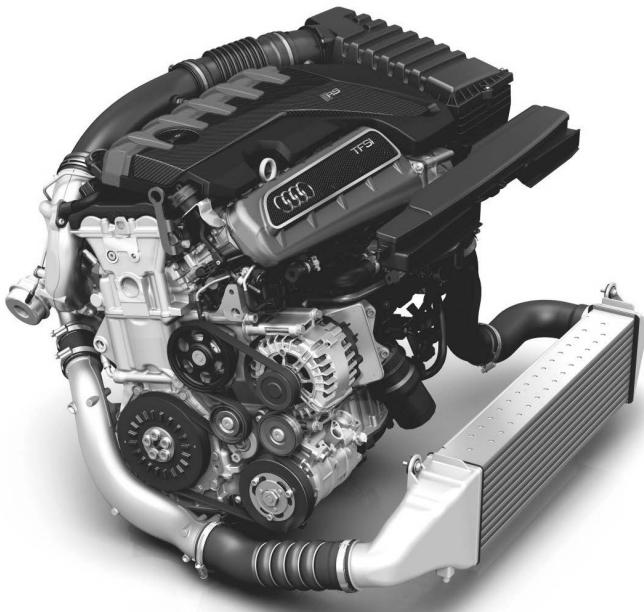


Bild 1: Gesamtansicht des neuen R5 TFSI-Motors (Einbaulage modularer Querbaukasten)

## 2 Motorbeschreibung / Technikscherpunkte

Für die zweite Generation des R5 TFSI-Motors wird das bewährte Triebwerkslayout des Vorgängers übernommen und hinsichtlich der inneren Motorreibung weiter verbessert. Trotz der deutlich gesteigerten Maximalleistung von 294 kW sind die Hauptlagerdurchmessere reduziert, die Nockenwellenlagerung sowie der Kettentrieb weiterentwickelt und der Druckölkreislauf inklusive der Regelölpumpe optimiert.

Das Gewicht des neuen R5 TFSI-Motors kann mit dem breiten Einsatz von Leichtbaumaterialien reduziert werden. Maßgeblichen Anteil daran haben ein Ölwanneoberteil aus Magnesium, ein Visko-Schwingungsdämpfer aus Aluminium, eine gewichtsoptimierte Kurbelwelle und der breite Einsatz von Aluminiumschrauben. Die Besonderheit des neuen Aggregates ist jedoch das Kurbelgehäuse, bei dem die ursprüngliche Graugussvariante durch ein Aluminium-Design substituiert wurde. Die Fertigung des Bauteils erfolgt im Rotacast®-Verfahren im Hause Nemak. Dieses Verfahren ist bei Zylinderköpfen bereits millionenfach bewährt und wurde speziell auf die Besonderheiten von Aluminium-Kurbelgehäusen weiterentwickelt.

Zur Verbesserung der Drehmomentcharakteristik wird ein neuer Abgasturbolader, sowie das bewährte Audi valvelift system (AVS) in einer Neuentwicklung adaptiert. Durch das hohe Drehmoment von 480 Nm bei 1700 U/min werden hervorragende Fahrleistungen aber insbesondere auch niedrige Verbräuche erreicht.

Zur intelligenten Steuerung der Wärmeströme des Motors (Thermomanagement) wird eine schaltbare Kühlmittelpumpe entwickelt. In der Warmlaufphase kann auf diese Weise der Kühlmitteleintritt komplett abgesperrt werden.

Für die Erreichung der zukünftigen EU 6-Abgasnormen wird das bei Audi bekannte kombinierte FSI/MPI-Einspritzsystem adaptiert. Durch die freie Wählbarkeit der Einspritzarten kann neben einer deutlichen Minderung der Partikelemissionen in weiten Kennfeldbereichen auch eine Verbrauchsreduzierung erreicht werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit im Vollastbereich über eine kombinierte Einspritzung höhere Kraftstoffmengen zur Verfügung zu stellen, ohne die Spreizung der Hochdruckeinspritzventile vergrößern zu müssen.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Abmessungen und Daten zusammengefasst dargestellt.

Zum Vergleich ist das Vorgängeraggregat auf Basis TT RS gegenübergestellt.

Ein wichtiges Kriterium für einen quer eingebauten Fünfzylindermotor stellt die absolute Einbaulänge dar (siehe Abbildung 2).

Tabelle 1: Hauptabmessungen und Kenndaten des R5 TFSI-Motors gegenüber seinem Vorgänger

Hauptabmessungen und Kenndaten			
Merkmal	Einheit	2,5l R5 TFSI Generation 2	2,5l R5 TFSI Generation 1
Hubraum	cm <sup>3</sup>	2480	2480
Hub	mm	92,8	92,8
Bohrung	mm	82,5	82,5
Hub / Bohrung (Verhältnis)	--	1,12	1,12
Zylinderabstand	mm	88	88
Blockhöhe	mm	219,6	220
Pleuelänge	mm	144	144
Hauptlagerdurchmesser	mm	52	58
Pleuelgängerdurchmesser	mm	47,8	47,8
Ventildurchmesser Ein-/ Auslass	mm	33,85 / 28	33,85 / 28
Ventilhub Einlass / Auslass 1 / Auslass 2	mm	10,7 / 10 / 10	10,7 / 10 / --
Einlass öffnet (1 mm Ventilhub)	°Kw nach OT	30	28
Einlass schließt (1 mm Ventilhub)	°Kw nach UT	45	38
Auslass öffnet (1 mm Ventilhub)	°Kw vor UT / nach OT	43 / 67	83 / --
Auslass schließt (1 mm Ventilhub)	°Kw vor OT	23	23
Verstellbereich Einlassnockenwelle	°Kw	50	42
Verstellbereich Auslassnockenwelle	°Kw	42	42
Verdichtung	--	10	10
Leistung / Drehzahlbereich	kW / 1/min	294 / 5850-7000	265 / 5500-6700
Max. Drehmoment / Drehzahlbereich	Nm / 1/min	480 / 1700-5850	465 / 1650-5400
Kraftstoffart	ROZ	98 / 95	98 / 95
Erstbefüllmenge Öl	l	8,3	7
Motorgewicht (nach DIN GZ)	kg	160	186

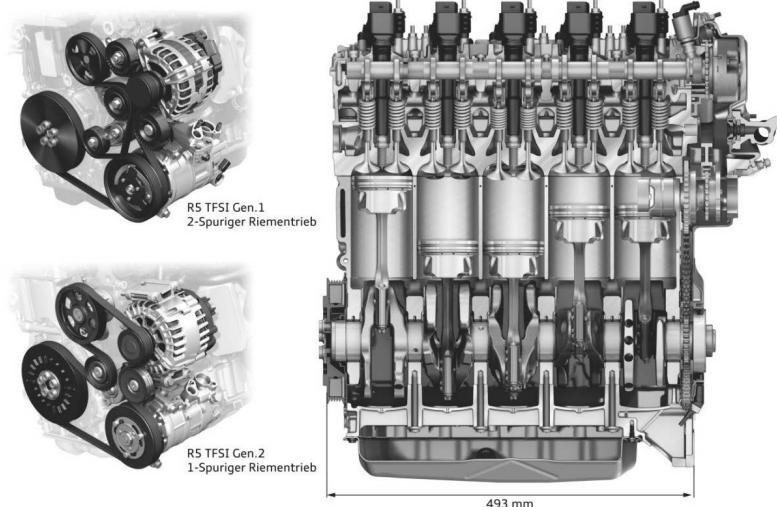


Bild 2: Gesamtlänge R5 TFSI-Motors

Gegenüber dem Vorgängeraggregat kann die Einbaulänge nochmals um 2,5 mm reduziert werden. Dies gelingt zum einen durch eine Umstellung des Poly-V-Riementriebs von einer 2 auf eine 1-spurige Ausführung sowie eine weitere Bauraumreduktion im Bereich des hinteren Kettentriebes. Mit einer absoluten Länge von nur 493 mm reiht sich der aktuelle R5 TFSI-Motor in den Bereich von konventionellen R4-Motoren ein.

### 3 Grundtriebwerk

Der Schwerpunkt der Weiterentwicklung des Grundmotors liegt neben der Auslegung für maximale Spitzenleistung auf einer signifikanten Verringerung der Motormasse bei gleichzeitiger Absenkung der Reibleistung. In Summe kann das Gewicht des Motors nach DIN GZ gegenüber dem Vorgängeraggregat um 26 kg auf 160 kg gesenkt werden.

#### 3.1 Zylinderkurbelgehäuse (ZKG)

Den Hauptanteil an der Gewichtsreduzierung des Motors trägt das Zylinderkurbelgehäuse. Durch die Werkstoffumstellung von GJV-Grauguss auf Aluminium kann in Summe 18,8 kg eingespart werden. Wie beim Vorgänger ist das Bauteil als deep skirt - Lösung konzipiert.

Hergestellt wird das ZKG im Kokillenguss nach dem Rotacast®-Verfahren. Als Legierung wird wegen seiner hervorragenden Duktilität der Aluminiumwerkstoff AlSi7MgCu0,5 eingesetzt, welcher die wesentliche Basis zur Sicherstellung der geforderten mechanischen Festigkeiten bildet.

Für die geplante exklusive Stückzahl von ca. 50.000 Motoren über Lifetime kommt ein Schwerkraft – Kokillengußverfahren für eine wirtschaftliche Fertigung zum Einsatz. Das Rotacast®-Verfahren besitzt darüber hinaus besondere Vorteile im Bereich der Formfüllung und der Bauteilerstarrung. Aufbauend auf den millionenfachen Erfahrungen bei NEMAK bei der Fertigung von Zylinderköpfen mit diesem Prozess (mehr als 15 Mio., Stand 2014) war es das Ziel, die durchweg positiven Eigenschaften auch auf das Gießen von Zylinderkurbelgehäusen zu übertragen.

Ein wesentlicher Faktor auf die Eigenschaften eines Gussteils sind eine ruhige, turbulenzarme Formfüllung und der Temperaturgradient im Formhohlräum am Ende des Formfüllvorganges. Bei jedem „ungeschützten“ Kontakt von flüssigem Aluminium mit der Luft entstehen Oxide, welche die Oberfläche der Schmelze gegen weitere Einflüsse schützen. Infolge hoher Strömungsgeschwindigkeiten und starker Turbulenzen wird der natürliche Oxid-Schutz zer-

stört und mit der Schmelze vermischt. Diese Kontamination kann direkt zu Qualitätsproblemen führen (undichter Guss) oder mindert die Belastbarkeit des Werkstoffes deutlich.

Eine weitere qualitätsbestimmende Einflussgröße ist die Temperaturverteilung im Gussteil am Ende der Formfüllung, insbesondere der Temperaturgradient zum Speiser. Auslegungsziel sollte es immer sein, dass der Speiser zum Ausgleich erstarrungsbedingten Schwindungsporositäten als letzter Bereich im Formhohlraum erstarrt (gerichtete Erstarrung). Bei Gießprozessen, bei denen der Temperaturgradient mit der gewünschten Erstarrungsrichtung übereinstimmt sind in der Regel weniger (kleinere) speisungsfördernde Eingriffe nötig, die sehr oft über die Bauteilgeometrie realisiert werden müssen und das Bauteilgewicht erhöhen. Beim Schwerkraft - Kokillenguss können sowohl die Formfüllgeschwindigkeiten als auch die formfüllinduzierten Temperaturverteilungen deutlich variieren, abhängig vom eingesetzten Gießverfahren. Aufgrund des Schwerkrafteinflusses nehmen diese Unterschiede mit steigender Bauteilhöhe sogar noch zu.

Für das neue Kurbelgehäuse wurde in einer frühen Entwicklungsphase eine Bodengusslösung verfolgt und realisiert (Abbildung 3). Hierbei muss die gesamte zur Formfüllung benötigte Schmelze über die gekühlten Kokillenbereiche, bei ZKG über den gekühlten Kurbelraumeinsatz, geführt werden. Dabei kühlte die Schmelze stark ab, folglich verschlechtert der Temperaturgradient im Speiser, die Nachspeisung ist nur eingeschränkt möglich, schwindungsbedingte Bauteilfehler drohen. Um Fehler im Bauteilinneren zu vermeiden, mussten funktionale Speisungswege geschaffen und in das Bauteildesign integriert werden. Der im Projektverlauf durchgeführte Konzeptwechsel beweist mit beeindruckenden 1.000 g Gewichtseinsparung im Bereich der Speisungswege die Wirkung eines guten Temperaturgradienten. Als Sekundäreffekt ist bei den Rotacast® -Konzepten zusätzlich eine vergleichsweise geringere Speiserhöhe erforderlich, was die Ausbringung und damit die Wirtschaftlichkeit steigert.

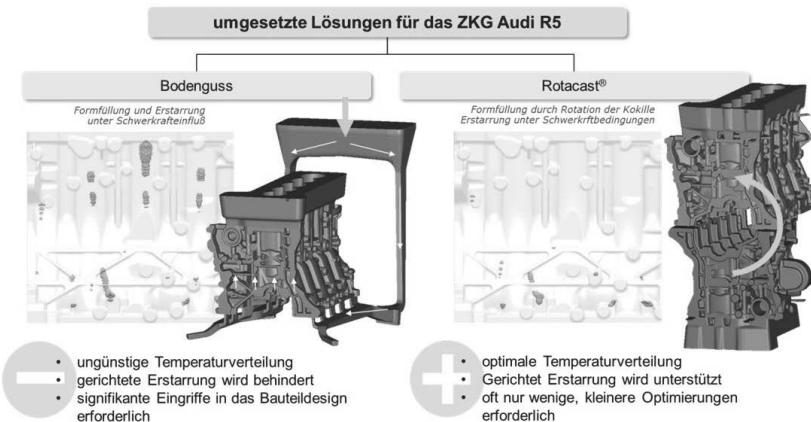


Bild 3: Realisiertes Kokillengussverfahren für das Aluminium-Kurbelgehäuse

Anhand der beiden beim ZKG R5 realisierten Kokillengusslösungen zeigt sich ein weiterer Unterschied: mit dem Rotacast®-Verfahren können bei identischer Bauteilkonstruktion in den besonders gekühlten Bauteilbereichen bessere mechanische Kennwerte realisiert werden. Im Gegensatz zu der für den Bodenguss typischen steigenden Formfüllung, tritt beim Rotacast®-Verfahren keine intensive Strömung in den bereits gefüllten Bauteilkonturen auf. Die Schmelze wird schichtend in den Formhohlraum gebracht, so dass sie bereits während der Formfüllung (stark) abgekühlt werden kann. Heiße Schmelze wird permanent auf die bereits erstarrenden Bereiche nachgefüllt bis schließlich zum Ende der 180° Rotation des Formhohlraumes der Speiser gefüllt wird. Hieraus resultiert ein en optimaler Temperaturgradient. Messbare Vorteile für das Rotacast®-Verfahren im Vergleich zum Bodenguss (Abbildung 4):

- Reduzierung des sDAS bis zu 4µm (relevanter Wert für die Gefügefeinheit)
- bis zu 7% bessere statische Kennwerte
- bis zu 13% bessere dynamischen Kennwerte

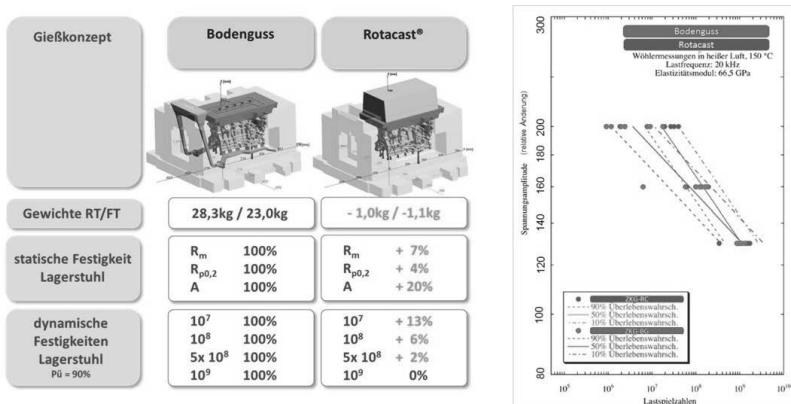


Bild 4: Wesentlicher Bauteileigenschaften und Einfluss des Gießverfahrens

Zur weiteren Steigerung der Festigkeit sind die 2-fach verschraubten GJS700-Hauptlagerdeckel laserstrukturiert und mit einer zusätzlichen Querverschraubung versehen. Zudem ist zur weiteren Gewichtsreduzierung ein hoher Funktionsintegrationsgrad mit Einbindung der Wasserpumpenspirale und des Hochdruckkraftstoffpumpenmoduls umgesetzt. Einen weiteren technischen Höhepunkt stellt die Beschichtung der Zylinderlaufbahn nach dem APS-Verfahren (atmosphärisches Plasmaspritzen) dar. Aufgrund des Bohrungsdurchmessers von 82,5 mm bei einem Zylinderabstand von 88 mm und einer damit verbleibenden Stegbreite von nur 5,5 mm kam der Einsatz einer Graugussbuchse nicht in Frage. Die Herstellung der APS-Spritzschicht in der hauseigenen Fertigung erfolgt durch das Aufbringen eines feinkörnigen Spritzpulvers. Dafür wird vor dem Auftrag zur besseren Schichthaftung die Zylinderbohrung mechanisch mit einem Zahnprofil aufgeraut.

Basis für die Realisierung einer beschichteten Laufbahnlösung ist die Gefügequalität des Aluminiumgussteiles im Bereich der Zylinderbohrung. Neben einer ausreichenden Festigkeit zur Aufnahme verschiedenster Kräfte aus dem Verbrennungsprozess kommt der Gefügequalität eine große Bedeutung zu. Porositäten in diesem Bereich können die Beschichtung oder deren Funktion nachhaltig schädigen und müssen unter allen Umständen vermieden werden. Zur Sicherung der Bauteilqualität werden deshalb alle Zylinderrohre nach dem Aufrauen auf kritische Porositäten untersucht. Dies erfolgt automatisch mittels einer speziellen Kamera (IPS-Scan), welche die Zylinderrohre aufnimmt und sämtliche Fehlstellen detektiert.

Bei der Entwicklung des Werkzeugkonzeptes musste deshalb auf die Vermeidung von erstarrungsbedingter Porosität im Zylinderrohrbereich, durch Sicherstellung einer ausreichenden Speisung geachtet werden. Diese Forderung konkurriert jedoch mit der motorischen Notwendigkeit, hoher Festigkeiten im Zylindersteg. Es gilt also den Zielkonflikt zwischen schneller Erstarrung für hohe Festigkeiten im Zylindersteg und ausreichender Speisung im Zylinderrohr zu lösen.

› Homogenes beschichtungsfähiges Gefüge im Linerbereich

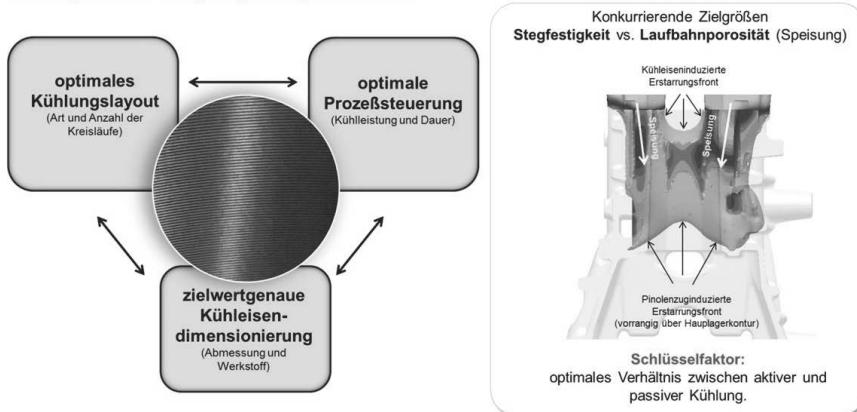


Bild 5: Beschichtungsfähiges Zylinderrohr – komplexes Optimierungsproblem

Für die Entwicklung eines optimalen Konzeptes und die Einstellung der idealen Prozessbedingungen waren umfangreiche Versuchsprogramme erforderlich (Abbildung 5). Durch den Einsatz der Gießsimulation konnten verschiedenste Konzeptbestandteile und Prozessparameter variiert, kombiniert und bewertet werden. So war es möglich, eine optimales (anforderungsgerechtes) Kokillenguss-Konzept für das Kurbelgehäuse zu entwickeln.

Durch eine, für die Beschichtung optimierte Honung entstehen in der Laufbahn kleine Schmiertaschen, die reibungs- und verschleißarmes Gleiten der Kolbenringe gewährleisten. Weitere Vorteile dieser Lösung sind die erhöhte Wärmeabfuhr im Vergleich zu Grauguss, die dadurch gesteigerte Klopffestigkeit bei der Verbrennung und die verbesserte Korrosionsbeständigkeit gegenüber Schlechtkraftstoffen im Weltmarkt. Aufgrund der verbleibenden Stegbreite kann eine zusätzliche Stegkühlungsbohrung mechanisch eingebracht werden. Die Details dieses innovativen Zylinderkurbelgehäuses sind in Abbildung 6 dargestellt.

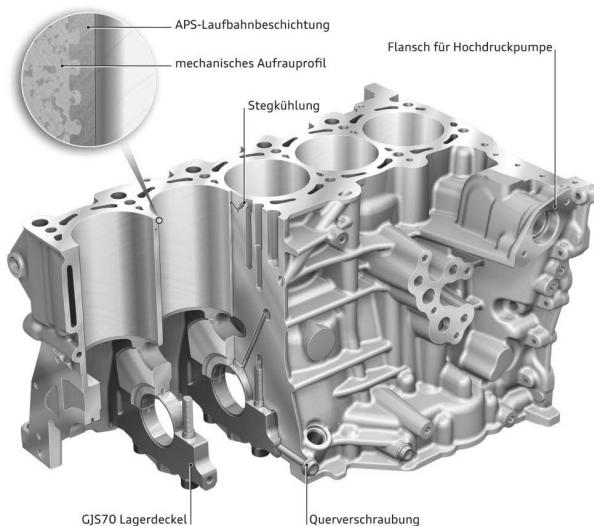


Bild 6: Zylinderkurbelgehäuse des R5 TFSI-Motors

### 3.2 Ölwanne

Ein weiterer Baustein zur Gewichtsreduzierung ist das Ölwannenoberteil. Durch die Werkstoffumstellung von Aluminium auf Magnesium können in Summe 1,9 kg eingespart werden. Das Bauteil in der Legierung MgALRE-2 wird in der hauseigenen Audi Gießerei hergestellt. Bei der Auslegung wird auf eine maximal steife Anbindung an das Zylinderkurbelgehäuse durch zusätzlich Verschraubung auf die Lagerdeckel geachtet. Gleichzeitig findet eine Optimierung des Ölhaushalts auf einen Rennstreckenbetrieb ohne den Einsatz einer Trocken-sumpfschmierung statt. Bewusst wird auf den Einsatz von Drucköl fördernden Kanälen verzichtet, um potentielle Undichtigkeiten durch Porositäten zu vermeiden. Gleichzeitig wird das Ölwannenunterteil von Stahl- auf Aluminiumblech umgestellt. Hierdurch ergibt sich eine weitere Gewichtseinsparung von 1,0 kg. Die gewichtserleichterte Ölwannenbaugruppe zeigt Abbildung 7.

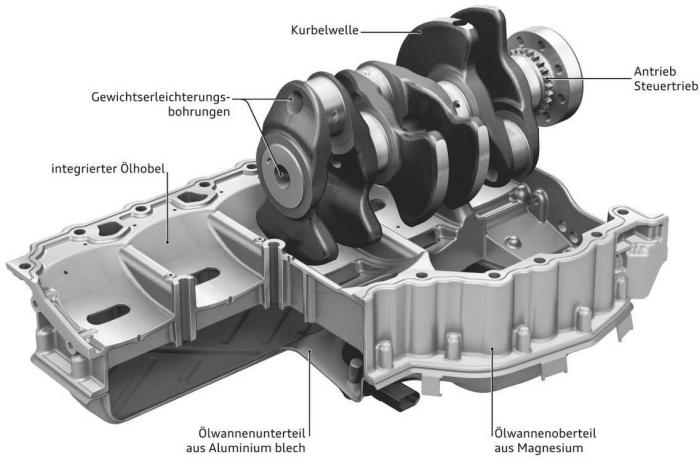


Bild 7: Ölwanneober- und unterteil des R5 TFSI-Motors

### 3.3 Kurbeltrieb und Kolbengruppe

Aufgrund der hohen Leistungskennwerte stellt der Kurbeltrieb die höchsten Ansprüche an die Festigkeit. Trotzdem konnten die Hauptlagerdurchmesser der Kurbelwelle zur Reibungsreduktion von 58 mm auf 52 mm reduziert werden. Als weitere Maßnahme zur Gewichtserleichterung werden Bohrungen in den Wangen und eine Längsbohrung eingesetzt. Die geschmiedete und vergütete Kurbelwelle aus dem Werkstoff 42CrMoS4 wurde dadurch um 1,5 kg leichter.

Aufgrund der Belastung werden in der Kolbengruppe neueste Technologien eingesetzt. Erstmals kommen in einem Ottomotor von Audi Kühlkanalkolben zum Einsatz. Hierdurch kann die maximale KolbenbodenTemperatur um bis zu 30 K gesenkt werden.

Um die Funktion der Kühlkanalkolben optimal ausnutzen zu können, werden gerichtete Kolbenkühldüsen eingesetzt. Im kleinen Pleuelauge wird auf eine verschleiß- und verformungsanfällige Buchsenlösung verzichtet. Stattdessen ist erstmals weltweit an dieser Stelle eine neuartige MoN-Beschichtung des Kolbenbolzens umgesetzt. Diese garantiert eine maximale Festigkeit bei optimalen Verschleißeigenschaften im buchsenlosen kleinen Pleuelauge.

Der Schwingungsdämpfer ist zur weiteren Gewichtsreduzierung in Aluminium ausgeführt. Das Bauteil wird im Umformverfahren hergestellt, die Dämpfung durch einen in Viskoöl

schwimmenden Stahlring gewährleistet. In Summe wird eine Einsparung von 0,7 kg realisiert, wobei das niedrige Gewicht an der Vorderseite der Kurbelwelle einen zusätzlichen positiven Effekt auf die Kurbelwellenfestigkeit hat. Abbildung 8 zeigt den Kurbeltrieb und die Kurbelgruppe des R5 TFSI.

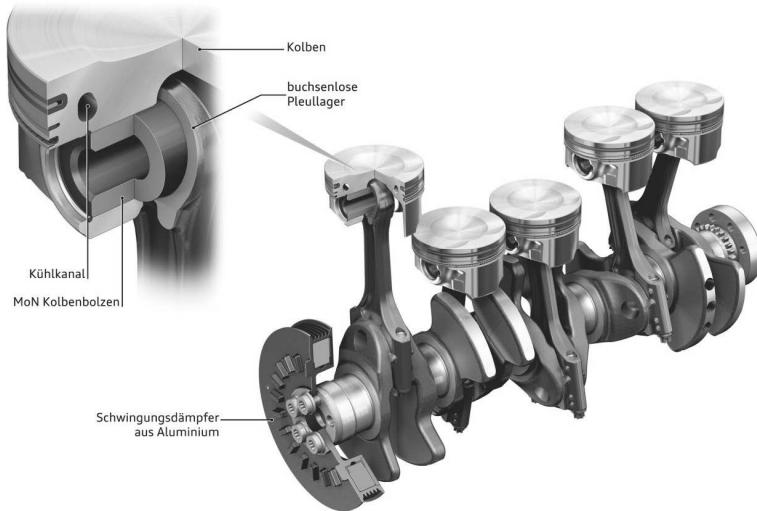


Bild 8: Kurbeltrieb und Kurbelgruppe des R5 TFSI-Motors

### 3.4 Kettentrieb

Der auf der Getriebeseite befindliche Steuertrieb ist zweistufig ausgeführt und wird mit zwei unterschiedlichen Kettentypen betrieben. In den Primärtrieb ist die ins schnelle übersetzte Ölpumpe integriert. Zur Reibungsreduzierung ist die volumenstromgeregelte Pumpe als Flügelzellenvariante ausgeführt. Über ein Zwischenrad werden beide Nockenwellen mit den hydraulischen Nockenwellenverstellern angetrieben. Beide Triebe sind mit hydraulisch gedämpften Kettenspannern ausgerüstet. Über das Zwischenrad wird die mechanische Vakuumpumpe und erstmals die Hochdruckkraftstoffpumpe angetrieben.

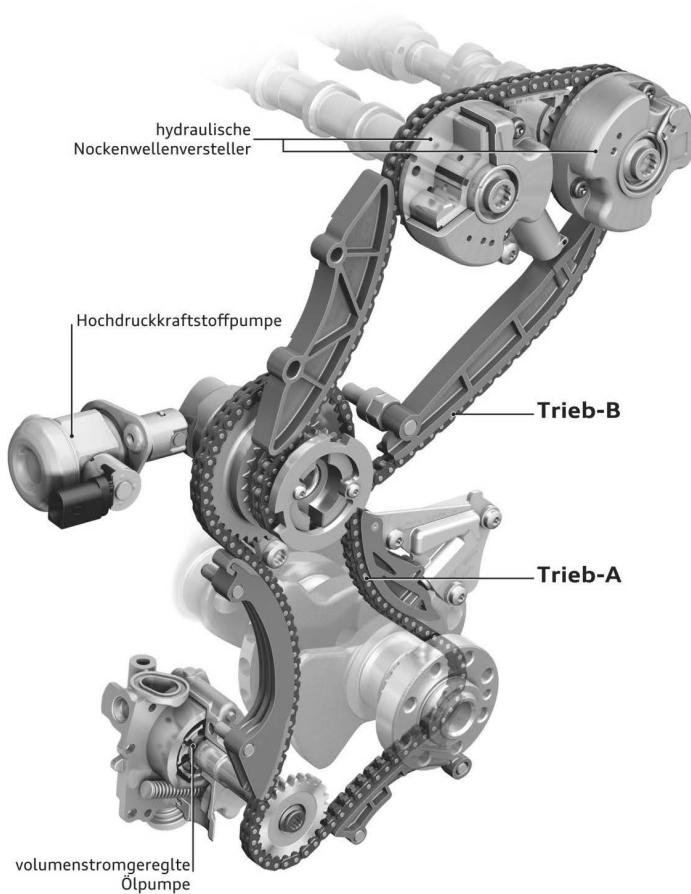


Bild 9: Kettentriebs-Layout des R5 TFSI-Motors

Die Verlegung der Kraftstoffpumpe in den Kettentrieb bringt signifikante Vorteile im Package mit kurzen Kraftstoffleitungen gegenüber der Lage am Zylinderkopf. Durch die Anbindung der Pumpe direkt an das Zylinderkurbelgehäuse wird zudem ein extrem steifer Verband generiert und damit gleichzeitig eine Vorbereitung auf zukünftige Kraftstoffdruckanstiege vorgenommen. Bei der im Primärtrieb eingesetzten Kette handelt es sich um eine 8 mm - Zahnkette. Durch den Einsatz dieser Kette konnte bei gleicher Festigkeit die Einbaulänge gegenüber dem Vorgängeraggregat reduziert werden. Im Sekundartrieb wird eine 8 mm - Rollen-

korrekt eingesetzt. Entsprechend dem neuen Layout sind alle Übersetzungen und Biegeradien der Spannschienen reibungsoptimal umgestaltet.

### 3.5 Zylinderkopf mit Audi Valvelift System (AVS)

Für den R5 TFSI der 2. Generation wird das Zylinderkopfkonzept grundlegend überarbeitet. Zur Abdichtung des Brennraumes wird aufgrund der Spitzendruckbelastung eine ultrahochfeste Zylinderkopfschraube der Festigkeitsklasse 14.9 inklusive einer fünflagigen Zylinderkopfdichtung eingesetzt. Die hohen Abgas-durchsätze erfordern eine in die Ventilfederunterlage integrierte Ventilschaftdichtung.

Die konstruktive Hauptänderung betrifft das Lagerungskonzept der Nockenwellen. Diese sind erstmals komplett in der Zylinderkopfhaube integriert. Neben der Montagefreundlichkeit kann auf diese Weise ein absolut spannungsfreier Verbau und damit ein weiterer Reibungsvorteil erzielt werden.

Am neuen R5 TFSI kommt erstmals das zweistufige Audi Valvelift System (AVS) auf der Auslassseite zum Einsatz. Gegenüber den bisherigen AVS-Anwendungen in Audi Reihen-Ottomotoren wird die Grundwelle in den Nockenwellenlagern gelagert. Die Lagerung der Nockenwellen zwischen den Zylindern garantiert eine kompakte Bauform des Systems. Die Nockenstücke werden auf geschliffenen Durchmesserabsätzen der Zahnwelle zentriert. Das zweistufige AVS-System ermöglicht die Schaltung zwischen einer Ventilöffnungsduer von 200°KW für einen moderaten Verbrauch bei Niedrig- und Teillast und 270°KW für schnelles Ansprechverhalten und hohe Leistung bei Vollast. Zur Aktuatorik werden Stelleinheiten mit Doppelstößel eingesetzt, deren Gehäuse mit einer Zweifachverschraubung an der Zylinderkopfhaube niedergespannt ist. In Verbindung mit einer tiefen und steifen Anbindung des Steckkontaktgehäuses führt dies zu einer Reduzierung der Schwingungsanregung im Kontaktierungsbereich.

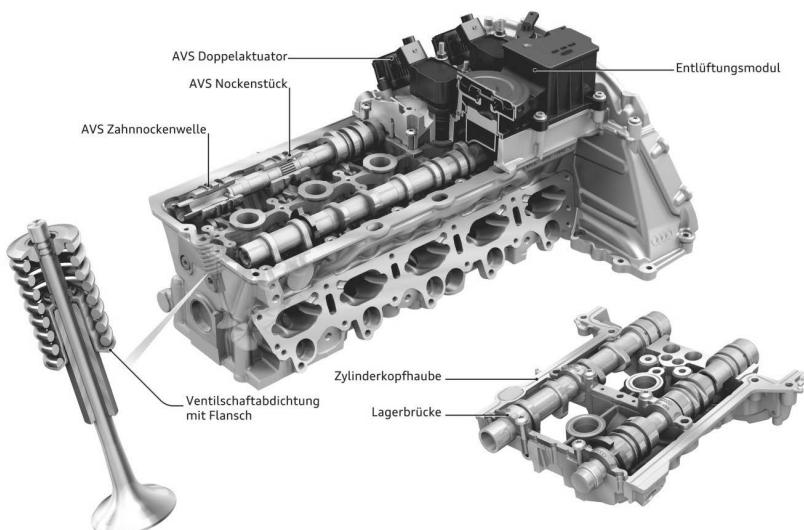


Bild 10: Zylinderkopf mit AVS System

Die Verlegung der Kraftstoffpumpe in den Kettentrieb führt am Zylinderkopf zu deutlich gesenkten Schwingwinkelanregungen im Nockenwellentreib und bewirkt damit eine Performancesteigerung der NW-Verstellzeiten.

### 3.6 Motorreibung

- Zur Reduzierung der Reibleistung werden folgende Maßnahmen umgesetzt:
- Verkleinerung HL-Durchmesser von 58 auf 52 mm
- Vormontierte NW-Lager
- Optimierung Kurbelwellenspiel und Kurbelwellenringe
- Einspuriger Riementrieb
- Thermomanagement mit Schaltbarer Wasserpumpe und Bauteiltemperatur-sensor im Zylinderkopf

Die Summe aller reibungsmindernden Maßnahmen am Grundmotor führen zu einem absoluten Reibmitteldruck von 0,54 bar bei 2000 1/min. Umgerechnet in CO<sub>2</sub> wird eine Einsparung von 2,5 g CO<sub>2</sub>/km erreicht.

## 4 Anbauteile

### 4.1 Frischluftseite

Bei der Auslegung der Ansaugstrecke stehen vor allem hohe Wirkungsgrade und das Durchsatzverhalten im Vordergrund. Bei maximalen Luftdurchsätzen von bis zu 1200 kg/h ist die Ausnutzung der maximal möglichen Querschnitte im Bauraum wie auch die möglichst kurze und direkte Führung der Luft verwirklicht.

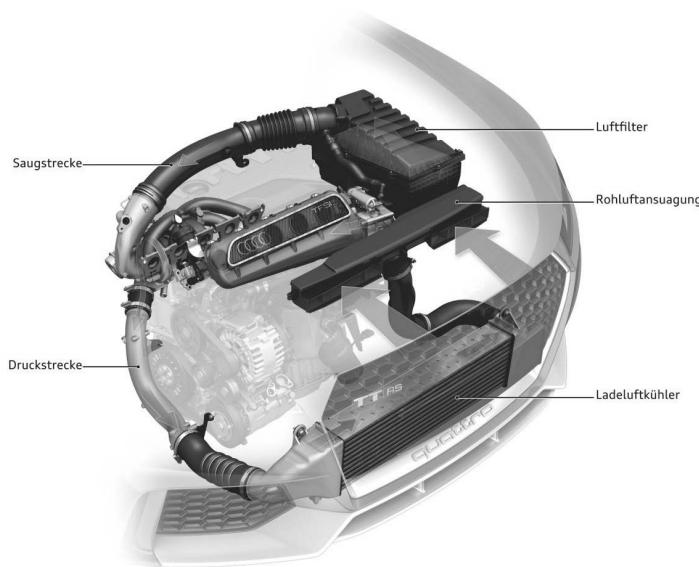


Bild 11: Gesamtansicht Ansaug- und Druckstrecke

Die Frischluftseite ist in Abbildung 11 dargestellt und umfasst folgende Baugruppen:

- Kaltluftansaugung inklusive Wasserabscheider, Anschluss an Frontend
- Luftfilter mit Pulsationsdämpfung

- Verdichteransaugstrecke mit Schubumlufteinleitung
- Verdichter
- Druckrohr vor Ladeluftkühler
- Ladeluftkühler mit Kunststoffkästen
- Druckrohr und Drosselklappenstützen mit integriertem Schubumluftventil
- Saugrohr mit Tumbleklappen-System

Neben der Optimierung dieser Einzelbaugruppen gilt es, saugseitig die günstigste Anströmung des Verdichterraumes zu erreichen. Durch die Abstimmung der Einlaufstrecke mittels CFD kann eine Strömungsführung gefunden werden, die stabile Betriebspunkte nahe der Pumpgrenze des Verdichters ermöglicht.

Der Hauptanteil der Verluste auf der Druckseite sind dem Ladeluftkühler (LLK) zuzuordnen. Da folglich das größte Optimierungspotential in der Verbesserung des LLK liegt, wird ein modifiziertes Konzept in der Audi-Querplattform umgesetzt. Der Kühler kann durch Anordnung im unteren Bereich des Frontends (siehe Abbildung 12) vollständig in den Staudruckbereich gerückt werden. Damit ist eine Maximierung des äußeren Kühlluftmassenstromes realisierbar, die Freiheitsgrade in der inneren Lamellierung ermöglicht. Trotz der somit zu erreichenden inneren Entdrosselung, welche zu einem Druckverlust der gesamten Strecke von nur 135 mbar bei maximalem Durchsatz führt, können Kühlungswirkungsgrade > 80 % in der Vollast realisiert werden.

Das Saugrohr ist Stückzahl-optimal als zweiteiliges Sandgusssteil, bestehend aus der Saugarmgalerie und dem Luftsammler, ausgeführt. Die in der Saugarmgalerie integrierte, pneumatisch schaltbare Klappenanlage ermöglicht, in Verbindung mit dem Tumble-Einlasskanal, die notwendige Ladungsbewegung für eine optimale Gemischhomogenisierung. Das System baut auf der Konstruktion des Vorgängermotors auf und wird bezüglich der Aufladefähigkeit überarbeitet und optimiert. Abbildung 12 zeigt das vollständige Saugrohr.

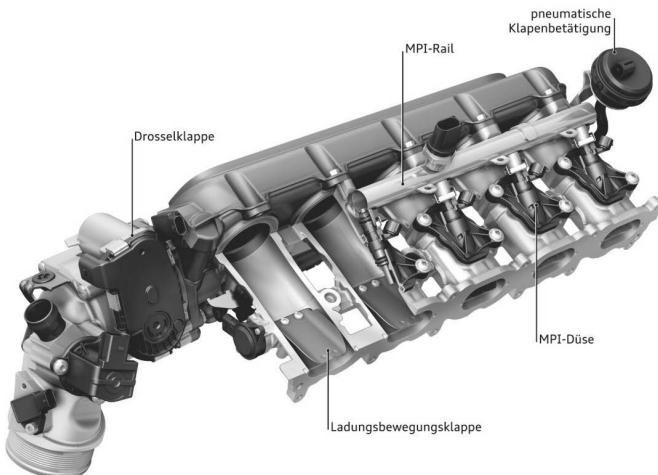


Bild 12: Saugrohr mit Tumble-Klappen und MPI-Düsen

Der Luftsammler bildet in Verbindung mit der Zylinderkopfhaube und der kleinen Motorabdeckung das zentrale Teil des Motorraumdesigns, welches auch bei diesem Audi RS Modell Technik offen zeigt.

#### 4.2 Abgasseite

Die Abgasseite besteht aus den Baugruppen:

- Krümmer-ATL-Modul
- motornaher Vorkatalysator
- zweiflutiges Vorrohr mit Entkoppelungselementen
- optionale Unterbodenkatalysatoren mit nachfolgenden Mittelschalldämpfern
- Endschalldämpfer mit zwei Endrohren

Bei der Konzeption des zentralen Bauteils der Abgasseite, dem Krümmer-ATL-Modul, sollen sich die Erfahrungen des bei Audi seit dem Jahre 2009 in Serie befindlichen Fünfzylinder TFSI Motoren wiederfinden. Die Drehrichtung der Läufergruppe wird deshalb umgekehrt.

Nach mehreren strömungs- und ladungswechselseitigen Optimierungen wird die Einbindung des „zusätzlichen“ Zylinders wie in Abbildung 13 ersichtlich als „separate Einleitung“ umgesetzt.

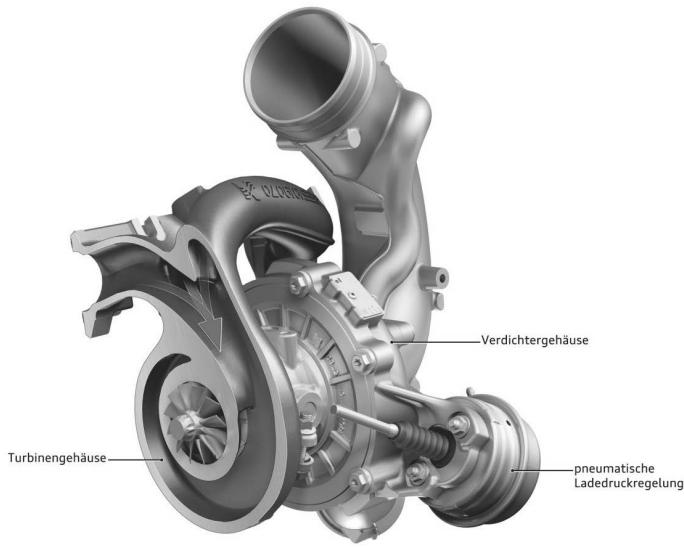


Bild 13: Turboladermodul

Die eigentliche Turboladerbaugruppe, Verdichter und Turbine können auf hohe Wirkungsgrade über einen weiten Betriebsbereich entwickelt werden. Das wasser-gekühlte und extern ölvorsorgte Lagergehäuse wird nach Motorstopp durch eine Zusatzwasserpumpe vor zu hohen Temperaturen geschützt. Die Einhaltung der maximal zulässigen Abgastemperatur von 1000 °C wird durch eine modellgestützte Abgastemperaturregelung unter allen Betriebsbedingungen sichergestellt. Das in Stahlguss der Qualität 1.4849 hergestellte Krümmer-ATL-Modul ist mit der bei Audi erprobten Klemmflanschtechnik am Zylinderkopf befestigt. Diese und die abstützungsfreie Konstruktion des ATL-Moduls ermöglichen es, im Betrieb auftretende thermische Ausdehnungen zu kompensieren, so dass die Einleitung von Zwangskräften auf ein Minimum reduziert werden kann. Für das sichere Erreichen der EU 6 Abgasnorm ist die Positionierung des Kats möglichst nahe am Turbinenaustritt notwendig. Das Volumen des Katkörpers kann dabei gegenüber dem Vorgänger auf über das Doppelte vergrößert werden.

### 4.3 Kraftstoffsystem

Für die bedarfsgerechte Bereitstellung des Kraftstoffs, wird ein Konzept aus Hochdruckdirekteinspritzung und Saugrohreinspritzung adaptiert. Der Kraftstoff für die Hochdruckseite wird durch eine bedarfsgeregelte Einkolben-Hochdruckpumpe bereitgestellt. Diese HDP wird über einen Dreifachnocken auf der Zwischenwelle des Kettentriebs betätigt. Die Einspritzparameter Kraftstoffaufteilung, Anzahl der Ein-spritzungen, Einspritzbeginn und Kraftstoffhochdruck sind über das Motorsteuergerät frei parametrierbar. Der maximale Systemdruck wird auf 250 bar angehoben.

## 5 Thermodynamik

### 5.1 Brennverfahren

Das vorgegebene Ziel einer Anhebung der Literleistung auf über 115kW/l mit möglichst breit nutzbaren Drehzahlband auf hohem Mitteldruckniveau stellt höchste Anforderungen an das Brennverfahren.

Die Basis für die Brennverfahrensentwicklung war der Audi 2,0l TFSI-Motor der aktuellsten Generation. Eine optimale Gemischaufbereitung wird durch ein kombiniertes FSI/MPI-Einspritzsystem erreicht. Es ist eine Kraftstoffdirekteinspritzung (FSI) mit bis zu 250 bar Kraftstoffdruck und eine Multipoint-Einspritzung (MPI) im Ansaugtrakt nahe den Einlassventilen realisiert. Der hohe Freiheitsgrad bei der Wahl der Einspritzparameter in Kombination mit einer saugseitigen Ladungsbewegungsklappe ermöglicht die notwendige Absenkung der Partikelemissionen für zukünftige Emissionsgrenzwerte. Aufgrund des hochentwickelten Einspritzsystems sind keine weiteren innermotorischen Ladungsbewegungsmaßnahmen zur Verbesserung der Gemischaufbereitung notwendig. Der Kolben weist einen flachen Kolbenboden auf und bildet damit die Grundlage zur Erreichung der hohen Literleistung.

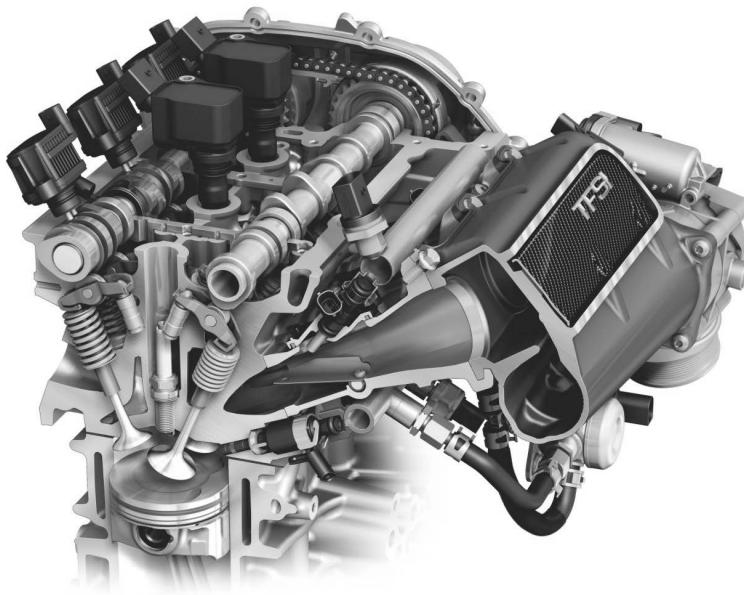


Bild 14: Darstellung Brennverfahren

## 5.2 Leistung / Drehmoment - Entwicklung

Obwohl der etablierte Audi 2,5l R5 TFSI-Motor mit einem Mitteldruckniveau von 23,5 bar bereits eine Bestmarke im direkten Wettbewerbsumfeld darstellt, wird als Zielwert für die Weiterentwicklung eine Erhöhung auf 24,3 bar angestrebt. Hierzu sind umfangreiche Überarbeitungen der leistungsbestimmenden Systeme notwendig. Grundvoraussetzung für ein breites nutzbares Drehzahlband auf hohem Mitteldruckniveau und das Erreichen von hohen Spitzenleistungen ist eine konsequente Entdrosselung der luft- und abgasführenden Bauteile. Außerdem ist eine umfangreiche Abstimmung der Einzelsysteme bei gleichzeitiger Be trachtung der Auswirkungen auf die Systeme untereinander notwendig. Durch sorgfältige Detailarbeit können die einzelnen Drehzahlbereiche optimal abgestimmt werden.

Im unteren Drehzahlbereich ermöglicht die FSI-Einspritzung eine Trennung von Ladungs wechsel und Gemischaufbereitung. In Verbindung mit der Phasen-verstellung von Ein- und Auslassnockenwelle sowie der auslassseitigen Eventlängen-Anpassung durch das AVS System kann eine starke Restgasminimierung erreicht werden. In diesem Zusammenhang stellt

die Erweiterung des Phasenverstellbereichs der Einlassnockenwelle von 42°KW auf 50°KW eine nicht unerhebliche Verbesserung dar.

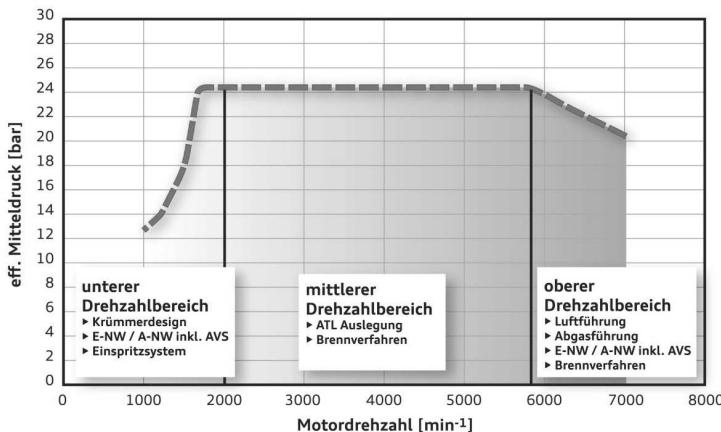


Bild 15: Mitteldruckentwicklung mit AVS

Die angestrebte Beibehaltung von hohen Füllungsgraden im unteren Drehzahl-bereich setzen die Generierung von ausreichend Turbinenleistung trotz vergrößertem Turbinenradius durchmesser bei geringen Abgasmassenströmen voraus. Eine optimierte Nutzung der Auslasspulsationen auf das Turbinenrad wird durch Überarbeiten des Abgaskrümmerdesigns hinsichtlich Druckverlust und durch die Drehrichtungsumkehr der Läufergruppe erreicht. Der geringe Restgasanteil, eine gute Gemisch-homogenisierung, eine verbesserte Wärmeabfuhr aus dem Brennraum und die damit geringe Klopfneigung erlauben die Beibehaltung einer für diesen Aufladegrad sehr hohen Verdichtung von Epsilon 10 (ROZ 98 Auslegung).

Die hohe Verdichtung in Verbindung mit effektiver, fahrzeugseitiger Ladeluftkühlung, die optimalen ATL-Anströmbedingungen und die geringe Massenträgheit des ATL sorgen für höchste Mitteldrücke und spontanes Ansprechverhalten im niedrigen Drehzahlbereich.

Die optimale Abstimmung von Turbine und Verdichter bestimmen den Gesamt-wirkungsgrad des Abgasturboladers. Das effiziente Brennverfahren mit der hohen Grundverdichtung in Verbindung mit einem auf höchste Wirkungsgrade im mittleren Drehzahlbereich abgestimmten Abgasturbolader ermöglichen das Halten des hohen Mitteldruckniveaus mit sehr guten thermodynamischen Kennwerten im gesamten mittleren Drehzahlbereich.

Auf den oberen Drehzahlbereich dieses Hochleistungsmotors ist das gesamte System hinsichtlich der maximalen Durchsätze optimiert. Hierbei ist die sorgfältig aufeinander abge-

stimmte und druckverlustoptimierte Saug-, Druck- und Abgasstrecke ausschlaggebend. Das Brennverfahren mit flachem Kolbenboden minimiert in diesem Drehzahlbereich die luftseitigen, innermotorischen Verluste, während eine anteilige MPI-Kraftstoffeinspritzung die Bereitstellung der maximalen Kraftstoffmenge für eine maximale Leistung von 294 kW sichert und die Klopfnigung des Motors senkt.

### 5.3 Abgasentwicklung

Die Zielvorgabe der Einhaltung der Abgasgrenzwerte nach EU 6 und einer Verbesserung der Verbrauchswerte zum Vorgänger ist über die beschriebenen Baugruppen und Maßnahmen:

- Kombiniertes FSI/MPI-Einspritzsystem
- Tumbleklappen- Saugrohr
- Audi-Valvelift-System (AVS)
- Intelligentes Thermomanagement (ITM)
- motornaher Vorkat
- signifikante Gewichtsreduzierung
- Reduzierung der Reibleistung

zusammen mit entsprechender Parameteroptimierung erreicht.

### 5.4 Ergebnis/ Vergleich

Durch den Einsatz des kombinierten FSI/MPI Einspritzsystems in Verbindung mit intelligentem Thermomanagement und dem Audi Valvelift System kann mithilfe einer Neuauslegung des Abgasturboladers eine Steigerung der maximalen Leistung von 265 kW auf nun 294 kW von 5850 bis 7000 1/min erreicht werden. Trotz einer Drehmomentanhebung von 465 Nm auf 480 Nm wird das breite Drehzahlband maximalen Moments mit 1700 bis 5800 1/min sogar erweitert. Die enorme Effizienzsteigerung des Aggregats kann nicht nur am umgesetzten Performancegewinn, sondern auch an der erreichten Kraftstoffverbrauchseinsparung abgelesen werden. Abbildung 16 zeigt das Vollastdiagramm des neuen Fünfzylindermotors im Vergleich zum Vorgängeraggregat.

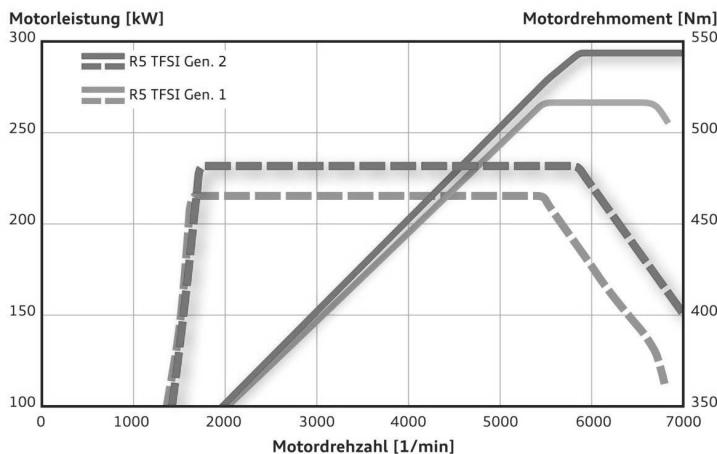


Bild 16: Drehmoment- und Leistungsverlauf im Vergleich zum Vorgängermotor

## 6 Fahrerlebnis/ Fahrleistungen/ Verbrauch

Die dargestellte Drehmoment- und Leistungssteigerung des Fünfzylindermotors ermöglicht im neuen Audi TT RS Coupé in Verbindung mit einem 7-Gang Doppelkupplungsgetriebe eine Verbesserung der Fahrleistungen bis in Regionen von Super-Sportwagen der aktuellen Generation (Tabelle 2).

Tabelle 2: Fahrleistung und Verbrauch

		Audi TT RS Coupé Vorgänger 265 kW / 465Nm	Audi TT RS Coupé Neue Generation 294 kW / 480 Nm
Anfahrtbeschleunigung	0-100 km/h	4,1 s	3,7 s
	0-200 km/h	15,1 s	13,3 s
Kraftstoffverbrauch	NEFZ insg.	8,5 l/100 km	8,2 - 8,4 l/100 km
CO <sub>2</sub>	NEFZ insg.	197 g/km	187 - 192 g/km

Trotz dieser beeindruckenden Beschleunigungsperformance ist auch eine ökonomische Fahrweise möglich. Der ECE-Verbrauch im TT RS Coupé liegt mit 8,2- 8,4 l/100 km auf sehr

niedrigem Niveau. Im Alltagsbetrieb ist bei moderater Fahrweise ein Verbrauch unter 8 l /100 km möglich.

Zum besonderen Fahrerlebnis trägt die speziell abgestimmte Motorakustik bei. Über einen Vorwahltafel kann im neuen Audi TT RS zwischen sportlichem und komfortablem Motorsound ausgewählt werden. Im Sportmodus ist vor allem bei Vollastbeschleunigung der fünfzylindertypische Sound über die Ansaug- und Abgasanlage angenehm präsent. Bei Konstantfahrt und mäßiger Beschleunigung kann angenehme, zurückhaltende Motorakustik vor gewählt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem weiterentwickelten 2,5l R5-TFSI Motor setzt Audi einen weiteren Meilenstein in der traditionsträchtigen Geschichte der 5 Zylinder-Turbomotoren. Das in einem Gemeinschaftsprojekt der AUDI AG mit der quattro GmbH entwickelte Aggregat stellt abermals im gesamten A-Segment aller Hersteller die absolute Spitzenmotorisierung dar.

Durch die konsequente Umsetzung von Leichtbaupotenzialen verbunden mit reibungsreduzierenden Maßnahmen, sowie dem Einsatz modernster Auflade- und Einspritztechnologie ist ein Hochleistungsaggregat mit Fahrleistungen und Fahrspaß auf Super-Sportwagenniveau bei niedrigstem Verbrauch bzw. CO<sub>2</sub> - Ausstoß entstanden.

Der neue 2,5l R5-TFSI Motor stellt die erste Ausbaustufe einer neuen Generation von quer eingebauten Hochleistungsmotoren im RS-Segment dar.

## 8 Literatur

- [1] Dipl.-Ing. A. Pelzer, Dr.-Ing. G. Mendl, Dr.-Ing. S. Dengler, Audi AG, Ingolstadt; Dipl.-Ing. M. Füssel, Dipl.-Ing. M. Ganz, quattro GmbH, Neckarsulm;  
The New Audi 2.5l TFSI Five Cylinder Engine For The New Audi TT RS – A Light-weight Design High Performance Engine  
25. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2016
- [2] Dr.-Ing. J. Böhme, Dipl.-Ing. H. Müller, Audi AG, Ingolstadt;  
Dipl.-Ing. M. Ganz, Dipl.-Ing. M. Marques, quattro GmbH, Neckarsulm;  
Der neue 2,5-Liter-TFSI-Fünfzylinder-Motor für den Audi TT RS  
30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009
- [3] Dr.-Ing. J. Böhme, Dipl.-Ing. H. Müller, Audi AG, Ingolstadt;  
Dipl.-Ing. M. Ganz, Dipl.-Ing. M. Marques, quattro GmbH, Neckarsulm  
Der neue R5 TFSI von Audi im TT RS - eine aufladetechnische Herausforderung  
14. Aufladetechnische Konferenz in Dresden 2009
- [4] Dr.-Ing. Th. Heiduk, Dipl.-Ing. R. Dornhöfer, Dipl.-Ing. A. Eiser, Dr.-Ing. M. Grigo,  
Dipl.-Ing. A. Pelzer, Dr.-Ing. R. Wurms, Audi AG, Ingolstadt  
Die neue Motorengeneration des R4 TFSI von Audi  
32. Internationales Wiener Motorensymposium 2011
- [5] Dipl.-Ing. F. Eichler, Dr. W. Demmelbauer-Ebner, Dr. J. Theobald, Dr. B. Stiebels, Dr.  
H. Hoffmeyer, Dipl.-Ing. (FH) M. Kreft, Volkswagen AG  
Der neue EA211 TSI®evo von Volkswagen  
37. Internationales Wiener Motorensymposium 2016



# Leichtbau-Potenzial von Kurbelwellen durch den Einsatz hohl-gegossener Konstruktionen

## Lightweight potential of crankshafts using cast iron hollow design

Dipl.-Ing. **Ilias Papadimitriou**,

Georg Fischer Automotive AG , Schaffhausen;

Ing. **Kurt Track**, Georg Fischer Eisenguss GmbH, Herzogenburg

### Kurzfassung

Der Entwicklungsschwerpunkt beim Verbrennungsmotor liegt in der Reduktion von Abgasemissionen, der Steigerung der Effizienz und im Leichtbau. Dabei bietet gerade die Kurbelwelle, die 12 % des Motorengewichts ausmacht, ein hohes Leichtbaupotential. Diese Studie zeigt das Potential für eine 4-Zylinder 1.6 l Diesel Kurbelwelle und fokussiert sich damit mit auf hochbelastete Motoren.

Dabei wird der Entwicklungsprozess einer hohl-gegossenen Kurbelwelle aus hochfestem Gusseisen mit Hilfe der Multibody- und Erstarrungssimulation dargestellt. Dabei wird besonders auf die Auslegung des kugelgeformten Hohlraums, der Werkstoffcharakterisierung und der Verfestigung von Übergangsradien geachtet.

Von einer geschmiedeten Kurbelwelle von 12 [kg] zu einer hohlgegossenen Kurbelwelle 9.37 [kg] zeigt die Studie ein Leichtbaupotential von 2.63 [kg]. Diese Gewichtsreduktion war nur durch die Optimierung des gesamten Entwicklungsprozesses möglich, wobei alle wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Serienproduktion beachtet wurden.

### Abstract

The main focus of engine development is on emission reduction, increase of efficiency and lightweight potential of components. The crankshaft is one of the engine components with high lightweight potential. This study shows the potential of lightweight for 4-cylinder 1.6 l diesel crankshafts. The paper describes the development process for a hollow crankshaft from high strength ductile cast iron alloy using the multibody dynamic and solidification simulation approach. This study focused on the design of hollow area, the characterization of a new cast iron alloy and the fillets hardening using the cold rolling process.

The use of an advance casting technique, taken into account the economic aspects of a mass production was led from original crankshaft design of 12 [kg] to a new design of 9.37 [kg]. The weight reduction is a result of the over-all optimization of development process.

## 1. Einführung und Motivation

Verbrennungsmotoren sind nicht nur Teil der konventionellen Antriebe, sondern fester Bestandteil des Antriebs von Hybrid-Fahrzeugen oder Plug-in-Hybriden. Um die Umweltfreundlichkeit, Effizienz und Kraftstoffverbrauch zu optimieren, werden weiterhin Innovationen und Weiterentwicklung bei Verbrennungskraftmotoren nötig sein. Darüber hinaus besteht noch Optimierungspotential in Bereich Verbrennung, Reibung, Abgas Nachbehandlung und Leichtbau.

Der Trend zu Leichtbau im Motor wird sich auch in der Zukunft weiter verstärken. Insbesondere für Hybrid-Antriebe wird aufgrund des Zusatzgewichts von Elektroantrieb und Batterie die Gewichtsreduktion ein wichtiger Aspekt sein. Dieser Trend ist an verschiedenen Motorkomponenten bereits zu erkennen: Beispielsweise bei Zylinderkurbelgehäusen mit der Substitution von eisenbasierten Legierungen durch Aluminiumlegierungen. Das Gewicht des Zylinderkurbelgehäuses eines 1.6l 4-Zylinder PKW Serienmotors aus Aluminiumlegierungen liegt in Bereich von 16-24 [kg] während er aus Eisenlegierungen im Bereich von 26-47 [kg] [2] liegt. Im Zylinderkopf wird durch die dünnwandige Ausführung, die Kühlkanäle, der warmfesten Aluminiumlegierung und einer geeigneten Nachbehandlung seit Jahren Leichtbau konsequent verfolgt.

In der Kurbelwelle liegt das Leichtbaupotential bei der Gestaltung der Gegengewichte, wo bisher durch den massiven Einfluss des Ausgleichgrads schnell die Grenzen erreicht werden. Ein Zusatzpotential liegt bei der Gestaltung von Hohlräumen im Pleuel- und Hauptlager, die keinen Einfluss auf den Ausgleichsgrad haben. Die Gestaltung von Hohlräumen in der Kurbelwelle ist seit Jahren Stand der Technik in F1-Motoren aber begrenzt eingesetzt in PKW Serienmotoren, aufgrund des hohen Bearbeitungsaufwands. Möglich ist die Nutzung dieses Leichtbaupotentials durch eine Hohl-Konstruktion mit dem Einsatz von hochfesten Gusseisen und optimierter Oberflächen-Verfestigung. Dabei ist die Wirtschaftlichkeit aufgrund der geringeren Werkstoff- und Prozesskosten von gegossenen Kurbelwellen für den Einsatz in der Serie gegeben und kann gegenüber Schmiedekonstruktionen sogar Kostenersparnisse bringen [1].

Dieses Potential zeigt sich deutlich in diese Studie für einen 1.6l 4-Zylinder Diesel Motor mit einer Gewichtsreduktion von 20%.

## 2. Entwicklungsmethode

Für die Entwicklung der Leichtbau-Kurbelwelle wurde ein hochbelasteter Dieselmotor als Basis ausgewählt. Die allgemeinen Motordaten werden in **Abbildung 1** dargestellt.

Zylinderanzahl	4
Hub/Bohrung [mm]	88.3 / 75
Leistung [PS]	112
max. Drehmoment [Nm]	270
Motorgewicht [kg]	105
max. Zylinderdruck [bar]	160
Kurbelwelle Gewicht [kg]	12
Kurbelwelle Werkstoff	38MnSV5

Bild 1: Allgemeine Motordaten

Die Kurbelwelle trägt mit 12 [kg], ca. 12% des gesamten Motorgewichts. In **Abbildung 2** wird die Gewichtsverteilung von Basis-Motor dargestellt.

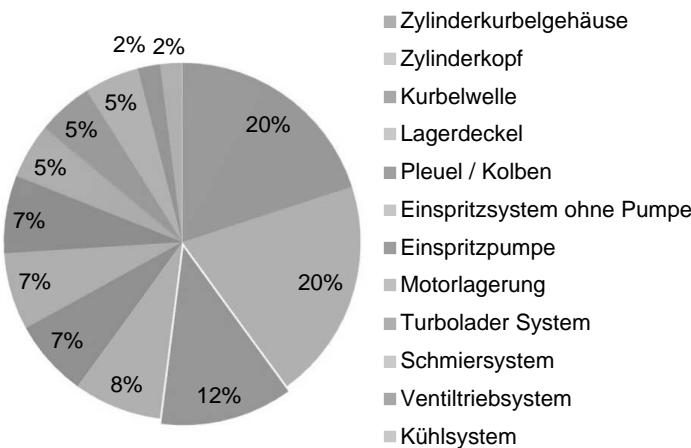


Bild 2: Gewichtsverteilung 1.6l Dieselmotor

Die Entwicklung wurde in folgenden Schritten durchgeführt:  
Konstruktion, Füllung & Erstarrungssimulation, Multibody-Simulation, Lebensdauer-Analyse, Herstellung Prototypen, Bauteilprüfung.

### 3. Konstruktion

Die Zielfunktion bei der Konstruktion einer hohlgegossenen Kurbelwelle ist die Volumenmaximierung des Hohlraums. Dabei sind zwei Bedingungen zu erfüllen: Herstellbarkeit des Kerns und minimale Wandstärke. In **Abbildung 3** wird das CAD-Modell der Kurbelwelle dargestellt.

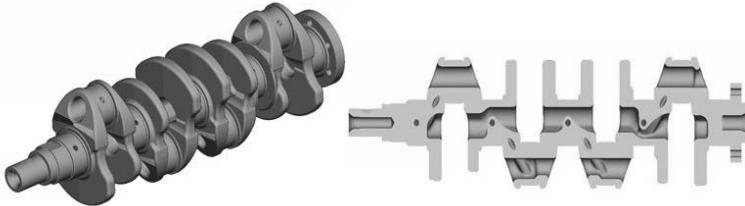


Bild 3: Konstruktion einer hohl-gegossen Kurbelwelle

#### 3.1 Kern

Der Kern wird im Cold-Box-Verfahren hergestellt. *Cold-Box* ist ein verbreitetes Kern- Herstellungsverfahren, das komplexe Kerngeometrie mit hoher Produktivität abbilden kann. Die Aufbereitung des Formstoffes erfolgt in kontinuierlich arbeitenden Durchlauf-oder Chargenmischern. Der Kernsand wird mit einem Binder und einem Härter vermischt und dann kalt ausgehärtet. Gängige Formgrundstoffe sind Quarzsand, Zirkonsand oder Chromitsande. Diese können problemlos verfestigt werden, solange keine alkalischen Bestandteile, vor allem basische Metalloxide im Sand vorhanden sind. Die Sandtemperaturen sollten 30 °C nicht übersteigen. Die Grenze der Verarbeitungszeit liegt bei zwei Stunden. Der Sandkern wird in der Kernschiessmaschine mit hoher Geschwindigkeit, welche durch eine schlagartige Expansion eines begrenzten Druckluftvolumens entsteht, in den Kernkasten eingeschossen. Die Kernkästen (Englisch: cold box) bilden die Kerngeometrie ab und sind so konstruiert, dass die Entlüftungsquerschnitte (Schlitzdüsen) 3 bis 5% der Kernkastenoberfläche belegen. Bei der Kernherstellung muss auf die Wandstärke des Kerns besonderes geachtet werden: Kleine Wandstärken führen oft zu Kernbruch, sowohl bei der Kernherstellung, als auch beim Giessen. Stark inhomogene Wandstärken könnten zu unterschiedlichem Abkühlverhalten

führen. Da das Abkühlverhalten einen direkten Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften hat, ist es wichtig bei der Kernkonstruktion Wandstärkenunterschiede zu vermeiden.

Als Kernwandstärke wird 6 [mm] empfohlen.

Die Erfahrungswerte aus der Kerntechnik wurden in dieser Studie in der Anfangsphase der Konstruktion berücksichtigt, um weitere Optimierungs-Schleifen zu reduzieren. In **Abbildung 4** wird der 4-teilige Sandkern dargestellt.



Bild 4: Sandkern 4-teilig

### 3.2 Wandstärke der Kurbelwelle

Um die Dauerfestigkeit in der Oberfläche des Hohlräums gewährleisten zu können, ist es erforderlich die minimale Wandstärke der Kurbelwelle oberhalb eines kritischen Wertes zu konstruieren. In Bereich der Übergangsradien ist die Wandstärke am kritischsten und die Dauerfestigkeit hängt stark vom Verfestigungsparameter ab. Die Wandstärke muss mindestens so gross sein, um den Aufbau der Eigenspannungen zu gewährleisten.

Es wird eine minimale Wandstärke von 10 [mm] empfohlen.

### 3.3 Oberfläche Verfestigung - Festwalzen

Ziel der Verfestigung ist es lokale Eigenspannungen unterhalb der Oberfläche anzubringen und dadurch den Anriß- als auch die Bruchlebensdauer massiv zu erhöhen [3]. Die Eigenspannungen - im allgemeisten Sinne - sind Spannungen in einem abgeschlossenen System, auf die keine äusseren Kräfte und Momente einwirken. Die mit den Eigenspannungen verbundenen inneren Kräfte und Momente befinden sich im mechanischen Gleichgewicht. Die Ursachen dafür können werkstoffbedingt, fertigungsbedingt oder beanspruchungsbedingt sein.

Bei dem Festwalzverfahren werden durch plastische Verformung der oberflächennahen Schicht dreidimensionale, Druckeigenspannungen in die Hohlkehlen der Kurbelwellen eingebracht, die zur Erhöhung der Dauerschwingfestigkeit der Kurbelwellen und somit zu einer signifikanten Lebensdauersteigerung führen. Insbesondere bei Kurbelwellen in Grossserie kann die Festigkeit durch Festwalzen wirtschaftlich und zuverlässig erhöht werden.

Das Prinzip des Festwalzprozesses wird in **Abbildung 5** schematisch dargestellt. Die Maschinenkraft  $FG$  wird über zwei Werkzeuge auf die beiden Übergangsradien eingeleitet. Um eine Vergleichbarkeit zwischen Kraft-, Radius- und Werkstoff-Kombinationen darstellen zu können, wird die spezifische Walzkraft  $FS$  eingeführt.

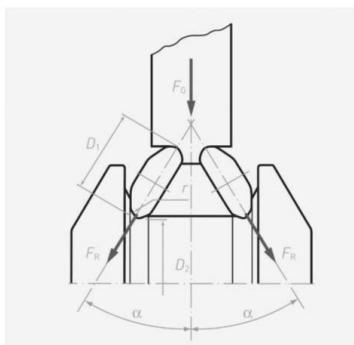


Bild 5: Schematische Darstellung Festwalzen

FG Gerätekraft, FR Rollenkraft, D1 Rollendurchmesser, D2 Werkstückdurchmesser, r Rollenradius,  $\alpha$  Rollenanstellwinkel

$$FR = \frac{FG}{2 \cdot \cos(\alpha)} \quad FS = \frac{FR}{r}$$

Die Verteilung der Eigenspannungen infolge des Festwalzprozesses für eine  $FS = 5.3$  [kN/mm] wird in Abbildung 6 dargestellt [3]. Die Auswertung wird durch ein lokales zylindrisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Kerbgrund des festgewalzten Kerbradius dargestellt. Die Verteilung der radialen ( $r$ -Richtung) Eigenspannungen zeigt ein Druckeigenspannungsfeld unter der Oberfläche in Verlängerung der Wirkrichtung der Rollenkraft FR. Da die Oberfläche nach dem Festwalzen unbelastet ist, sind die radialen Eigenspannungen direkt an der Oberfläche nahezu null. Die Verteilung der tangentialen ( $\phi$ -Richtung) Eigenspannungen weist unterhalb der Oberfläche ein ausgeprägtes Druckeigenspannungsmaximum auf. Ausgehend von der Oberfläche steigen die Druckeigenspannungen in Tiefenrichtung bis zu einem Maximalwert an, in größeren Tiefen fallen sie ab und gehen in Zugeigenspannun-

gen über. Die Druckeigenspannungen in Umfangsrichtung  $\Theta$  sind nahe der Oberfläche maximal und sinken in Tiefenrichtung kontinuierlich ab.

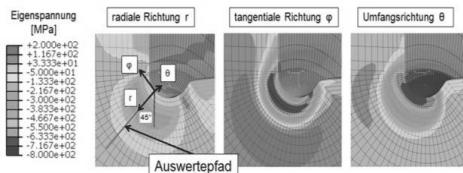


Bild 6: Eigenspannungsverteilungen in lokalen Koordinaten [2]

Die Tiefenverläufe der Eigenspannungen in den drei lokalen Koordinatenrichtungen entlang des Auswertepfads unter  $45^\circ$  wird in **Abbildung 7** dargestellt. Die tangentielle Komponente der Eigenspannungen besitzt einen maßgeblichen Einfluss auf die Bildung von Anrisse im festgewalzten Kerbbereich.

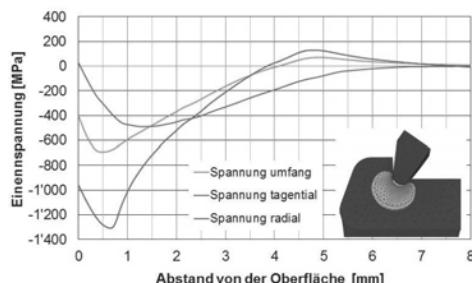


Bild 7: Eigenspannungstiefenverläufe

Die Übergangsradien wurden von Fa. Hegendscheidt MFD festgewalzt.

#### 4. Formfüllung – und Erstarrungssimulation

Das Ziel der Formfüll- und Erstarrungssimulation ist das Strömungsprofil, die Strömungsgeschwindigkeiten und die Temperaturen der Schmelze im Formhohlraum zu simulieren. Anhand dieser Ergebnisse werden lokale Strömungsgeschwindigkeiten, Verwirbelungen, Gasporositäten und deren Ursachen erkannt um bei Bedarf durch giesstechnische Massnahmen verringert zu werden. Die Auswertung der Simulationsergebnisse, im Hinblick auf die Temperaturen der Schmelze während der Formfüllung, lässt eine Beurteilung des Risikos von Kaltfließstellen zu. Aus der Charakteristik der Formfüllung lassen sich die am besten

geeigneten Positionen von Überläufen und Entlüftungskanälen bestimmen. Als erster Ansatz für die Simulation werden zunächst die Positionen der Anschnitte, die Dimension der Gießkammer und die wesentlichen Gießparameter bestimmt.

Der physikalische Prozess des Gießverfahrens wird durch die Kontinuitätsgleichung und Navier-Stokes-Gleichungen für die dreidimensionale Einphasenströmung des flüssigen Metalls und die Funktion des Volumenanteils beschrieben:

### Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

$u_x, u_y, u_z$  ... Projektionen der Strömungsgeschwindigkeit  $\vec{u}$  auf die Koordinatenachsen x, y, z

### Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{F_x}{\rho} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{F_y}{\rho} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{F_z}{\rho} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right)$$

$t$  ... Zeit  $p$  ... Druck  $\rho$  ... Dichte  $\nu$  ... kinematische Viskosität  $F$  ... äusseren Kräfte

Die Navier-Stokes-Gleichungen (2.2) beschreiben die Strömung von newtonischen Flüssigkeiten und Gasen. Die Gleichungen sind eine Erweiterung der Euler-Gleichungen um die innere Reibung oder Viskosität. Für die Formfüllungs- und Erstarrungssimulation wird die Navier-Stokes-Gleichung für inkompressible Fluide eingesetzt.

Die freie Oberfläche zwischen dem flüssigen Metall und dem Gas im Formhohlraum wird durch die Volumenfunktion der partiellen Differentialgleichung definiert:

### Volumenfunktion der partiellen Differentialgleichung

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial f}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial f}{\partial z} = 0$$

$$f = f(x, y, z, t)$$

Die Funktion  $f$  gibt den Volumenanteil des flüssigen Metalls in jeder Berechnungszelle an und wird aus dem Quotienten des Metallvolumens und des Zellvolumens berechnet.

Die homogene Erstarrung und Abkühlung ist eine der zentralen Auslegungskriterien der Gießtechnik. Dabei wird besonders auf die letzte Phase der Erstarrungssimulation geachtet. Um die erforderliche Werkstoff-Qualität zu erreichen, sollte die letzte Erstarrungsphase im Anguss-Bereich stattfinden. Dies stellt eine Herausforderung in der Auslegung des Angussystems dar.

In der **Abbildung 8** wird der zeitliche Ablauf der Erstarrung dargestellt.

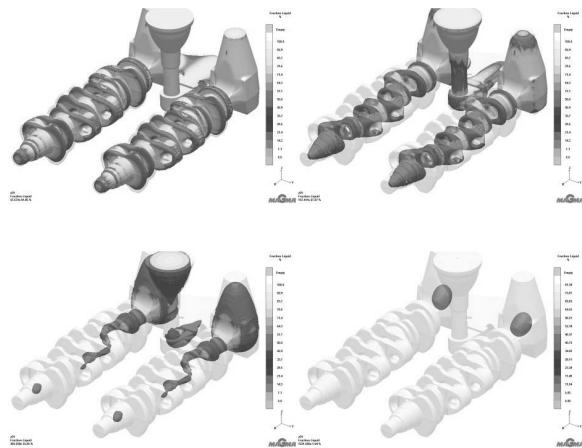


Bild 8: Erstarrungssimulation – zeitlicher Ablauf

## 5. Simulation Mehrkörperdynamik

### 5.1 Modellaufbau

Die Beanspruchung der Kurbelwelle erfolgt durch die Verbrennungskraft, oszillierende - rotierende Massenkräfte und die Vibrationen des Systems Kurbeltrieb. Die Belastung der Kurbelwelle wird mittels Mehrkörpersimulation bestimmt. In der Mehrkörperdynamik- Simulation werden die notwendigen Bewegungsgleichungen aufgebaut und numerisch gelöst. Dabei werden die Bauteile als elastische Körper mittels FE Modellierung mathematisch beschrieben. Die Kopplung zwischen den elastischen Körpern wird mit nichtlinearen Funktionen beschrieben. Für die Kurbelwelle wird das System Kurbeltrieb entsprechend abgebildet, wie in **Abbildung 9** schematisch dargestellt wird.

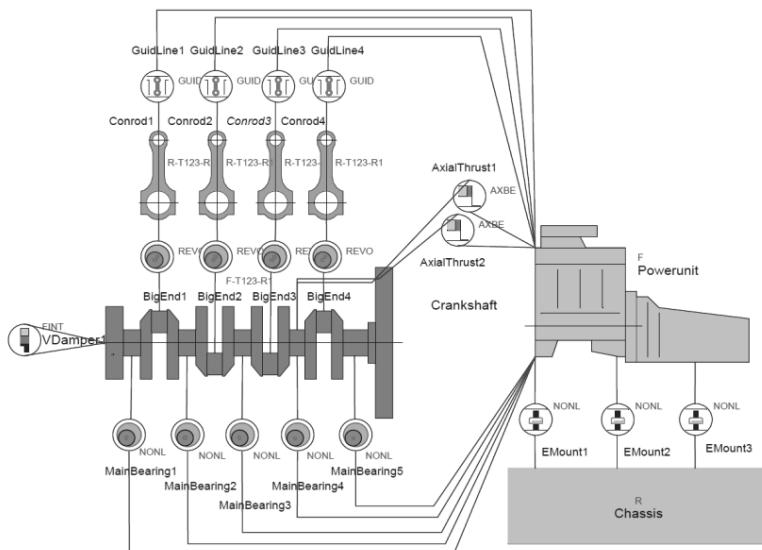


Bild 9: Schematische Darstellung Kurbeltrieb, AVL/Excite Modell

Die Kurbelwelle wird mittels FE-Modell als elastischer 3D-Körper abgebildet, wie in **Abbildung 10** dargestellt. Das FE-Modell der Kurbelwelle erfasst Schwungrad und Dämpfer, die linear mit der Kurbelwelle gekoppelt sind.

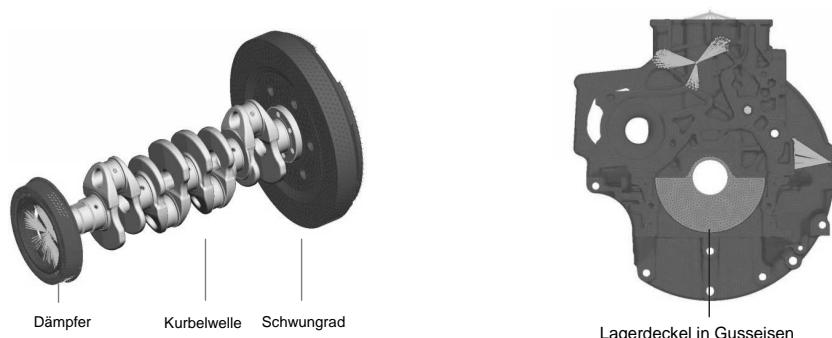


Bild 9: FE Modell Kurbelwelle mit Schwungrad-Dämpfer und Zylinderkurbelgehäuse

Die Hauptlager werden mit einer nicht-linearen Feder abgebildet. Die nicht-lineare Steifigkeit für das Hauptlager wird anhand des Lagerspiels und der Ölsteifigkeit ermittelt.

Der Pleuel wird als elastischer Körper mittels eines Balken-Massenmodells abgebildet. Die Pleuelmasse wird in kleine und grosse Pleuelaugen des Balken-Massen Modells entsprechend aufgeteilt. In dem kleinen Pleuelauge wird die Kolbenmasse zusammengezählt. Die Steifigkeit des Balkens entspricht der Pleuelsteifigkeit.

Die Pleuellager werden ebenfalls mit nichtlinearen Federn abgebildet. Der Steifigkeitswert wird ebenfalls Lagerspiel und Ölsteifigkeit ermittelt.

Das Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium mit dem Lagerdeckel aus Gusseisen wird als elastischer 3D-Körper abgebildet wie in **Abbildung 9** dargestellt wird.

Die Verbindung Kolben-Zylinderkurbelgehäuse, Motorlagerung, Torsionsschwingungsdämpfer werden mit nicht-linearen Federn abgebildet. Das Chassis wird als starrer Körper abgebildet.

## 5.2 Ergebnisse

Die Mehrkörpersimulation wird im Bereich von 500-4500 RPM mit einem Schritt von 250 RPM durchgeführt. Dabei werden drei Zyklen in stationären Betrieb simuliert. Um numerische Fehler bei der Auswertung zu vermeiden, wird der letzte Zyklus ausgewertet.

### 5.2.1 Hauptlagerkräfte

Die Hauptlagerkräfte sind sowohl für die Dauerfestigkeit der Lagerung, als auch für die Körperschall-Intensität des Motors wichtig. Der Vergleich von Lagerkräften zwischen hohlgegossen Kurbelwellen und der Stahlausführung, wie in **Abbildung 10** dargestellt wird, zeigt keinen wesentlichen Unterschied. Die maximale Lagerkraft liegt für beide Varianten auf 46 [kN] bei 2000 [RPM] für Lager 1 (am Schwungrad naheliegendem Lager) und Lager 5 (am Torsionsschwingungsdämpfer naheliegendem Lager). Die Ergebnisse entsprechen dem typischen Lagerkraftverlauf des 4-Zylinder Dieselmotors. Das gleiche Kräfteniveau ist auf den gleichen Ausgleichsgrad zurückzuführen.

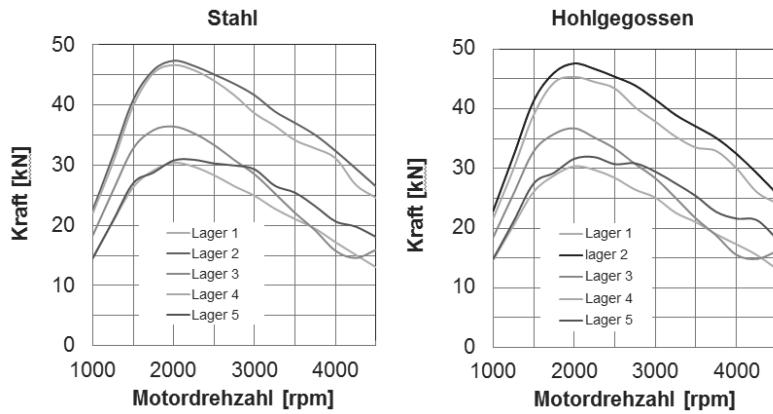


Bild 10: Maximale Kräfte an den Hauptlagern

### 5.2.2 Motorlager Schwingungsamplitude

Der Motor wird mit drei Lagern gelagert. Die Motorschwingungen werden durch die Motolagerung in die Karosserie übertragen. Der Vergleich von Schwingungsamplitude zwischen hohl gegossener Kurbelwelle und der Stahl ausführung, wie in **Abbildung 10** dargestellt, zeigt keinen wesentlichen Unterschied. Das gleiche Schwingungsamplitudenniveau ist auf den gleichen Ausgleichsgrad zurückzuführen.

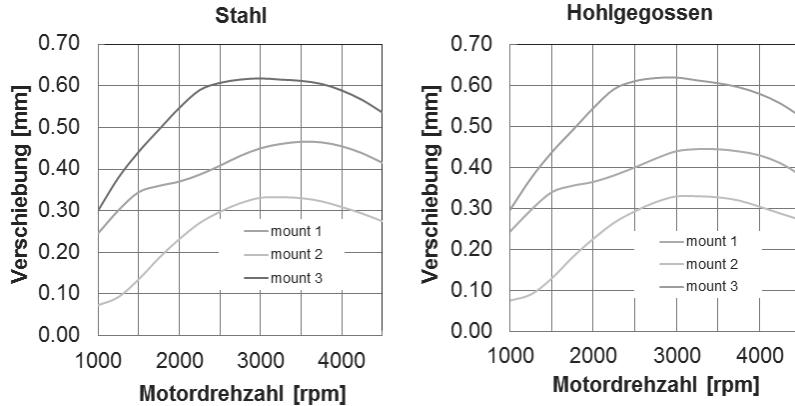


Bild 11: Maximale Schwingungsamplitude an den Motorlagern

### 5.2.3 Hauptlagerbiegemomente

Die Biegemomente an den Hauptlagern sind für die Biegebelastung der Kurbelwelle und den Verschleiss an den Lagerschalen ausschlaggebend. Die maximalen Biegemomente werden in **Abbildung 12** dargestellt. Der Vergleich zeigt einen erhöhten Biegemoment von 46 [Nm] für die hohlgegossene Kurbelwelle bei Lager Nr.1 (am Schwungrad naheliegendem Lager). Dieser Unterschied ist auf den niedrigen Elastizitätsmodul von Gusseisen zurückzuführen. Um möglichen Verschleiss zu vermeiden wird üblicherweise bei Bedarf das den Lagerschalen entsprechende Profil modifiziert.

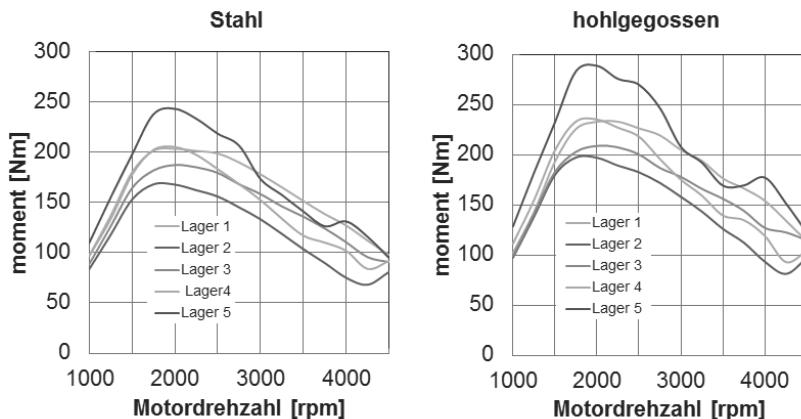


Bild 12: Maximale Biegemomente an den Hauptlagern

### 5.2.4 Spannungsverteilung

Die Spannungsverteilung an der Kurbelwelle wird mit einem Schritt von 250 [RPM] von jeder Drehzahl von 500-4500 [RPM] gerechnet, um die höchsten Spannungen zu identifizieren. Der Spannungszustand der Kurbelwelle wird für jede Drehzahl für einen gesamten Motorzyklus (720° Kurbelwinkel) mit einem Schritt von 2° Kurbelwinkel gerechnet.

Die maximale Spannung wurde bei 2000 [RPM] im letzten Übergangsradius mit 480 [MPa] bei 378° Kurbelwinkel gerechnet. Im Hohlräum wurde eine maximale Spannung von 109 [MPa] bei 548° Kurbelwinkel und im bearbeiteten Bereich bei der ersten Ölbohrung (in der dem Schwungrad naheliegende Bohrung) eine maximale Spannung von 320 [MPa] bei 564° Kurbelwinkel gerechnet. In **Abbildung 13** werden die Bereiche mit maximalen Spannungen bei 2000 [RPM] dargestellt.

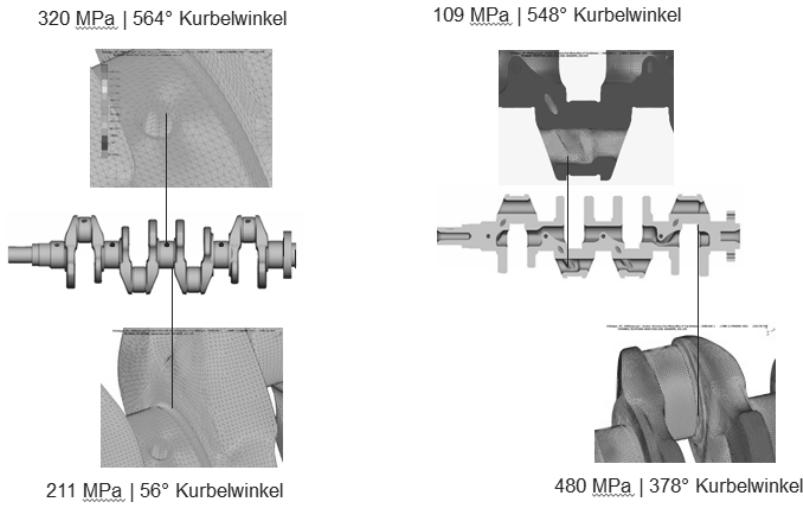


Bild 13: Maximale Spannungen bei 2000 RPM

## 6. Werkstoff

### 6.1 Mechanische Eigenschaften

Die Gusseisenwerkstoffe für den Einsatz in den Kurbelwellen sind GJS600 und GJS700. Bei hochbelasteten Kurbelwellen wird GJS800 eingesetzt. Die am höchsten belasteten und dadurch kritischen Bereiche sind die Übergangsradien. Aus diesem Grund werden diese induktiv gehärtet oder festgewalzt. Die Erhöhung der Dauerfestigkeit durch den Festwalzprozess erfolgt durch den Eigenspannungszustand unterhalb der Oberfläche. Während des Festwalzprozesses wird der Werkstoff lokal elastisch-plastisch verformt. Aus diesem Grund ist nicht nur das plastische Verhalten des Werkstoffs, sondern auch die Streckgrenze entscheidend. Zur Nutzung dieses Effekts wurde die Legierung GJS CS 800 HY mit einer deutlichen höheren Streckgrenze entwickelt. Mechanische Kennwerte von typischen Guss Werkstoffen werden in **Abbildung 14** dargestellt.

		<b>GJS 600</b>	<b>GJS700</b>	<b>GJS CS 800 HY</b>
Elastizitätsmodul E	MPa	<b>175</b>	<b>175</b>	<b>175</b>
Dichte $\rho$	kg/dm <sup>3</sup>	7,2	7,2	7,2
Bruchspannung Rm	MPa	760 (>600)	790 (>700)	<b>825</b>
Streckgrenze Rp0.2%	MPa	435(>380)	446 (>420)	<b>555</b>
Bruchdehnung A5	%	6,4 (>3%)	4,7 (>2%)	<b>6,9</b>

### Bemerkungen

1. Angegeben sind Mittelwerte, gemessen an verschiedenen Messpositionen auf der Kurbelwelle
2. Messpositionen sind bei jedem Projekt zu definierten und sind Merkmale der Qualitätsprüfung
3. Die Klammerwerte sind minimal angeforderte Werte nach DIN EN 1563
4. Die Streckgrenze ist für die Dauerfestigkeit der Kurbelwelle entscheidend.
5. CS 800 HY mit hoher Streckgrenze wurde für hochbelastete Kurbelwellen entwickelt

Bild 14: Mechanische Eigenschaften von Gusseisen

Die mechanischen Werkstoffeigenschaften der Kurbelwelle sind inhomogen **Abbildung 15**. Für eine gegossene Kurbelwelle sind drei Bereiche mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen: a) bearbeitete Oberfläche b) Guss-Oberfläche und c) verfestigte Übergangsradien wie in **Abbildung 15** dargestellt wird. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften von bearbeiteten- und Guss-Oberflächen stehen in Zusammenhang mit der Werkstoffflegierung. Die Eigenschaften an den verfestigten Übergangsradien werden von der Festwalzkraft eingestellt.

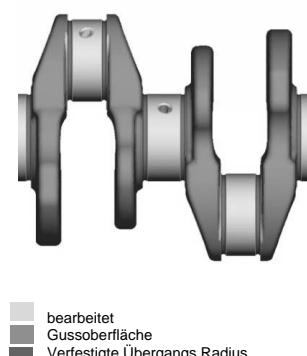


Bild 15: Bereiche mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften

## 6.2 Ermittlung Dauerfestigkeit

Für die Berechnung von Sicherheitsfaktoren ist die Ermittlung der Dauerfestigkeit erforderlich. Untersucht wird sie im Wöhlersversuch, aus dessen Ergebnissen die Wöhlerkurve konstruiert werden kann, siehe **Abbildung 14**. Die Wöhlerkurve gibt in Abhängigkeit von der Ausschlagsspannung die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel an. Außerdem kann die Wöhlerkurve in die Bereiche Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit oder Dauerfestigkeit unterteilt werden. Für die Darstellung der Dauerfestigkeit können Diagramme wie das Haigh-Diagramm oder das Smith-Diagramm verwendet werden.

Die Kurbelwelle wird in Dauerfestigkeitsbereich ausgelegt. Daher ist die Ermittlung der Wöhlerlinien für alle drei Bereiche (bearbeitet, Gussoberfläche, verfestigter Übergangsradius) notwendig.

$\sigma_D / L_D$	Dauerfestigkeit
$N_D$	Ecklastspielzahl
$k$	Wöhlerlinienneigung
$R$	Last- / Spannungsverhältnis
$T_N$	Streubreite in Lastspielzahlrichtung
$T_L$	Streubreite in Lastrichtung

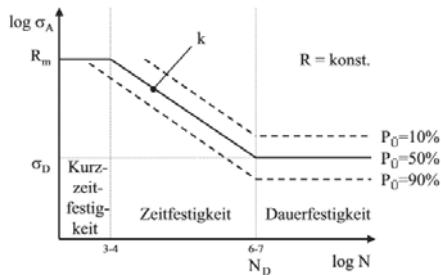


Bild 16: Beschreibung Wöhlerlinie

Für die Dauerfestigkeit in den Übergangsradien und im Hohlraum wird die Wöhlerlinie für die Biegebelastung ermittelt. Dabei wird die Kröpfung auf der Prüfanlage in das Haupt- und Pleuellager eingespannt. Im nicht eingespannten Hauptlager wird durch einen hydraulischen Aktuator eine Wechselkraft mit  $R=-0.5$  eingebracht. **Abbildung 17a** zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus der Biegeprüfung.

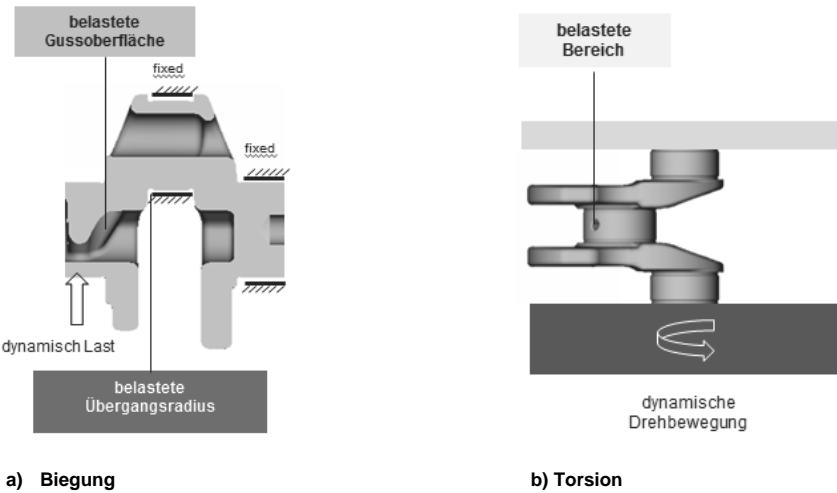


Bild 17: Schematische Darstellung Prüfung

Für die Dauerfestigkeit in Torsion wird die Kröpfung vertikal im Hauptlager montiert. An das zweite freie Hauptlager wird eine Scheibe mit einem hohen Massenträgheitsmoment montiert. Die Anregung wird als Rotation an das in der Prüfanlage montierte Lager angebracht. Die Prüfanlage detektiert die Resonanz des Systems und die Prüfung wird in der Systemresonanz mit  $R=-1$  durchgeführt. **Abbildung 17b** zeigt in einer schematischen Darstellung den Aufbau der Torsionsprüfung.

Beide Prüfungen werden nach den Treppenstufenverfahren durchgeführt.

### Prinzip des Treppenstufenverfahrens

Der Bereich der geschätzten Dauerfestigkeit wird aufgrund der unterstellten logarithmischen Normalverteilung in Spannungshorizonte mit einem logarithmisch äquidistanten Stufenprung  $d$  eingeteilt. Auf einem beliebigen Horizont innerhalb der geschätzten Dauerfestigkeit wird der erste Versuch angesetzt. Die Probe wird so lange geprüft bis sie versagt (z.B. Bruch) oder eine Abbruchschwingspielzahl erreicht ist (Durchläufer). Je nach eingetretenem Ereignis (Bruch oder Durchläufer) wird die Folgeprobe auf dem nächsthöheren oder nächstniedrigeren Horizont eingesetzt [4].

## Verfestigte Übergangsradien

Die Ergebnisse für die Übergangsradien zeigen für Gusseisen eine massive Erhöhung der Dauerfestigkeit in Abhängigkeit der spezifischen Festwalzkraft **Abbildung 19**. Der gleiche Effekt ist für Stahl zu erwarten. Die spezifische Festwalzkraft wurde hier zu Vergleichbarkeit der Ergebnisse eingeführt **Abbildung 5**. Für die gleiche Festwalzkraft ist eine niedrigere Dauerfestigkeit für Gusseisen zu erwarten. Dieser Unterschied ist auf die niedrigere Streckgrenze von Gusseisen zurückzuführen.

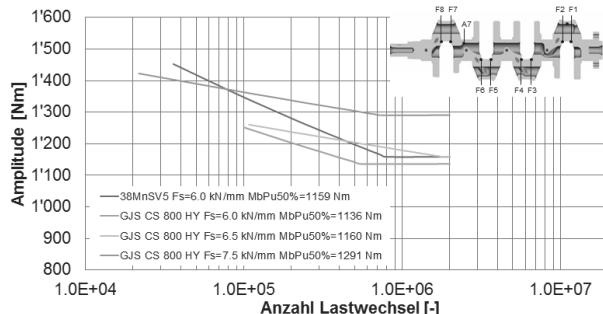


Bild 19: Wöhlerlinie GJS CS 800 HY , Biegung  $R=-0,5$  |  $F_s=6,0 - 7,5$  kN/mm| Pos. F1/F2/F8

## Hohlraum Gussoberfläche

Die Werkstoffeigenschaften der Gussoberfläche im Hohlraum der Kurbelwelle sind unbearbeitet und nicht nachbehandelt, lediglich reinigungsgestrahlt. Hier ist zu beachten, dass in dünnen Bereichen unmittelbar in der Nähe der Übergangsradien die Festwalzkraft einen negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit hat **Abbildung 20**. Die Position A7 mit einer Wandstärke von 10 [mm] wird als absolute Untergrenze empfohlen. Bei Bedarf wird eine andere Festwalzkraft am Übergangsradius für Pleuel- und Hauptlager empfohlen.

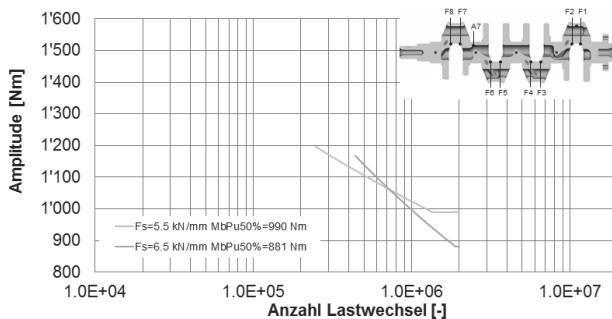


Bild 20: Wöhlerlinie GJS CS 800 HY Biegung  $R=-0,5$  |  $F_s=5,5 - 6,5 \text{ kN/mm}$  | Pos. A7

### Bearbeitete Oberfläche

Die Ölbohrungen werden im Betrieb in Torsion belastet. Die Torsions-Dauerfestigkeit steht im Zusammenhang mit der Streckgrenze des Werkstoffs und der Oberflächenqualität der Bearbeitung. In der Regel sind die Ölbohrungen nicht nachbehandelt. Die Wöhlerlinie der Ölbohrungen wird in der **Abbildung 21** dargestellt.

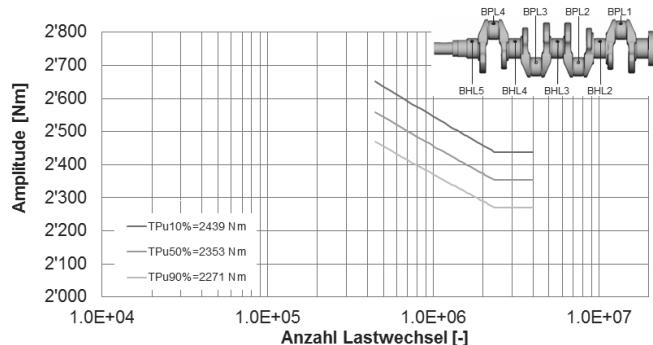


Bild 21: Wöhlerlinie GJS CS 800 HY Torsion  $R=-1$  | Pos. BHL3

### Sicherheitsfaktoren

Jeder Festigkeitsnachweis besteht aus einem Vergleich der Beanspruchung eines Bauteils und seiner Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren. Da Kurbelwellen in Dauerfestigkeit ausgelegt werden, wird für die Beanspruchbarkeit der Dauerfestigkeitswert eingesetzt. In der Regel liegen die Sicherheitsfaktoren je nach Motor im Bereich von 1.5 und 2.0.

Die Ermittlung den Sicherheitsfaktoren wird mit Hilfe des Haigh-Diagramms und der Goodman-Linie für jede Drehzahl und Stelle durchgeführt **Abbildung 22**.

Die Sicherheitsfaktoren liegen im Bereich von 1.5 – 2.0, daher kann die Kurbelwelle als dauerfest bewertet werden.

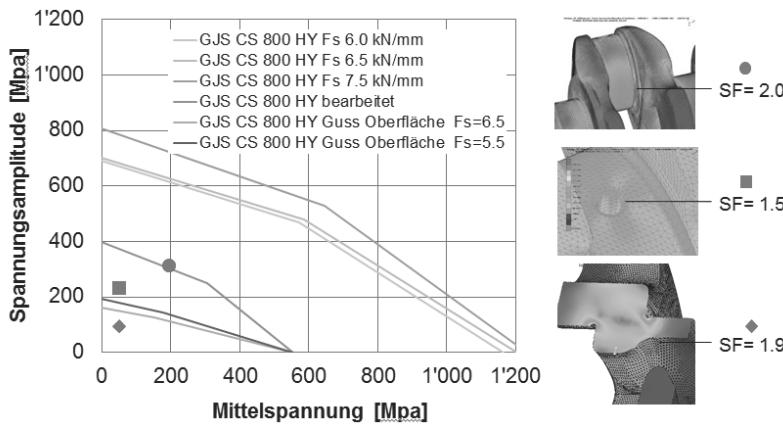


Bild 22: Sicherheitsfaktoren GJS CS 800 HY |Haigh-Diagramm

### 6.3 Tribologie

Beim hydrodynamischen Gleitlager entsteht Druck im Ölfilm durch die Pumpwirkung der beiden Teile (Welle-Lager). Während dem Anfahren und Auslaufen des Motors ist dieser nicht ausreichend, um einen Festkörperkontakt ganz zu vermeiden. In diesen Phasen herrscht Mischreibung. Die Lageroberfläche hat einen wesentlichen Einfluss auf den Reibungskoeffizienten. Zu Charakterisierung von Reibungsverhalten bei hydrodynamischen Lagern, wird die Stribeck-Kurve ermittelt. Die Stribeck-Kurve beschreibt den Verlauf der Reibkraft in Abhängigkeit von der Reibgeschwindigkeit, im Falle hydrodynamischer Reibung. Die Einflussparameter der Reibung bei hydrodynamischen Lagern sind Lagergeometrie, Ölförderung, physikalische Eigenschaften von Schmiermitteln, Werkstoffeigenschaften der Lager-Welle und die Oberflächen-Struktur von beiden Teilen.

Laboruntersuchungen mit Sphäroguss zeigen niedrigere Reibungskoeffizienten im Mischreibungsbereich [5]. In der **Abbildung 23** werden die Ergebnisse von Laboruntersuchungen dargestellt, für Stahl und unterschiedliche Guss-Oberflächen-Strukturen. Niedrige Reibung im Mischreibungsbereich ist beim Start-Stopp-Fahrbetrieb besonders wichtig. Grund ist der Öltaschen-Effekt der geöffneten Sphärolithendeckel. Um diesen Effekt zu nutzen, muss die

Deckelöffnung gewährleistet sein. Die Entfernung von Sphärolithendeckeln wird in der Regel im letzten Bearbeitungsprozess (superfinish) der Kurbelwelle realisiert.

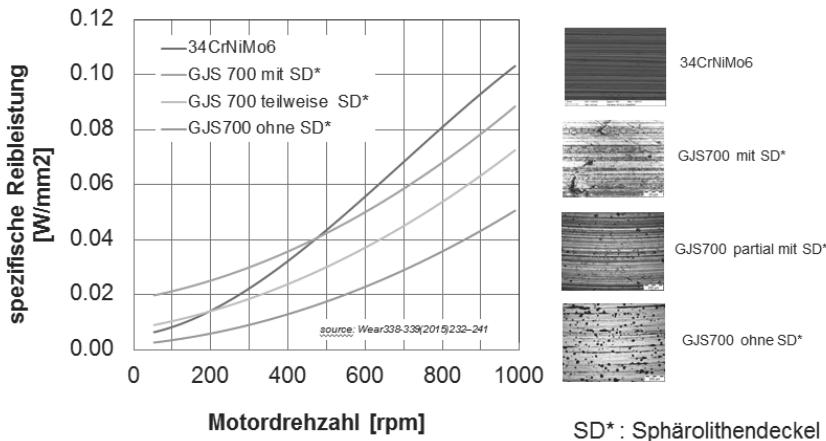


Bild 23: Pin-on-Disc Labor Untersuchungen

### Zusammenfassung

Trotz den intensiven Entwicklungen in Richtung Leichtbau in Motorenbereich ist das Leichtbaupotential noch nicht ausgenutzt. Die Studie zeigt, dass bei einer hohlgegossenen Kurbelwelle eine Gewichtsreduktion von 20% möglich ist. Dabei muss auf die Geometrie des Hohlraums, die Auswahl des Werkstoffs und die Parameter des Festwalzprozesses besonderes geachtet werden. Zur Konstruktion der optimalen Geometrie ist es notwendig die Giesstechnik in den ersten Phasen der Entwicklung zu berücksichtigen.

Hohlgegossene Kurbelwellen mit hochfesten Gusseisen sind nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich eine optimale Auswahl für zukünftige Motoren.

## Literaturverzeichnis

- [1] Neue Perspektiven im Fahrzeugbau Gegossene Kurbelwellen als Alternative zu geschmiedeten , MTZ-2007, Volume 68, Issue 5, pp 384–388, Dr. sc. techn. Werner Menk, Dr. mont. Leopold Kniewallner , Dipl.-Ing.Sabine Prukner
- [2] A2mac1, Automotive Benchmark Datenbank
- [3] FVV Abschlussbericht Dauerfestigkeit II ,Vorhaben Nr. 1079, Bewertung der Schwingfestigkeit von festgewalzten Kurbelwellenunterschiedlicher Werkstoffe
- [4] Zur Treffsicherheit der experimentellen Dauerfestigkeitsschätzung C. Müller, K. Hinkelmann, R. Masendorf,A. Esderts ,Technical Report Series ,Technische Universität Clausthal
- [5] Wear338-339(2015)232–241, Tribological study of crankshaft bearing systems: Comparison of forged steel and cast iron counter parts under start-stop operation. Florian Summer, FlorianGrün, JürgenSchiffer, IstvánGódor, IliasPapadimitriou

# Das Kurbelgehäuse des neuen Porsche V8 Turbomotors

Dipl.-Ing. (FH) **Norman Wöckel**, Dipl.-Ing. **Andreas Kramer**,  
Dipl.-Ing. **Thorsten Wunsch**, Porsche AG, Weissach

## Abstract

Das Kurbelgehäuse des neuen Porsche V8 Turbomotors ist in Deep-Skirt und Closed-Deck Bauweise aus der untereutektischen Legierung AlSi8Cu3 mit Einzellagerdeckeln aus GJS500 hergestellt.

Als Zylinderlaufbahn kommt eine mittels atmosphärischem Plasmaspritzen (APS) aufgebrachte, glattgehönte Eisenbeschichtung zum Einsatz. Vor dem Beschichtungsprozess wird der zu beschichtende Zylinder mechanisch aufgeraut.

Hergestellt wird das Kurbelgehäuse im Sandguss-Kernpaket Verfahren, dem sogenannten CPS (Core Package System). Dieses Herstellverfahren bietet die konstruktive Freiheit, einen hohen funktionellen Integrationsgrad in Verbindung mit geringem Gewicht und geringer Baugröße zu realisieren. Neben dem konsequent genutzten lokalen Werkstoffengineering sind die mittels filigraner Sandkerne strömungsgünstig fertig gegossenen Zylinderstegkühlkanäle eines der herausragenden Merkmale des Bauteiles. Um auch die Anforderung an die technische Sauberkeit des Rohteils zu erfüllen, werden die Bauteile vor der mechanischen Endbearbeitung einer Stoßwellenreinigung unterzogen.

Zur Strukturoptimierung des Bauteils wurde ein neues Komponententestverfahren, das biaxiale Pulsen, eingesetzt. Mit dieser Methode lassen sich die Betriebslasten in mehreren Richtungen realitätsnah nachstellen und zur Schwachstellenanalyse gezielt überhöhen, um somit das Optimum hinsichtlich mechanischer Betriebsfestigkeit bei gleichzeitig minimalem Bauteilgewicht zu erreichen.

## 1. Ziele und Motorgrundkonzept

Seit Einführung der sportlichen Frontmotorfahrzeuge treiben turboaufgeladene V8 Ottomotoren die TOP Modelle der Baureihen Panamera und Cayenne an.

Durch den neu entwickelten V8 Turbomotor werden im Porsche Panamera turbo mit 404 kW und 770 Nm Porsche typische Fahrleistungen erzielt. Gleichzeitig konnten durch intensive Entwicklungen in den Bereichen Ladungswechsel, Brennverfahren, Grundtriebwerk und Aufladung die CO<sub>2</sub> Emissionen deutlich gesenkt werden. Im Zielkonflikt zwischen Leistungsentfaltung und Verbrauchsreduzierung wurde der Hubraum gegenüber der bisherigen V8 Motorfamilie von 4,8 Liter auf 4,0 Liter reduziert.

Anforderungen an das Aggregat durch Start/Stopp-Betrieb, steigende Hybridisierung, lokal unterschiedliche Einsatzbedingungen wie zum Beispiel unterschiedliche Kraftstoffqualitäten, sowie Performance und Effizienz konnten durch den Einsatz eines darauf ausgelegten Öl-Kreislaufes, einer neuen Zylinderlaufbahntechnologie und einer robusten Kurbeltriebslage rung realisiert werden. Eine gleichzeitig kompakte Bauform konnte unter anderem durch die im Innen-V liegenden Abgasturboladern mit Twin-Scroll-Turbinen realisiert werden. Diese Eigenschaften in Verbindung mit einem modularen Aufbau der kompakten Motorgrundarchi tektur, Abbildung 1, bieten die Möglichkeit ohne größere technische Änderungen weitere Motorvarianten abzuleiten und damit hervorragende Voraussetzungen für einen weltweiten Einsatz in unterschiedlichen Fahrzeugbaureihen. Die Befähigung zum Vollhybrid trägt ihr übriges zur Zukunftsfähigkeit des Motors bei.

Im neuen Panamera turbo wird die erste Variante der neuen V8 Turbomotorenfamilie zum Einsatz kommen.

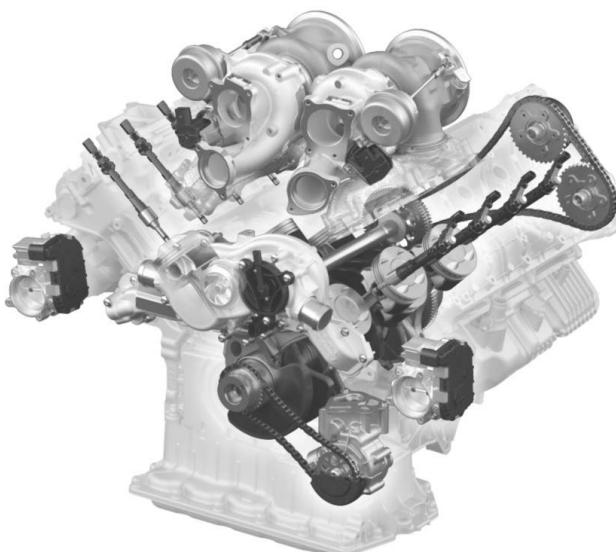


Bild 1: Grundarchitektur

Der neue V8 Turbomotor besitzt eine Zwischenwelle, über die der Steuertrieb sowie die Wasserpumpe angetrieben werden. Durch den innermotorisch umgesetzten Zahnradantrieb der Wasserpumpe kann der Riementrieb weitgehend reduziert werden. Das hat zum einen positive Auswirkungen auf die Reibleistung des Motors und trägt zum anderen zur Kompaktheit des Aggregats bei und erleichtert die Variantenbildung bei Hybridanwendungen.

Die Zylinderrohre des Kurbelgehäuses sind zur Steigerung der Robustheit und des Verschleißes erstmalig mit einer Eisenbeschichtung versehen. Das Hub-Bohrungs-Verhältnis wurde quadratisch mit je 86 Millimetern ausgelegt.

Das Brennverfahren ist durch eine zentrale Injektorlage und eine intensive Ladungsbewegung gekennzeichnet. Zur Verbrauchsminimierung im Teillastbereich wird eine Zylinderabschaltung eingesetzt.

## 2. Zylinderkurbelgehäuse – Konzept und Konstruktion

Das Zylinderkurbelgehäuse des neuen V8 Turbomotors, Abbildung 2, wird als Closed-Deck- und Deep-Skirt-Konstruktion aus der untereutektischen Legierung AlSi8Cu3 im CPS Sandguss-Kernpaket-Verfahren hergestellt. Die Ausführung bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl an Funktionen im Gussbauteil zu integrieren um die angesprochenen Package-Herausforderungen zu lösen. Des weiteren können durch gezielte Prozessführung und lokales Werkstoffengineering die höchstbelasteten Bereiche gezielt optimiert werden. Auch hinsichtlich der Erreichung der gestellten Gewichtsziele konnte so ein Bestwert erreicht werden. So wiegt das gesamte Zylinderkurbelgehäuse inklusive der Lagerdeckel und ihrer Verschraubungen lediglich 39,1 Kilogramm. Das entspricht einer Einsparung von 6,7 Kilogramm (14,6 Prozent) gegenüber dem 4,8 Liter Vorgängermotor mit Bedplate bei gleichzeitig deutlicher Steigerung der maximalen spezifischen Leistung des Motors.

Die Kurbelwellenlagerung wird über Einzellagerdeckel aus GJS500 dargestellt, welche zur Erreichung einer hohen Struktursteifigkeit jeweils über eine vierfach M10-12.9 Hauptlagerverschraubung und über eine M8-10.9 Querverschraubung mit dem Gehäuse verbunden sind. Durch die so erzielten äußerst geringen Formabweichungen der Lagergasse lassen sich in Kombination mit einer Istmaßklassierung exakte Lagerspiele mit einer geringen Toleranzbreite über alle Lagerstellen einstellen. So konnte hier die Auslegung der Nullspieltemperatur prozesssicher über die Serienstreuung auf unter -40°C sichergestellt werden. Gleichzeitig ließ sich die Lagerspielvergrößerung über den Temperaturgang von -40°C bis 120°C um ein Drittel reduzieren. Dies hat auch zur Folge, dass der Öldurchsatz durch die Kurbelwellenlagerung um 15 Prozent reduziert werden konnte, was die Reibleistung positiv beeinflusst.

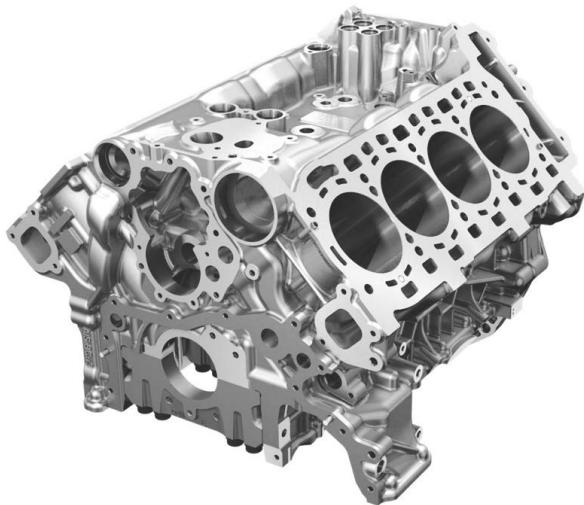


Bild 2: Zylinderkurbelgehäuse

Dem Thema Motorkühlung musste bei der Konstruktion des Kurbelgehäuses besondere Beachtung zukommen. Es galt ein Hochleistungs-Kühlsystem im Kurbelgehäuse-Gussteil zu integrieren, welches alle Anforderungen hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Packagekompatibilität in unterschiedlichsten Fahrzeugplattformen erfüllt. Dies wird durch die kühlwasserseitige Integration von Wasserpumpe und Thermostat sowie den Anschläßen für Kühlervor- und -rücklauf in einem separaten Gussbauteil erreicht. In diesem kann dann die gesamte Varianz bezüglich Lage der Fahrzeuganschlüsse und Durchsatzanpassungen der Wasserpumpe dargestellt werden, ohne am Kurbelgehäuse Änderungen vornehmen zu müssen.

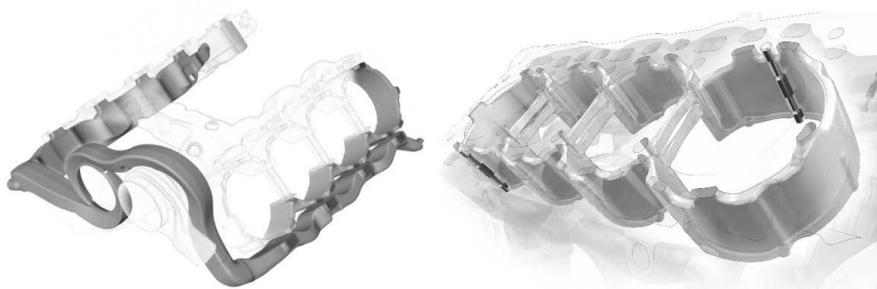


Bild 3: Kühlkonzept

Die Kühlwasserführung, Abbildung 3, ist im Kurbelgehäuse nach dem bei den Porsche V-Motoren bewährten Konzept vorgenommen. Jeweils außen an der Zylinderbank befindet sich eine Kaltwasserversorgungsgalerie, über die die Zylinderköpfe im Querstromkühlprinzip und die Blockwassermäntel mittels einer Diagonal-Längsdurchströmung versorgt werden. Die Druckverluste in der Versorgungsstrecke sind minimiert, um die entscheidenden Bereiche mit maximalem Druckgefälle mit Kühlwasser zu versorgen. Das Kühlwasser der heißen Seite von Blockwassermänteln und Zylinderköpfen wird mittels eines gemeinsamen Kanals im Innen-V gesammelt und über das Thermostat wieder aus dem Kurbelgehäuse ausgeleitet. Die Aufteilung der Volumenströme auf Kurbelgehäuse und Zylinderköpfe erfolgt über definierte Konstruktionsmerkmale, welche leicht anpassbar sind und somit im Laufe der Entwicklung einfach optimiert werden konnten.

Das entscheidende Merkmal bei der Kühlung des Kurbelgehäuses stellen die Zylinderstege dar. Um hier die Temperaturen des Aluminiums zuverlässig in einem Bereich zu halten, in dem plastische Deformation und somit Stegeinfall ausgeschlossen sind, werden in die 7 Millimeter breiten Zylinderstege zweiteilige, strömungsgünstig gestaltete Stegkühlkerne integriert. Die gleichverteilte Durchströmung mit maximalem Wärmeübergang wird durch spezielle Drosselstifte (Abbildung 3) im Blockwassermantel dargestellt.

Neben der Kühlwasserführung sind die Druckölkanäle zum direkten Anschluss des im Innen-V liegenden Öl-Wasser-Wärmetauschers und Ölfiltermoduls ebenfalls in das Kurbelgehäuse integriert, Abbildung 4. Da hier teilweise lange und filigrane Kerne mit minimalen Abständen untereinander zum Einsatz kommen müssen, galt bei der Konstruktion den Themen

Kernstabilität, Positionierung bei Montage des Kernpakete und Abguss sowie der prozess-sicheren Entsandbarkeit besondere Aufmerksamkeit. Um die im Innen-V des Motors liegen-den Turbolader optimal mittels Luftdurchströmung kühlen zu können, mussten auch sämtli-che Kühlwasserführungen der Nebenverbraucher ins Kurbelgehäuse integriert werden, um den Kühlluftquerschnitt so wenig als möglich zu versperren.

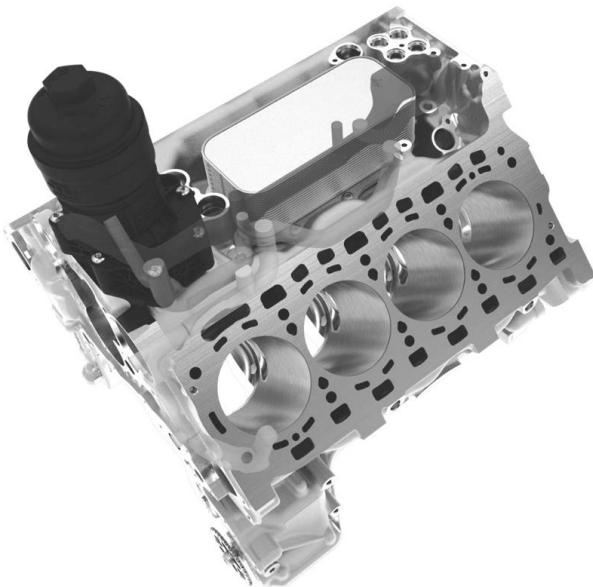


Bild 4: Integrierte Öl- und Kühlwasserführung Innen-V

Um den neuen Porsche V8 Turbomotor unter allen vorgesehenen Grenzbetriebsbedingungen wie Rundstreckenbetrieb und Geländefahrt sicher betreiben zu können, bedarf es eines optimierten Ölrücklauf- und Motorentlüftungssystems, Abbildung 5. Die Ölrückläufe sind auf den Außenseiten des Kurbelgehäuses von den Übergabestellen der Zylinderköpfe jeweils zentral in der Mitte zusammengeführt. Von dort wird das rücklaufende Öl mittels in den Ölsumpf der jeweiligen Fahrzeugplattform integrierten Kunststoffbauteilen weitergeleitet.

Beim Motorentlüftungssystem bestand die Herausforderung darin, das aufgrund des extrem kompakten Packages im Kurbelraum kein unter allen Betriebsbedingungen weitgehend ölfreier Bereich existiert, aus dem die Blowby-Gase entnommen werden können. Es galt, ein komplexes Kanalsystem zu integrieren, welches verschiedene Entnahmestellen inklusive jeweiliger Kanalführungen mit Grobölabscheidung bereitstellt, um das gesamte Betriebskollektiv des Aggregates zuverlässig abzudecken.

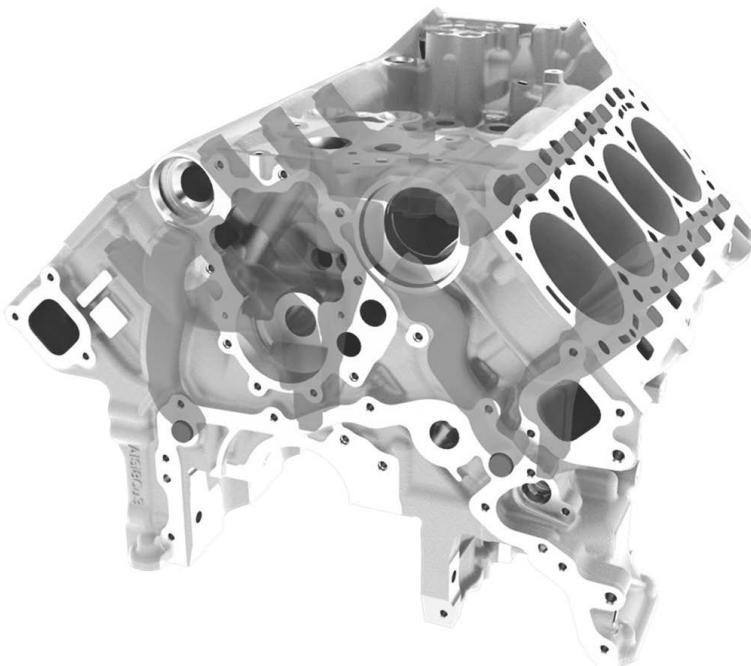


Bild 5: Ölrücklauf- und Motorentlüftungskerne

### 3. Zylinderkurbelgehäuse – Umsetzung im CPS Sandguss-Kernpaketverfahren

Die herausfordernden Randbedingungen bei der Entwicklung des neuen Porsche V8 Turbomotors und die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen konstruktiven Lösungen resultierten in einem entsprechend komplexen Kernpaket mit hohem Integrationsgrad, bestehend aus 37 Sandkernen. Zur gezielten Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften in den hochbelasteten Bereichen des Bauteils werden Zylinderkühlkokillen sowie Lagerstuhlkühlleisen in das Sandpaket eingesetzt, Abbildung 7. In Verbindung mit dem Gießprozess wird hiermit gezieltes, lokales Werkstoffengineering betrieben. Zum Abguss wird das Kernpaket 180° gedreht, so dass die Formfüllung von unten durch die über den Zylinderdeckflächen angeordneten Speiser erfolgt. Die Schmelze kühlt bei der Formfüllung bereits ab und trifft so auf die massiven Kühlleisen im Bereich der Lagerstühle. Dies führt zu einer unmittelbaren Erstarrung mit extrem feinporiger Gefügeausbildung mit sehr geringen Dendritenarmabständen und gegenüber der Grundlegierung stark gesteigerten Werkstoffeigenschaften. Unmittelbar nach dem Füllen der Sandform wird das Paket um 180° gedreht, um dann in der späteren Einbaulage vollständig zu erstarrn. Dadurch ist gewährleistet, dass sich in den nunmehr oben liegenden Speisern die heißeste Schmelze befindet. Den Zylinderkühlkokillen kommt dabei bezüglich ihrer Dimensionierung eine Kompromissrolle zu, welche im Spannungsfeld zwischen einerseits der Festigkeitssteigerung der Zylinderrohre und der Erfüllung der Gefügeanforderungen für den Laufbahnbeschichtungsprozess und andererseits der Vermeidung eines vorzeitigen Abfrierens der Hauptspeisungswege liegt. Durch den Einsatz entsprechender Gießsimulationen lassen sich die Zylinderkühlkokillen bereits in einer sehr frühen Designphase optimieren. Die Kernpakte werden direkt aus der Gießhitze einem Ofenprozess zugeführt, welcher die Kurbelgehäuse einer T6 Wärmebehandlung unterzieht und gleichzeitig die Entsandung der Bauteile sicherstellt.

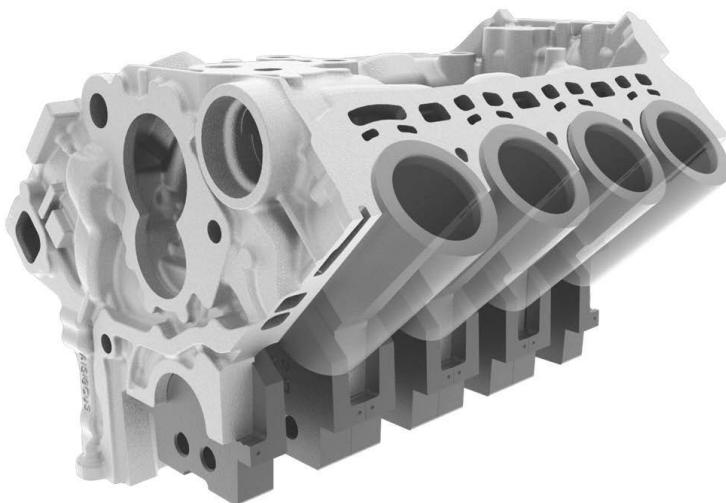


Bild 6: Zylinderkühlkokillen und Lagerstuhlkühleisen

Da nicht in allen Bereichen des Kurbelgehäuses Probestäbe entnommen werden können, wird der Dendritenarmabstand (DAS) als Vergleichswert für die Werkstoffeigenschaften herangezogen. Dieser wird mit an definierten Positionen entnommenen Probestäben ermittelten, mit statischen und dynamischen Werkstoffkennwerten abgeglichen.

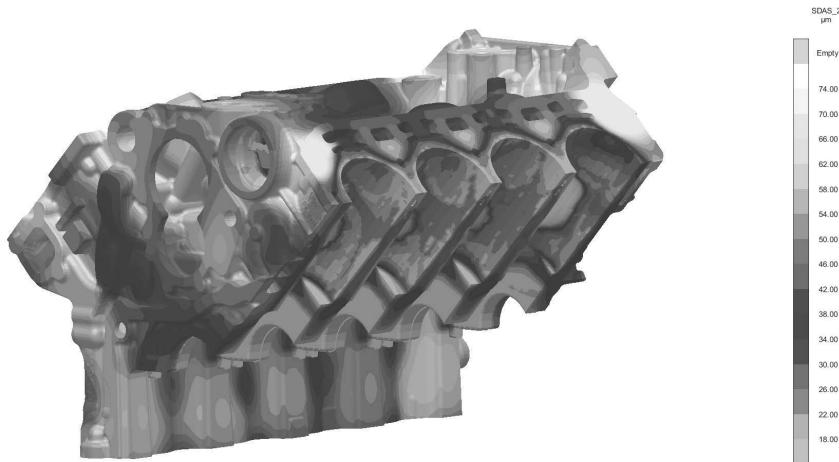


Bild 7: Errechnete Dendritenarmabstände

Im Bereich der Zylinderkühlkokillen und Lagerstuhlkühleisen ergeben sich durch die schnellere Erstarrung geringere DAS, was zu besseren Werkstoffeigenschaften diesen Bereichen führt. Über den Abgleich gemessene DAS – real ermittelte Werkstoffeigenschaften – errechnete DAS, Abbildung 7, können die lokal unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften, in gewissen Grenzen, in der Betriebsfestigkeitssimulation berücksichtigt werden.

#### 4. Komponententest Pulsen

Zur Strukturoptimierung des Kurbelgehäuses wurde ein neues Komponententestverfahren, das biaxiale Pulsen, eingesetzt, Abbildung 8. Mittels zweier Hydraulikzylinder lässt sich hier der vektorielle Verlauf der durch den Kurbelwellenzapfen in den Lagerstuhl eingeleiteten Triebwerkskräfte simulieren. Abgeprüft wird jeweils ein Lagerstuhl. Das Kurbelgehäuse befindet sich in einer beheizbaren Prüfkammer, um den Test unter Betriebstemperatur vornehmen zu können. Mit dieser Methode lassen sich die Betriebslasten zur Schwachstellenanalyse gezielt überhöhen, um somit das Optimum hinsichtlich mechanischer Betriebsfestigkeit bei gleichzeitig minimalem Bauteilgewicht zu erreichen. Insbesondere der Bereich um die Hauptlagerverschraubung und die zur Reibleistungsminimierung eingebrachten Ventilationsöffnungen wurde in einem kombinierten Prozess aus der beschriebenen Versuchsmethodik und der Strukturfestigkeitsberechnung gezielt optimiert und schnell validiert.

Vorteil dieser Methode ist die Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit eines Gesamtmotors und die schnelle Ergebnisgewinnung, wodurch der Motorerprobung vorvalidierte Bauteile zur Verfügung gestellt werden können.

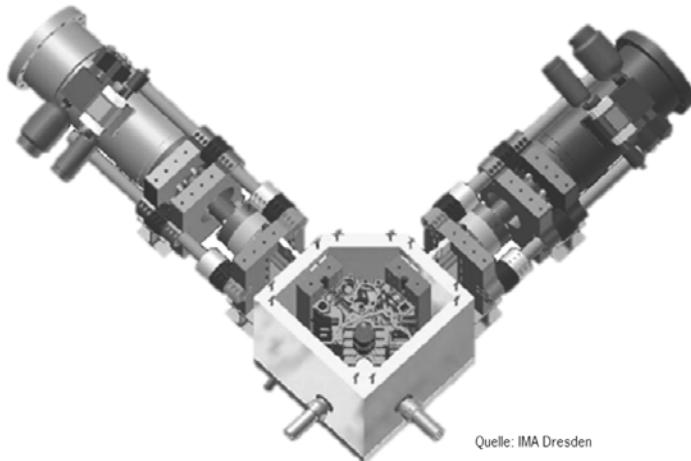


Bild 8: Prüfstandsaufbau biaxiales Pulsen

## 5. Laufbahn

Nachdem bereits mit der aktuellen Generation der Porsche Boxermotoren erfolgreich eine Eisenbeschichtung der Zylinderlaufbahn in Serie ging, findet diese Technologie auch bei den V8 Motoren ihren Einsatz. Das Verfahren für den V8 Turbomotor basiert auf einem mechanischen Aufrauen der Zylinderoberfläche, auf die mittels APS eine Eisenbeschichtung aufgebracht wird.

Beim mechanischen Aufrauen wird mittels eines speziellen, mehrstufigen Schneidenwerkzeuges, Abbildung 9, in einem Bearbeitungsschritt mit dem Feinspindeln des Zylinderrohres ein Hinterschnittprofil in die Oberfläche eingebracht. Dabei entsteht ein spiralförmig verlaufendes Schwalbenschwanzprofil mit einer Tiefe von ca. 60 Mikrometern, in dem sich die Eienschicht später verklammern kann, Abbildung 10.

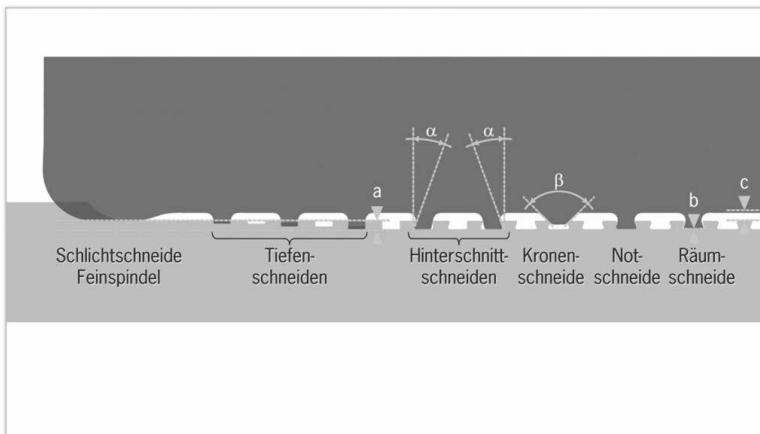


Bild 9: Mehrstufiges Schneidwerkzeug

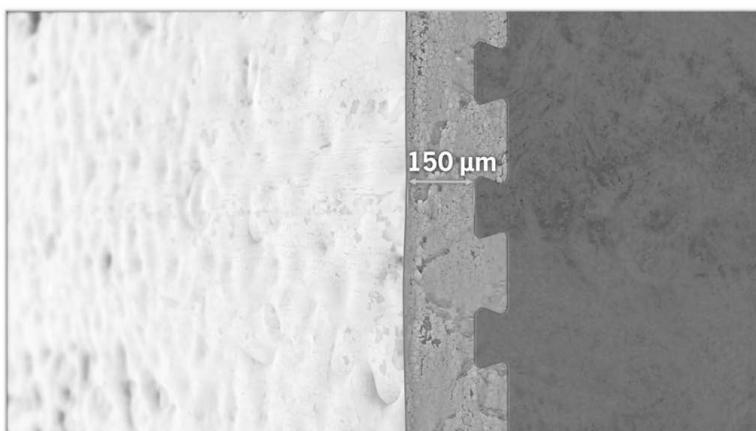


Bild 10: Schnittdarstellung Zylinderlaufbahn

Die Eisenschicht wird in einem mehrstufigen Prozess auf die so vorbereitete Zylinderoberfläche aufgebracht. Im speziellen Falle der APS-Beschichtung wird das Beschichtungssubstrat

in Pulverform in die Plasmaflamme eingedüst, was bezüglich Auswahl des Laufbahnwerkstoffes die größten Freiheitsgrade eröffnet.

Nach dem anschließenden Glatthonprozess, welcher als Brillenhonung ausgeführt wird, entsteht eine ca. 150 Mikrometer starke Funktionsschicht mit einer fein verteilten Mikroporosität und einer sehr guten Haftzugfestigkeit.

Die gewählte APS-Laufbahnbeschichtung zeigte im Laufe der Motorentwicklung ausgezeichnete Funktionsergebnisse:

- Die Oberfläche ist extrem verschleißarm. Nach einem kundenrelevanten Dauerlauf liegen die Verschleißwerte der tribologisch ungünstigsten Bereiche der Kolbenringumkehrpunkte nur noch bei 1-2 Mikrometern. Das ist um den Faktor 10 geringer als bei den Alusil-Laufbahnen der Vorgängermotoren.
- Darüber hinaus bietet die Beschichtung bei der Abstimmung des Ölverbrauchs maximalen Handlungsspielraum. Die Oberfläche verfügt über eine feine Mikroporosität, die ein hohes Ölrückhaltevolumen bereithält, welches aufgrund der guten Robustheit auch über die Motorlebensdauer erhalten bleibt.
- Die Tatsache, dass die beschriebenen Mikroporen nicht miteinander kommunizieren, sondern jeweils für sich abgeschlossenen Mikrodruckkammern bilden, liefert einen wesentlichen Anteil am extrem niedrigen Reibleistungsniveau des neuen Porsche V8 Turbomotors.
- Auch bei Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten oder bei den hohen Motor-Startgradienten in Hybridtriebsträngen zeichnet sich diese Funktionsschicht durch eine sehr hohe Robustheit aus.

## 6. Technische Sauberkeit – Stoßwellenreinigung

Die Anforderungen an die technische Sauberkeit werden beim späteren Motorbetrieb, aber auch bei mechanischen Bearbeitungsoperationen, immer höher. Um dem gerecht zu werden, wurde im Rahmen der Vorbearbeitung des Kurbelgehäuses eine Stoßwellenreinigung integriert. Dabei werden jeweils zwei zu reinigende Bauteile in einen Wassertank gegeben und mit insgesamt 40 durch Kondensatorentladungen erzeugte Stoßwellen in unterschiedlichen Positionen beaufschlagt. Pro Kondensatorentladung wird eine Energie von 9 Kilojoule freigesetzt, was dazu führt, dass auch anhaftende Sandpartikel gelöst werden, welche dann durch einen nachfolgenden Flutwaschprozess herausgespült werden können. Die ermittelten

Restschmutzwerte konnten mit diesem Prozess im Vergleich zu einem konventionellen Reinigungskonzept (nur spülen) um bis zu 80 Prozent verbessert werden.

Wirken Stoßwellen des beschriebenen Energieinhaltes auf das Kurbelgehäuse ein, resultieren für das Bauteil signifikante Beanspruchungen, welche im Entwicklungsprozess abgesichert werden müssen.

## 7. Zusammenfassung

Das Kurbelgehäuse für den neuen Porsche V8 Turbomotor entstand aus einem extrem anspruchsvollen Anforderungsprofil, geprägt von einem gestiegenen Belastungskollektiv bei gleichzeitig anspruchsvollen Package- und Integrationsanforderungen.

Mit einem Deep-Skirt-Kurbelgehäuse hergestellt im Sandguss-Kernpaketverfahren konnten diese teilweise gegenläufigen Ziele aufgelöst werden, im Zusammenspiel mit gezieltem, lokalem Werkstoffengineering konnte das Gewicht des Kurbelgehäuses zudem signifikant abgesenkt werden.

Um dieses anspruchsvolle Design frühzeitig optimieren und validieren zu können, wurde mit dem biaxialen Pulsen ein neues Komponententestverfahren eingeführt, dem gestiegenen Urschmutzrisiko durch den deutlich gestiegenen Integrationsgrad an medienführenden Kanälen wird mit einem neuen Reinigungsverfahren, dem Stoßwellenreinigen, Rechnung getragen.

Die APS-Laufbahnbeschichtung mit mechanischer Aufrauhung ermöglicht eine deutliche Robustheitssteigerung bei gleichzeitig verbesserten Funktionswerten.

Der Ersteinsatz des Kurbelgehäuses erfolgt im neuen V8 Triebwerk im neuen Porsche Panamera turbo. Dort leistet der Motor 404 kW und bietet ein maximales Drehmoment von 770 Nm. Das umgesetzte Konzept des Kurbelgehäuses und die konsequente Berücksichtigung unterschiedlicher Einbausituationen und Triebstrangkonfigurationen legen den Grundstein für den weiteren Ausbau der Motorenfamilie.



# Eigenspannungsoptimierung von Zylinderköpfen mithilfe der Simulation

Dipl.-Ing. **René Richter**, Volkswagen AG, Wolfsburg

## Kurzfassung

Die Wünsche nach effizienten Antriebskonzepten und steigender Motorleistung stellen Herausforderungen der heutigen und zukünftigen Motorenentwicklung dar. Um Konzepte des Leichtbaus zu berücksichtigen und Bauraum effizient zu nutzen, stoßen die konstruktiven Möglichkeiten, bei gleichbleibendem Werkstoff, an ihre Grenzen. Da die Beanspruchung des Zylinderkopfes mit steigender Motorleistung einhergeht, muss die Beanspruchbarkeit des Zylinderkopfes erhöht werden. Der Grundgedanke dieser Arbeit ist, dass Eigenspannungen im Bauteil zugunsten der Beanspruchbarkeit genutzt werden. Besonders bei zeitfesten, mittelspannungsempfindlichen Werkstoffen, wie es Aluminiumlegierungen sind, hat eine Verschiebung der Mittelspannung einen großen Einfluss auf die Bauteilfestigkeit. In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Optimierung des Eigenspannungszustandes in Zylinderköpfen, durch eine gezielte Wärmebehandlung, erarbeitet und vorgestellt. Als maßgebendes Werkzeug dient hierbei die numerische Simulation von Temperaturfeldern und Spannungen im Zylinderkopf.

## Abstract

The desire for efficient drive concepts and increasing engine power poses challenges for present and future engine developers. Taking into account both lightweight construction concepts and the efficient use of space while using the exact same materials calls for the utmost in design skills. Since increasing the power of the engine also increases the stress on the cylinder head we also need to increase the stress resistance of the cylinder head. The basic idea of this dissertation is that residual stresses in the component can be used to increase its stress resistance. Particularly with durable, mean-stress sensitive materials such as aluminum alloys, displacing the mean stress has a considerable influence on the strength of the component. This dissertation develops and explains a concept for optimizing the internal stresses in cylinder heads by means of targeted heat treatment. The most important tool used for this is the numerical simulation of temperature fields and stresses in cylinder heads.

## **Vorwort**

Der nachfolgende Inhalt stellt einen Auszug aus der Dissertation von René Richter mit dem Thema „Optimieren von Eigenspannungszuständen an Zylinderköpfen von PKW-Dieselmotoren mit Hilfe der Simulation“ dar, die im Jahr 2017 im Springer-Verlag in der Schriftenreihe der AutoUni erscheinen wird.

## **1. Grundlagen und Stand der Technik**

### **1.1. Abschreckverfahren**

#### **1.1.1. Wasserabschrecken**

In der Großserienfertigung von Zylinderköpfen wird das Verfahren der Wasserabschreckung in der Wärmebehandlung am häufigsten angewandt. Es hat den großen Vorteil, dass ein lösungsgeglühtes Bauteil in sehr kurzer Zeit abgekühlt werden kann und somit den übersättigten Mischkristall, welcher im Lösungsglühen erzeugt werden soll, „einfriert“. Kurze Prozesszeiten und ein optimaler Ausgangszustand für das nachfolgende Warmauslagern können somit erreicht werden. Der prinzipielle Aufbau einer Wasserabschreckanlage ist weitestgehend gleich gestaltet. Sie besteht aus einer Transporteinheit, um das Werkstück zu positionieren, einem Wasserbecken und einer Pumpe oder einer Hebe- und Senleinrichtung, um eine Relativbewegung zwischen Wasser und Werkstück herstellen zu können. Es existieren zahlreiche Patentschriften, die den Anlagenaufbau und das Verfahren beschreiben. Der grundlegende Aufbau heutiger Wasserabschreckanlagen in der Zylinderkopffertigung ist in den Patentschriften [1], [2] erläutert.

### **Problematik eines zweiphasigen Abschreckmediums**

Eine der großen Herausforderungen beim Wasserabschrecken ist der Umgang mit der Dampfphase. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  dieser Phase ist fast um den Faktor 30 kleiner als die von flüssigem Wasser [3] und weist somit eine Art isolierende Wirkung auf. Aufgrund der Bauteilgeometrie, die oft auch Hinterschnitte vorweist, kann ein Einschluss der Dampfphase und/oder Luft stattfinden, die während des gesamten Abschreckprozesses vorhanden ist und die Wärmeabfuhr an diesen Stellen beeinträchtigt. Da der Wärmestrom stets von energiereichen zu energieärmeren Bereichen fließt, wird die Wärmeenergie beim Vorhandensein von Dampfeinschlüssen nicht mehr gleichmäßig über die Oberfläche des Bauteils verteilt an das Abschreckmedium abgegeben. Es treten somit Temperaturgradienten im Bauteil auf, die zu thermomechanischen Spannungen während des Abschreckprozesses führen können. Ein auftretendes Phänomen im Wasser-abschreckprozess ist der Leidenfrost-Effekt, der berücksichtigt werden muss.

### 1.1.2. Luftabschrecken

Das Luftabschrecken bildet eine spezielle Form des Gasabschreckens. Um ein Bauteil schnell abzukühlen, bedarf es nicht unbedingt eines flüssigen Abkühlmediums. Man kann dies auch mit Gasen und Gasgemischen durchführen, die in der Prozessdurchführung und im Ergebnis Unterschiede zur Wasserabschreckung aufweisen können. Vergleicht man die Abschreckmedien Wasser und trockene Luft miteinander, so findet man einen erheblichen Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit beider Medien. Die Wärmeleitfähigkeit von trockener Luft ist eine Größenordnung kleiner als die von reinem Wasser (bei 80 °C Fluidtemperatur:  $\lambda_{\text{Wasser}} = 667,01 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $\lambda_{\text{Luft}} = 30,22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) [3]. Daraus resultiert eine deutlich schlechtere Wärmeleitung und somit Abkühlung des Bauteils beim Einsatz von reiner Luft als Abschreckmedium bei gleichen Randbedingungen. Das langsamere Abkühlen des Bauteils bei der Verwendung einer Gasabschreckung kann einen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Bauteils haben und muss somit bei der Auslegung für einen bestimmten Einsatzzweck berücksichtigt werden. Der übersättigte Aluminium-Mischkristall kann bei zu langsamer Abkühlung nicht vollständig "eingefroren" werden und es treten bereits Ausscheidungen auf, um das Phasengleichgewicht herzustellen. Die optimale Basis für das nachfolgende Warmauslagern und Aushärten könnte somit nicht mehr gegeben sein und der Werkstoff verliert an Festigkeit im Vergleich zu einem wasserabgeschreckten Bauteil. Einer der großen Vorteile von Gasabschreckanlagen ist der relativ gleichmäßige Abkühlverlauf und die somit geringen Temperaturgradienten im Bauteil. Es können hohe thermomechanische Spannungen vermieden werden, die zu starken Verspannungen im Bauteil führen, deren Auswirkungen nachfolgend beschrieben werden.

## 1.2. Eigenspannungen

“Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die in kräfte-, momenten- und temperaturgradientenfreien Festkörpern auftreten und im Gleichgewicht stehen. Sie sind stets eine Folge inhomogener elastischer oder elastisch-plastischer Deformationen in unterschiedlich großen Volumenbereichen“. [4]

Es kann davon ausgegangen werden, dass Eigenspannungen in jedem Festkörper vorhanden sind. Das Vorhandensein von Eigenspannungen bildet somit keine Ausnahme, sondern die Regel. Lokale Beanspruchungen von Bauteilen setzen sich somit aus Last- und Eigenspannungen zusammen. Das zeigt, dass Eigenspannungen einen Einfluss auf die Werkstückeigenschaften haben können. [5]

### 1.2.1. Entstehung von Eigenspannungen

Tabelle 1: Rand-Kern-Modell, Eigenspannung während des Abschreckens

Temperaturprofil	Elastisch-plastisch	elastisch
<b>Beschreibung:</b> Kern (Segment II) und Randbereiche (Segmente I und III) des Bauteils sind erhitzt und haben dieselbe Temperatur. Es herrscht ein spannungsfreier Zustand.		
<b>Beschreibung:</b> Die Randbereiche sind kälter als der Kern und haben sich aufgrund der thermischen Dehnung zusammengezogen. Es resultiert somit eine Zugspannung im Randbereich und eine Druckspannung im Kern. Wird die Dehngrenze überschritten kommt es zu einer plastischen Verformung.		
<b>Beschreibung:</b> Kern und Randbereich sind abgekühlt und haben dieselbe Temperatur. Bei rein elastischem Verhalten sind keine Eigenspannungen vorhanden. Bei erzeugter Plastifizierung während des Abkühlens ist im kalten Zustand eine elastische Dehnung vorhanden, die man als Eigenspannung bezeichnet.		
	$\sigma = 0$	

## 2. Simulation des Temperaturfeldes im Abschreckprozess

### 2.1. Besonderheiten im Aufbau des Temperaturberechnungsmodells

Der Wasserkasten dient als Abbild des Abschreckbeckens aus der Serienfertigung sowie eines Strömungskanals für die Luftabschreckung. Bei der hier beschriebenen Modellerstellung wird ein Teilabschnitt des Beckens dargestellt, dessen Seitenflächen als Periodizitätsflächen definiert werden, die in Bild 1(b) dargestellt sind. Am Beispiel des hier als Basis-(Serien-)Variante beschriebenen Versuchsaufbaus werden in seitlicher Richtung (z-Richtung) unendlich viele Zylinderköpfe simuliert. Energie und Massenströme, die eine Fläche verlassen, treten durch die andere Fläche an deckungsgleicher Position wieder ein. Der Vorteil ist, dass weniger Zellen benötigt werden, um die Geometrien abzubilden und man erhält somit ein schneller und stabiler rechnendes Modell.

Die x-Richtung beschreibt die Durchlaufrichtung des Zylinderkopfes durch die Wärmebehandlung, die y-Richtung beschreibt hier die Hochachse der WBH-Anlage und die z-Achse beschreibt die Querrichtung der WBH-Anlage.



(a) Seitenansicht vom Zylinderkopfnetz und (b) Zylinderkopf mit Periodizitätsflächen  
Rahmen des Wasserkastens

Bild 1: CFD-Netzaufbau eines Zylinderkopfes in einem Wasserbecken

### 2.2. Materialmodelle

#### Materialmodell für reines Wasser

Reines Wasser ist ein sehr gut erforschtes Medium, sodass alle für die Berechnung notwendigen Daten aus Literaturquellen entnommen werden können. Die hier angewandten Daten stammen aus dem VDI-Wärmeatlas [3] und können als Polynom oder Lookup-Table in das Simulationsmodell integriert werden. Das Anwenden von Polynomen oder Lookup-Tables ist stets mit zusätzlichen Rechenschritten verbunden, was die Gesamtzeit der Berechnung verlängert. Dies kann bis zu einer Verdopplung der Rechenzeit führen und kann somit eine Be-

rechnung unwirtschaftlich machen. Daher ist es von Bedeutung ein Modell so genau wie nötig zu erstellen. Zum Beispiel verändert sich der Dichteunterschied der jeweiligen Phase im angewendeten Temperaturbereich nur gering, sodass dieser auch als Konstantwert verwendet werden kann. Wichtiger bei der Berechnung ist der Phasenübergang von flüssig zu gasförmig und umgekehrt. Für das Abführen der Wärme aus dem Zylinderkopf während des Abschreckvorganges leistet die flüssige Wasserphase den entscheidenden Beitrag. Zum Zeitpunkt des Phasenüberganges zwischen flüssig und gasförmig (ca. 100°C) weist die flüssige Phase eine etwa 30-mal größere Wärmeleitfähigkeit auf als die gasförmige Wasserphase. Somit sollte speziell bei der flüssigen Phase über die Verwendung eines Polynoms oder einer Lookup-Table zur Abbildung der thermophysikalischen Größen nachgedacht werden, um die Berechnung genauer zu gestalten. Die zur Anwendung kommenden Daten werden anschließend dem Fluid zugeordnet und der erste Netzabschnitt ist vollständig definiert.

### **Materialmodell für die Zylinderkopflegierung AlSi10Mg(Cu)**

Für die meisten Werkstoffe existieren die thermophysikalischen Kennwerte nur im Bereich deren Einsatztemperaturen. Für die hier angewendete Legierung erhält man somit Werte bis etwa 350°C. Zu wenig, um diese für eine Abschrecksimulation zu nutzen, die bei einer Temperatur von 522°C startet. Für den kompletten Temperaturbereich wurden die thermophysikalischen Werkstoffkennwerte ermittelt, die im Materialmodell in Form von Konstanten, Polynomen oder Lookup-Tables zum Einsatz kommen. Eine variable Dichte kann zum Divergieren der Berechnung führen, da das Volumennetz nicht dafür ausgelegt ist, sich zu stauchen oder zu strecken, wie es bei einer Dichteänderung notwendig wäre. Daher wird die Dichte des Zylinderkopfes auf den konstanten Wert gesetzt, um die Berechnung zu stabilisieren. Die weiteren Kennwerte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, werden in Abhängigkeit der Temperatur als Lookup-Table im Materialmodell integriert. Das erstellte Materialmodell wird dem Zylinderkopf zugeordnet und der zweite Netzabschnitt ist somit vollständig definiert.

### **3. Optimieren des Eigenspannungszustandes**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Spannungsberechnungen einer Optimierungsfunktion zugeführt und ausgewertet. Unter Optimierung versteht man ein Gebiet der angewandten Mathematik, das sich mit dem Finden optimaler Parameter eines Systems beschäftigt. Als "optimal" wird dabei das Maximum oder Minimum einer Zielfunktion bezeichnet. Als Zielwert der hier angewandten Optimierung gilt es, die resultierenden Vergleichsspannungen nach "von Mises", bestehend aus Eigenspannungen und (thermo-) mechanischen Spannun-

gen, zu minimieren. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Parameterraum limitiert ist und die einzelnen Variationsgrößen nicht beliebig verringert oder vergrößert werden können. Bei dem hier als "Optimum" definierten Parametersatz kann es sich auch um ein lokales Minimum handeln. Um eine zielgerichtete Optimierung durchführen zu können, die speziell Bereiche berücksichtigt, die bei einer Rissbildung zum Ausfall des Bauteils führen können, ist eine Definition von Referenzpunkten und Wichtungsfaktoren notwendig.

### **3.1. Definieren von Referenzpunkten am Zylinderkopf**

Für die Definition der Referenzpunkte gibt es zwei Möglichkeiten des Vorgehens. Zum einen besteht die Möglichkeit alle finiten Elemente des Berechnungsmodells als Referenzpunkte zu definieren und der Optimierungsfunktion zuzuführen. Dabei handelt es sich jedoch um mehr als 3 Millionen Elemente, deren Handhabung im Nachgang äußerst schwierig ist. Zum anderen besteht die Möglichkeit einzelne Messpunkte im Zylinderkopf zu definieren. Dabei wählt man Elemente, die in Bereichen liegen, welche für die Bauteilfunktion von höchster Bedeutung sind. Hierzu zählen zum Beispiel die Wände zwischen den zahlreichen Kanälen im Zylinderkopf und dem Brennraum. Die interessantesten Bereiche für diese Optimierung sind die, wo ein Durchriss zum Kontakt zweier verschiedener Medien führt. Also Kühlmitteleintrag in den Brennraum, Verbrennungsgase in das Kühlmittel, Verbrennungsgase oder Kühlmittel in die Umgebung. Einzelne ausgewählte Referenzpunkte sind zu bevorzugen, da diese einen sehr guten Kompromiss zwischen Aussagesicherheit und Berechnungszeit darstellen.

### **3.2. Definieren von Wichtungsfaktoren der Referenzpunkte**

Nicht alle Schädigungen in verschiedenen Bauteilbereichen führen zu einer Funktionsbeeinträchtigung oder gar einem Ausfall. Dies muss bei der Auslegung des Bauteils beachtet werden, sodass einzelne Bereiche stärker in die Optimierungsfunktion eingehen als andere. Hierzu werden an dieser Stelle Wichtungsfaktoren eingeführt, die genau diesen Sachverhalt berücksichtigen. Je höher der Wichtungsfaktor ist, desto höher ist auch die Funktionsrelevanz dieses Bereiches. Als Wichtung werden ganzzahlige Werte von 1 bis 3 (Empfehlung vom Autor) herangezogen und den ausgewählten Referenzpunkten zugeordnet.

### **3.3. Bestimmen der optimalen Wärmebehandlungsparameter**

Zur Optimierung des Eigenspannungszustandes wurden zu variierende Parameter zur Berechnung definiert. Dabei wurden zum einen verschiedene Möglichkeiten zur Handhabung

der Zylinderköpfe in der Wärmebehandlungsanlage berechnet und zum anderen Strömungsparameter des Abschreckmediums variiert. Folgende Parameter wurden hierbei betrachtet:

- Eintauchlage (6 Mantelflächen des Zylinderkopfes) bei konstanten Randbedingungen
- Strömungsgeschwindigkeit des Abschreckmediums in den ersten 3 Sekunden ( $v_{Tauch}$ )
- Strömungsgeschwindigkeit des Abschreckmediums nach den ersten 3 Sekunden ( $v_{Fluid}$ )
- Temperatur des Abschreckmediums ( $T_{Wasser}$  bzw.  $T_{Luft}$ )
- Streuung der Wärmeleitfähigkeit im  $3\sigma$ -Streuband ( $\lambda$  als Ersatzwert, 1 =  $-3\sigma$  = untere Streubandgrenze, 2 = Mittelwert, 3 =  $+3\sigma$  = obere Streubandgrenze)
- Abstand zwischen den Zylinderköpfen
- Abschreckmedium (Wasser und Luft)

Die Variation der Eintauchlage dient einer ersten Aussage über den Einfluss dieser auf den Eigenspannungszustand. Mit einer festen Eintauchlage über die Auslassseite wurde jeweils ein DoE mit den Abschreckmedien Wasser und Luft durchgeführt.

Um eine Aussage treffen zu können, welche Kombinationen aus Handhabung und Strömungsparametern als optimal gelten, ist es notwendig zum einen die technische Umsetzbarkeit zu bewerten und zum anderen eine Bewertungszahl zu definieren, mit deren Hilfe man einen Vergleich durchführen kann. Die Parameter werden hier als optimal bezeichnet, wenn ein Minimum der resultierenden Spannung aus Eigenspannung, mechanischer Beanspruchung und thermomechanischer Beanspruchung innerhalb der definierten Parametergrenzen erreicht ist. Der Eigenspannungszustand und die mechanische Beanspruchung infolge der Montage des Zylinderkopfes und Motors werden als Ausgangszustand betrachtet. Das heißt, dass der Spannungszustand aus diesen beiden Größen durch die Fertigung bestimmt wird und im verbrennungsmotorischen Betrieb als konstant betrachtet wird. Die thermomechanische Beanspruchung ist abhängig vom Betriebspunkt des Motors und kann aufgrund des niederfrequenten Verhaltens als quasistationär für jeden einzelnen Betriebspunkt angenommen werden. Der Verbrennungsdruck selbst bildet eine weitere Belastung des Zylinderkopfes und ist aufgrund der Drehzahl des Motors als hochfrequente Belastung zu betrachten.

Daraus ergeben sich drei Gleichungen zur Bestimmung der resultierenden Spannung für jeden einzelnen Punkt im Zylinderkopf. Hier werden in den Gleichungen die definierten einzelnen Referenzpunkte als Laufvariable  $n$  bezeichnet.

Die Überlagerung aus Eigenspannung und mechanischer Beanspruchung:

$$\sigma_{res,mech,n} = f(x) = \sigma_{ES,n} + \sigma_{mech,n} \quad (1)$$

mit zusätzlicher thermomechanischer Beanspruchung:

$$\sigma_{res,thermomech,n} = f(x) = \sigma_{ES,n} + \sigma_{mech,n} + \sigma_{thermomech,n} \quad (2)$$

mit zusätzlicher Beanspruchung infolge des Verbrennungsdrucks:

$$\sigma_{res,Zünddruck,n} = f(x) = \sigma_{ES,n} + \sigma_{mech,n} + \sigma_{thermomech,n} + \sigma_{Zünddruck} \quad (3)$$

Nachdem die resultierenden Spannungen für jeden Referenzpunkt bestimmt wurden, erfolgt deren Wichtung und Aufsummierung. Mithilfe der Wichtungsfaktoren WF wird, wie oben beschrieben, die Funktionsrelevanz der einzelnen Bereiche berücksichtigt und durch das Aufsummieren der gewichteten Spannungen erhält man die Bewertungszahl zum Vergleich der einzelnen Variationen.

$$\text{Bewertungszahl} = \sigma_{gewichtet,aufsummiert} = g(x) = \sum_{n=1}^N WF_n \cdot \sigma_{res,Überlagerungsvariante,n} \quad (4)$$

Das Ermitteln der resultierenden Spannung erfolgt mithilfe der Spannungstensoren der einzelnen Beanspruchungen. Für die weiterführende Berechnung werden die Vergleichsspannungen nach "von Mises" verwendet. Eine Unterscheidung, ob es sich um eine Zug- oder Druckspannung handelt, ist somit nicht mehr gegeben und auch nicht zwingend notwendig, da hier bereits eine plastische Verformung als Schädigung interpretiert wird. Streck- und Stauchgrenze können bei der hier verwendeten Legierung in ihren Beträgen als gleich betrachtet werden. Ein Beispiel zur Überlagerung der Beanspruchungen und Wichtung zeigt Tabelle 2 aus den Parametern der Validierungsrechnungen (Basis-Serien-Parameter).

Tabelle 2: Exemplarische Überlagerung und Wichtung der Beanspruchungskomponenten an einem Referenzpunkt

Spannungs-komponente	$\sigma_{xx}$ MPa	$\sigma_{yy}$ MPa	$\sigma_{zz}$ MPa	$\tau_{xy}$ MPa	$\tau_{xz}$ MPa	$\tau_{yz}$ MPa	$\sigma_v$ MPa	WF -	$\sigma_{gewichtet}$ MPa
<b>Spannungstensoren</b>									
$\sigma_{ES}$	-4,64	-12,23	-0,19	6,01	-0,15	0,42	14,84	2	29,68
$\sigma_{mech}$	4,08	70,20	-0,45	-8,95	-1,08	0,09	70,25	2	140,50
$\sigma_{thermomech}$	-13,38	-17,18	-17,62	-0,97	0,47	0,09	141,95	2	283,90
$\sigma_{Zünd(druck),Zyl1}$	-33,22	-17,18	-17,62	-0,97	0,47	0,09	15,93	2	31,87
<b>Überlagerung von Eigenspannung und mechanischer Beanspruchung</b>									
$\sigma_{ES} + \sigma_{mech}$	-0,56	57,96	-0,64	-2,94	-1,23	0,51	58,83	2	117,66
<b>plus thermomechanische Beanspruchung</b>									
$\sigma_{ES} + \sigma_{mech}$ + $\sigma_{thermomech}$	-13,94	-87,13	0,21	12,60	-1,41	0,78	84,12	2	168,25
<b>plus Beanspruchung aus Verbrennungsdruck</b>									
$\sigma_{ES} + \sigma_{mech}$ + $\sigma_{thermomech}$ + $\sigma_{Zünd,Zyl1}$	-47,16	-104,31	-17,41	11,63	-0,95	0,87	79,14	2	158,27

Die in Tabelle 2 durchgeführten Berechnungen werden für jeden der definierten Referenzpunkte und jede Überlagungsvariante durchgeführt. Im Anschluss erfolgt das Aufsummieren der resultierenden Spannungen im ungewichteten und gewichteten Betrachtungsfällen. Die Betrachtung beider Fälle soll später den Unterschied zwischen den optimalen Parametern beider Varianten aufzeigen.

Anhand der Bewertungszahlen, also der aufsummierten resultierenden Spannungen, können nun punktuelle und statistische Versuchsdurchführungen ausgewertet und bewertet werden, die zum Finden der optimalen Parameter der Wärmebehandlung von Zylinderköpfen dienen. In den nachfolgenden Auswertungen werden stets die ungewichteten und gewichteten Bewertungszahlen herangezogen, um den Unterschied zu verdeutlichen, der durch eine Priorisierung einzelner Bauteilbereiche hinsichtlich deren Spannungen zustande kommt.

### 3.4. Auswertung DoE zum Wasserabschrecken

Das Abschreckverfahren unterliegt vielen Einflussgrößen, von denen 5 Parameter extrahiert wurden, um den Einfluss dieser auf die Eigenspannungen und Beanspruchbarkeit des Zylinderkopfes mithilfe einer statistischen Versuchsdurchführung zu berechnen. Wie beschrieben,

erfolgt eine Überlagerung einzelner Beanspruchungen, die statisch, quasistatisch und dynamisch sein können. Als statische Beanspruchung werden hier die Eigenspannungen selbst und die mechanische Beanspruchung infolge der Montage betrachtet und bleiben über alle Betriebsbereiche des Motors konstant, bei der Annahme, dass keine Plastifizierung im Betrieb auftritt. Das in den Zylinderkopf, aufgrund der Verbrennung, eingebrachte Temperaturfeld und deren resultierende thermomechanischen Spannungen bilden für jeden Betriebspunkt eine quasistatische Beanspruchung und sind für einen kurzen Zeitbereich (wenige Sekunden) als konstant zu betrachten. Der Verbrennungsdruck bildet eine dynamische Beanspruchung infolge der schwelenden Belastung des Zylinderkopfes. Diese Beanspruchung schwankt zyklisch um die Grundbeanspruchung aus Eigenspannung und (thermo-) mechanischer Beanspruchung. Nachfolgend werden die einzelnen Beanspruchungskomponenten bzw. die Überlagerung aus diesen anhand der ausgewerteten statistischen Versuche (DoE) vorgestellt.

Um die Übersicht zu wahren, wird hier die Auswertung der berechneten Eigenspannungen mit überlagerter mechanischer Beanspruchung infolge der Montage veranschaulicht. Hierzu werden in Bild 2 die ungewichteten und gewichteten Bewertungszahlen über die jeweiligen varierten Parameter dargestellt. Dabei ist stets zu beachten, dass die Bewertungszahl keine Spannung an einem einzelnen Punkt, sondern eine Summe aus mehreren Punkten darstellt.

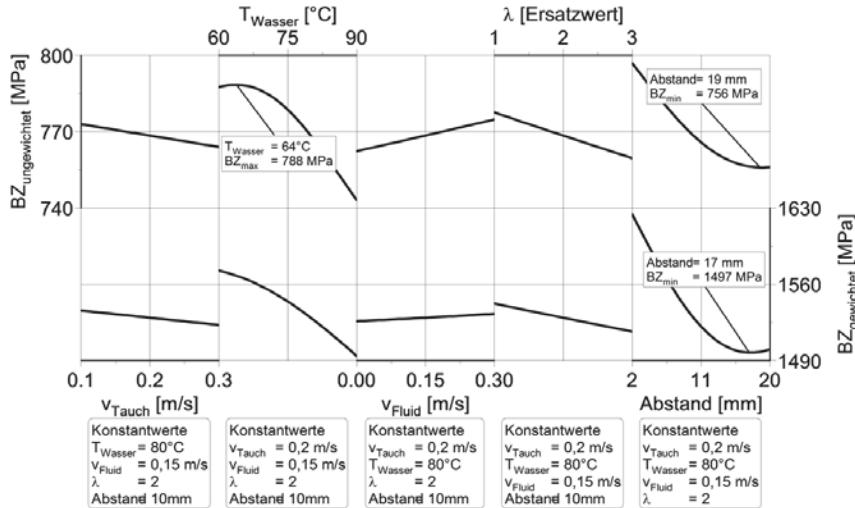


Bild 2: Einfluss der varierten Parameter bei Wasserabschreckung auf die resultierende Spannung aus Eigenspannung und Montagebeanspruchung im Zylinderkopf

Auffällig und signifikant ist speziell der Einfluss des Abstandes zwischen den Zylinderköpfen auf der Rollenbahn der Wärmebehandlungsanlage. Beim Verlauf stellt sich ein lokales Minimum ein. Wie oben beschrieben, soll bei der Optimierung des Eigenspannungszustandes das Minimum innerhalb der Parametergrenzen ermittelt werden. Während die 4 weiteren Parameter ihr Minimum an den Parametergrenzen haben, stellt sich das Minimum des Abstandes innerhalb der Parametergrenzen ein. Somit ist die Handhabung von Zylinderköpfen in der Wärmebehandlung ein wichtiger Ansatzpunkt zur Optimierung des Eigenspannungszustandes.

### 3.5. Auswertung der Lagevariation beim Wasserabschrecken

Neben den Strömungsparametern können auch Eintauchlage und Handhabung der Zylinderköpfe variiert und der Einfluss auf die entstehenden Eigenspannungen untersucht werden. Auf Basis der berechneten Temperaturfelder der einzelnen Positionen und Eintauchlagen werden die jeweiligen Eigenspannungszustände berechnet und mit den ebenso berechneten (thermo-) mechanischen Beanspruchungen überlagert. Die daraus ermittelten Bewertungszahlen sind in Bild 3 grafisch dargestellt.

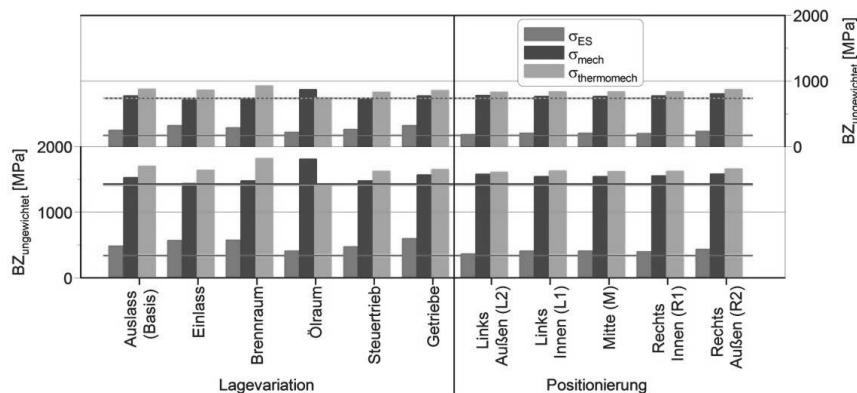


Bild 3: Gegenüberstellung der Bewertungszahlen aus der Lagevariation

### 3.6. Auswertung des DoE zum Luftabschrecken

Analog zum DoE für das Wasserabschrecken wurde ein DoE für das Luftabschrecken durchgeführt. Die Ergebnisse der Eigenspannungsberechnung mit überlagerter mechanischer Beanspruchung sind in Bild 4 grafisch dargestellt. Betrachtet man die Wärmeleitfähigkeit

keit  $\lambda$  als gegebene Größe, so zeigen lediglich Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Luft signifikante Einflüsse auf den Eigenspannungszustand.

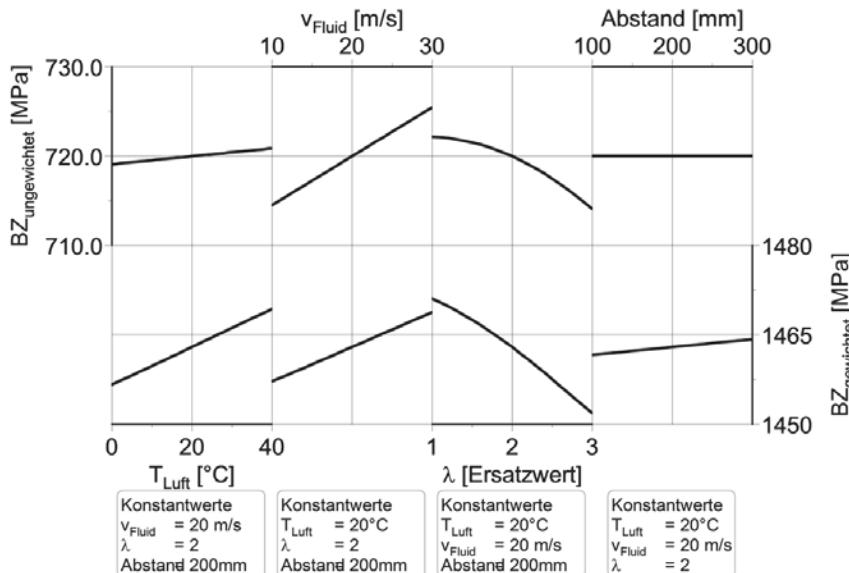


Bild 4: Einfluss der varierten Parameter bei Luftabschreckung auf die resultierende Spannung aus Eigenspannung und Montagebeanspruchung im Zylinderkopf

Bei der Betrachtung der Eigenspannungen dürfen jedoch weitere Festigkeitseigenschaft nicht ungeachtet bleiben. Das Abschrecken nach dem Lösungsglühen soll den Mischkristall im übersättigten Zustand „einfrieren“. Dauert der Prozess zu lange, so kann dieser Zustand nur schwer beibehalten werden. Die Gegenüberstellung in Tabelle 3 zeigt exemplarisch die statischen Festigkeitswerte für 2 Temperaturen.

Tabelle 3: Statische Festigkeit von luft- und wasserabgeschreckten Zylinderköpfen,  
Probenentnahme aus der Brennraumplatte

Abschreck- verfahren	Prüf- temperatur	Dehngrenze	Zugfestigkeit	Bruch- dehnung	Einschnürung
	T <sub>Mess</sub> [°C]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>30</sub> [%]	Z [%]
Wasser	22	272	317	3,0	7,6
	230	191	211	3,2	
Luft	22	194	257	4,9	9,5
	230	146	152	7,2	

### 3.7. Gegenüberstellung der der einzelnen Variationsrechnungen

Der letzte Schritt zum Finden der optimalen Wärmebehandlungsparameter für Zylinderköpfe und deren Handhabung ist das Gegenüberstellen der einzelnen Ergebnisse. Für beide statistischen Versuche (DoE) zum Wasser- und Luftabschrecken werden die berechneten optimalen Parameter der einzelnen Abschreckverfahren übernommen.

Tabelle 4: Berechnete optimale Parameter der statistischen Auswertungen (DoE) für Wasser- und Luftabschreckung

Spannungs- zusatnd	DoE	v <sub>Tauch</sub>	T <sub>Wasser</sub>	v <sub>Fluid</sub>	λ <sub>EW</sub>	Abstand	BZ <sub>ungew.</sub>	BZ <sub>gew.</sub>
-	-	m/s	°C	m/s	-	mm	MPa	MPa
σ <sub>ES</sub> + σ <sub>mech</sub>	Wasser	0,3	90	0	2	16	722	1466
	Luft		0	30	2	100	725	1461
σ <sub>ES</sub> + σ <sub>mech</sub> + σ <sub>thermomech</sub>	Wasser	0,1	90	0	2	20	810	1621
	Luft		0	30	2	300	910	1732

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse bietet sich ein Balkendiagramm wie in Bild 5 an, da auf einen Blick erkennbar ist, welche Varianten gleich, besser oder schlechter hinsichtlich ihrer Bewertungszahl sind. Die minimal erreichte Bewertungszahl wird mithilfe einer horizontalen Linie abgebildet. Somit können Varianten identifiziert werden, die auf dem gleichen Niveau der Bewertungszahl liegen und demzufolge in der Fertigung theoretisch angewandt werden können.

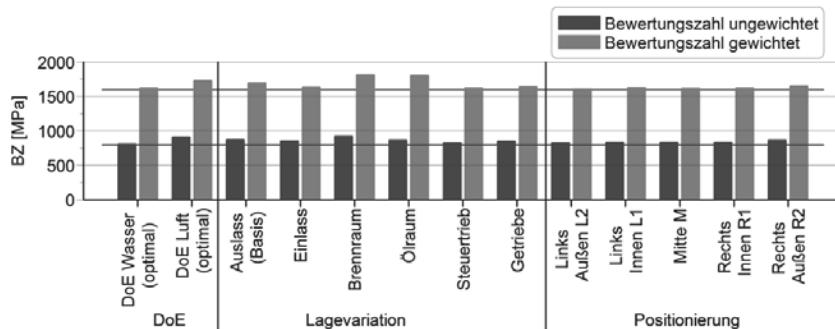


Bild 5: Gegenüberstellen der berechneten Varianten

Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle, dass die Varianten, welche nicht mittels DoE ausgewertet wurden, durchaus noch Potentiale zur Reduzierung der Bewertungszahl besitzen und untersucht werden können. Dabei muss man sich zunächst Gedanken machen, ob die eine oder andere Eintauchlage in einer Großserienfertigung handhabbar ist.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass man mittels statistischer Versuchsdurchführung (DoE) den optimalen Eigenspannungszustand im Zylinderkopf finden kann, der beim "DoE Wasser(-abschrecken)" zur niedrigsten Bewertungszahl führt. Die gewichtete Bewertungszahl liegt etwa 5% unterhalb der Berechnung "Auslass (Basis)" mit den Basis-Serien-Parametern. Bedenkt man, dass die Basis-Serien-Parameter bereits das Ergebnis einer empirischen Optimierung sind, zeigt sich somit, dass noch weiteres Potential mittels Berechnung ausgeschöpft werden kann.

- [1] DE-P 396946
- [2] DE-P 4401228 A1
- [3] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013
- [4] Macherauch, E., Scholtes, B.: Die Bedeutung von Eigenspannungen und die Problematik ihrer Erfassung, Deutscher Verband für Materialprüfung e.V., 1987
- [5] Gibmeier, J., Scholtes, B., Schulz, V., Zinn, V., Lang, K.-H., Beck, T.: Entstehung, Ermittlung und Bewertung von Eigenspannungen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015

# Die Zylinderköpfe der neuen Porsche Boxermotorenfamilie

## The cylinder heads of the new Boxerengine family by Porsche

Dipl.-Ing. (FH) **Günter Vogelezang**, Dipl. Ing. (FH) **Jürgen Anhalt**,  
Dipl. Ing. **Holger Kämpfe**, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach

### Einleitung

Für die neue Generation der Porsche Sportwagen 911 Carrera und 718 Boxster/Cayman wurde eine komplett neue Boxermotorenfamilie mit Turboaufladung entwickelt. Erstmals kommen in diesen Sportwagenmodellen statt Saugmotoren turboaufgeladene Boxermotoren zum Einsatz. Die Motorenfamilie verfügt über einen Hubraumbereich von 2,0 bis 3,0 Liter, mit einem Leistungsspektrum von 300 bis 420 PS.

Das für alle 9A2-Motoren neu entwickelte Brennverfahren unterstützt diese Ansprüche seitens der Zylinderköpfe mit folgenden Merkmalen:

- zentrale Injektorlage
- Tumble-Einlasskanäle

Die zentrale Injektorlage verhilft hierbei zu einer deutlichen Verbesserung gegenüber den Vorgängermotoren hinsichtlich Effizienz und Emissionierung, insbesondere unter den Randbedingungen eines abgasturboaufgeladenen Betriebs. Spezielles Augenmerk liegt verbrennungsluftseitig auf einer möglichst effizienten Gestaltung der Einlasskanäle mit einer optimalen Kombination von Tumbleniveau und Durchflusskennziffer im Spannungsfeld mechanischer Anforderungen, Emissionen und Kraftstoffverbrauch.

Im Zuge dessen entstanden sechs Zylinderköpfe als Familie mit einem Satz Zylinderköpfe des Sechszylinder-Boxermotors mit einer Zylinderbohrung mit Durchmesser 91 Millimeter und zwei Satz Zylinderköpfe der Vierzylinder-Boxermotoren mit den Zylinderbohrungen mit Durchmesser 91 Millimeter und 102 Millimeter.

## 1. Anforderungen

Die Grundlage der Neukonstruktion der Zylinderköpfe waren die zentrale Lage der Injektoren und die Tumble-Einlasskanäle. Diese Konstruktionsmerkmale mussten mit den beiden Zylinderbohrungen mit den Durchmesser 91 Millimeter und 102 Millimeter sowie den Derivaten mit vier und sechs Zylindern in jeweils unterschiedlichen Fahrzeugbauräumen kombiniert werden. Gleichzeitig galt es einige Bauteile der vorherigen Generation zu übernehmen und neue Komponenten als Gleichteile auszuführen. Zu guter Letzt waren im Sinne von flexibler Fertigung Einrichtungen beim Gießen, der Bearbeitung und Montage entweder zu übernehmen oder aber neue Einrichtungen einheitlich auszuführen.

Beim letzten Projekt wurden die Zylinderköpfe trotz der aufwendigeren Gusstechnik bewusst einteilig ausgeführt, um die Anzahl der Bauteile zu minimieren und potentielle Leckagen an flüssiggedichteten Dreiländerecken und Flanschen zu vermeiden. Um diese effektive Struktur der Triebwerke beizubehalten, mussten die Zylinderköpfe trotz der gestiegenen technischen Inhalte, wie die Ventilhubumschaltung und Nockenwellenverstellung auf der Auslassseite, weiterhin einteilig ausgeführt werden.

Damit die guten Eigenschaften der Legierung AlSi7MgCu0,5 T6air weiterhin genutzt werden konnten, musste die Grenztemperatur von maximal 250 Grad Celsius im Brennraum auch bei den künftigen Ausbaustufen eingehalten werden. Gleichzeitig musste ein niedriges Spannungsniveau in der gesamten Struktur trotz der deutlich gestiegenen spezifischen Leistung erreicht werden.

Die Einbaulage der Zylinderköpfe bei Boxermotoren erfordert in Verbindung mit der komplexen Ölversorgung der Schalttassen und der hydraulischen Nockenwellenverstellung in einem einteiligen Zylinderkopf eine aufwendige Gestaltung der Sandkerne der Ölräume. Insbesondere ist die Rückförderung des Öls in den Nasssumpf auch unter den für die Porsche Sportwagen typischen sehr hohen Quer- und Längsbeschleunigungen in allen Betriebsbereichen sicherzustellen.

Zur Verbesserung der Akustik und der Fahrdynamik sollten die Vierzylinder-Mittelmotoren im 718 Boxster/Cayman oberhalb der Zylinderkopfhauben die Motortragarme zur Motorlagerung aufnehmen. Dieser zusätzlichen Belastung musste trotz des Ziels, die Sandkerne der Kettenkästen identisch mit den Sechszylinder-Boxermotoren auszuführen, Rechnung getragen werden.

## 2. Konzept

### 2.1 Konstruktionsmethodik

Entsprechend der funktionellen Bedeutung wird ein Zylinderkopf von innen nach außen entwickelt. Damit ergibt sich die nachstehende Reihenfolge:

1. Thermodynamik (Brennraum/Kanäle/Zündkerze/Injektor)
2. Kühlung (Wassermantel)
3. Ölversorgung (Ölsystem)
4. Rückförderung des Öl und Kurbelgehäuseentlüftung (druckloser Ölraum)
5. Gesamtstruktur

#### 2.1.1 Auslegung Thermodynamik

Die Konstruktion einer Zylinderkopffamilie beginnt mit der Positionierung der thermodynamisch-relevanten Geometrien des Brennraums, der Kanäle, der Zündkerze und des Injektors. Die daraus resultierenden CAD-Modelle (Computer Aided Design) sind für die spätere numerische Optimierung parametrisiert und beinhalten bereits alle zur Herstellung notwendigen Eigenschaften wie etwa Entformbarkeit (siehe Bild 1).



Bild 1: CAD-Modell des 2,5-Liter-Vierzylinders zur Strömungsberechnung

#### 2.1.2 Auslegung Kühlung

Nach der Festlegung der Kanäle und des Brennraums folgt die Konstruktion des Wassermantels mithilfe assoziativer Offsets der Kanäle und des Brennraums. Damit lassen sich Änderungen an den Kanälen oder am Brennraum innerhalb von wenigen Stunden in den Wassermantel übertragen.

Im Zuge der Entwicklung wurden auch zweiteilige Konzepte untersucht. Diese brachten jedoch hinsichtlich der Kühlung keinerlei Vorteile und erhöhten nur den Fertigungs- und Prüfaufwand, wie auch eine zu erwartende Verschlechterung der Qualitätszahlen.

Größten Wert musste auch auf eine maximale Ausrundung speziell in den Bereichen mit hohen Zugspannungen und eine ausreichende Verrippung in den Kraftpfaden gelegt werden.

### 2.1.3 Auslegung Ölsystem

Die Ölversorgung der Schalttassen und hydraulischen Nockenwellenversteller ist im Ölsystem darzustellen. Aufgrund der Umstellung von seitlicher auf zentraler Injektorlage konnten die Ölgalerien zur Versorgung der Nockenwellenlager, des hydraulischen Spielausgleichs und der Schaltseite der Tassenstößel nicht mehr in Form einer geraden Tieflochbohrung in einem einteiligen Zylinderkopf realisiert werden.

Die möglichen Lösungsansätze waren:

- Die Zylinderköpfe mehrteilig auszuführen: damit steigen die Kosten, das Gewicht, der Bauraumbedarf und das Leckagerisiko.
- Die Zylinderköpfe deutlich zu verbreitern: damit werden die Ventilwinkel bedeutend größer und die Brennräume erhalten eine sehr ungünstige Form.
- Separate Rohre oder Leitungen für die Ölführung: diese sind ohne zusätzlichen Bau- raum nicht unterzubringen und die Kosten beziehungsweise das Gewicht steigen.
- Die Integration der Ölführung in die Ventilhauben: die notwendigen Tieflochbohrungen im Druckguss steigern das Risiko von Leckagen erheblich.
- Vorgegossene Ölgalerien: mit dem Entfall der aufwendigen Bearbeitungen erhält man die konstruktiven Freiheitsgrade der Gusstechnik, die aber den prozesstechnischen Risiken wie beispielweise Sandanhäufungen, größere Toleranzen und Kernbrüchen gegenüber stehen.

Nach Konzeptstudien wurden schließlich die vorgegossenen Ölgalerien als zielführende Lösung ausgewählt (siehe Bild 2).

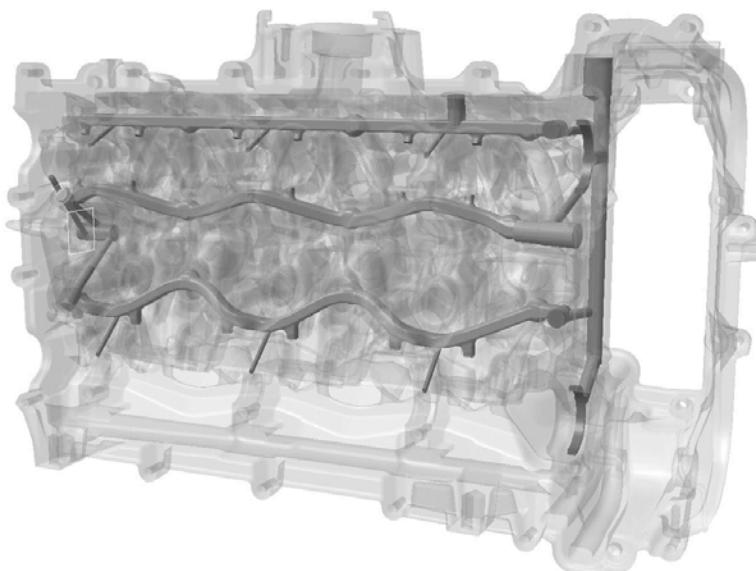


Bild 2: Ölsystem des 3,0-Liter-Sechszylinders der Zylinderbank 1

#### 2.1.4 Druckloser Ölraum

Der drucklose Ölraum ist einerseits zur Aufnahme der Ventiltriebsteile ausgelegt, andererseits trägt dieser Bereich an einem Boxermotor maßgeblich zur sicheren Rückförderung des Öls bei. Hierzu befindet sich auf der untenliegenden Auslassseite ein Sammelkanal, der bis zu den beiden Absaugstellen im Kettenkasten und der Getriebeseite reicht. Die getriebeseitige Absaugstelle wird durch einen Kanal in der Ventilhaube mit einem der beiden Saugkanäle im Kettenkasten verbunden, welche für das eigentliche Absaugen notwendig sind. Diese können vorgegossen oder bearbeitet sein. Durch dieses System wird die Ölabsaugung beim Beschleunigen und beim Bremsen sichergestellt (siehe Bild 3).

Zur guten Vorabscheidung des Öls aus dem Blow-By-Gas hat sich die Gasentnahme oberhalb der Einlassnockenwellen bewährt. Um den steigenden Ansprüchen an die Ölabscheidung gerecht zu werden, musste bei der Konstruktion der Ölkerne auch die Gasströmung und der Ölrücklauf optimiert werden.

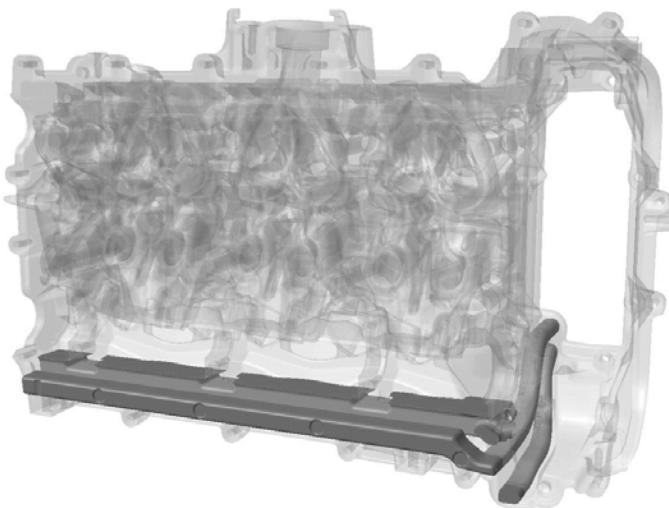


Bild 3: Ölrückförderung des 3,0-Liter-Sechszylinders der Zylinderbank 1

### 2.1.5 Auslegung Gesamtstruktur

Neben den oben erwähnten Funktionen der Zylinderköpfe waren sämtliche Schnittstellen zu den angrenzenden Bauteilen sowie deren Dichtsysteme in die Konstruktion einzubringen. Speziell die Übernahmeteile der alten und die Gleichteile der neuen Generation bedingten ein großes Maß an Abstimmung. Bedeutenden Einfluss auf die Gesamtkonstruktion hatten letztlich die Anforderungen der Fertigungsbereiche Guss, Bearbeitung und Montage. Diese wurde früh allumfassend abgestimmt, um den Änderungsumfang klein zu halten.

## 2.2 Simulationsmethoden

### 2.2.1 Thermodynamik

Mit den zentralen Geometrien der Brennräume und Kanäle erfolgten numerische Optimierungen mittels der parametrischen CAD-Modelle, um gleichermaßen den Durchflussbeiwert  $\alpha_k$  und die Ladungsbewegung zu maximieren. Bei diesen CFD-Rechnungen (Computational Fluid Dynamics) wurden 15 Parameter des Einlasskanals variiert und rund 2000 Varianten berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Bild 4 dargestellt.

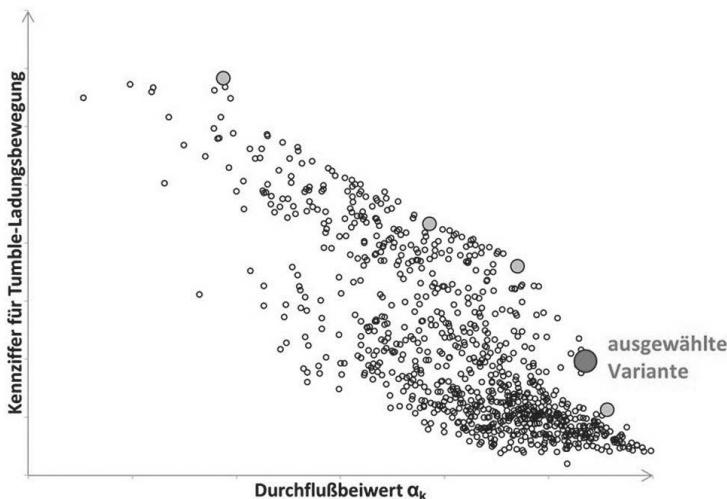


Bild 4: Einlasskanalentwicklung am Beispiel des 2,5-Liter-Motors

Aus diesen 2000 Varianten wurden 5 an der rechten Grenze des Streubandes, der sogenannten Paretofront, nochmals eingehend im Hinblick auf die Gemischaufbereitung (siehe Bild 5) und Verbrennung untersucht. Schließlich wurde die im Diagramm markierte Variante in den Serienwerkzeugen umgesetzt, weil diese trotz der guten Zylinderfüllung auch eine gute Homogenisierung des Gemisches und eine rasche Verbrennung ermöglichte.

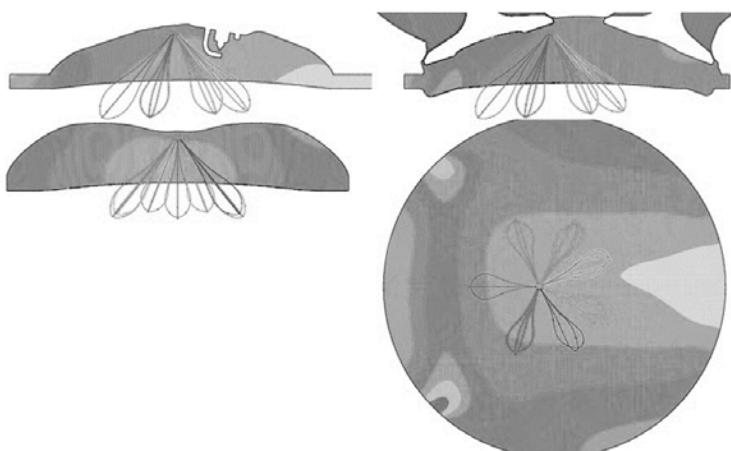


Bild 5: Lambdaverteilung des 2,5-Liter-Motors

## 2.2.2 Kühlung

Die Wassermäntel der Zylinderköpfe und des Kurbelgehäuses wurden mittels CFD hinsichtlich den Strömungsgeschwindigkeiten, Wärmeübergangszahlen und Druckverlusten optimiert (siehe Bild 6).

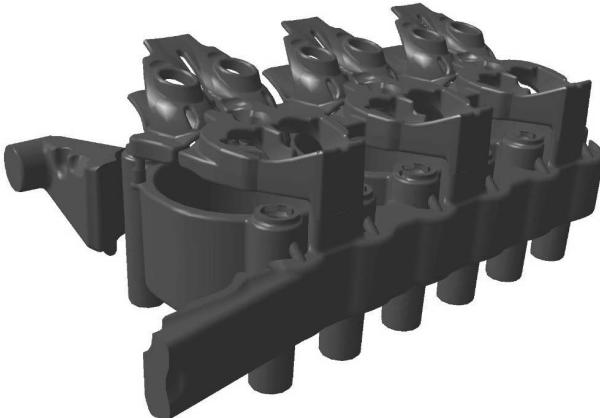


Bild 6: Berechnungsmodell des Sechszylinder-Wassermantels der Zylinderbank 1

## 2.2.3 Ölsystem

Das Druckölsystem wurde mit 1D- und CFD-Simulationen im Hinblick auf die Strömungsgeschwindigkeiten, die Durchsätze und die Druckverluste optimiert (siehe Bild 7).

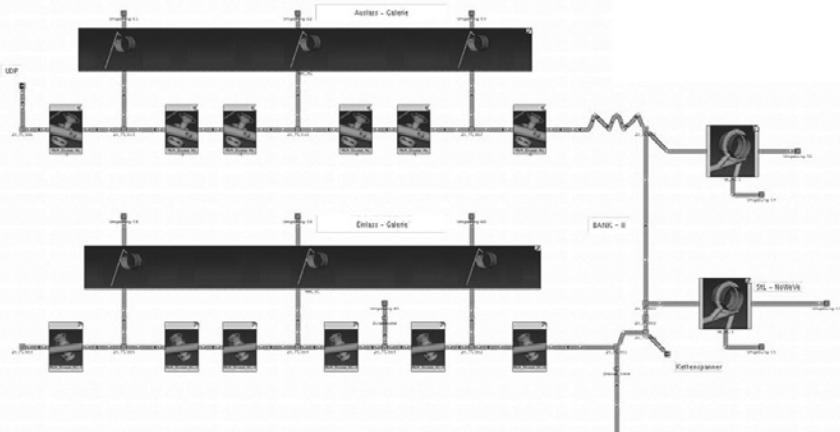


Bild 7: 1D-Schalschema des Drucköls im Sechszylinderkopf der Zylinderbank 2

Aufgrund geringerer Druckverluste im gesamten Ölsystem kann die Ölpumpe mit einem geringeren Druck betrieben werden. Damit reduziert sich die Antriebsleistung und die Öldurchsätze. Letzteres sorgt infolge von reduzierten Panschverlusten zusätzlich für einen geringeren Reibmitteldruck.

## 2.2.4 Druckloser Ölraum

Der drucklose Ölraum der Zylinderköpfe und der Ventilhauben wurde als Teil der Kurbelgehäuseentlüftungen mit CFD zur Bewertung der Strömungsgeschwindigkeiten, der lokalen Druckverluste und den Ölabscheidung berechnet (siehe Bild 8). Gemäß den Ergebnissen wurden Ölrücklaufbohrungen und Schraubbutzen zwecks besserer Gasführung verschoben, um die Ölabscheidung zu verbessern. Die Kurbelgehäuseentlüftung hat Einfluss auf die Emissionierung und den Gasgehalt des Motorenöls unter hohen Quer- und Längsbeschleunigungen.

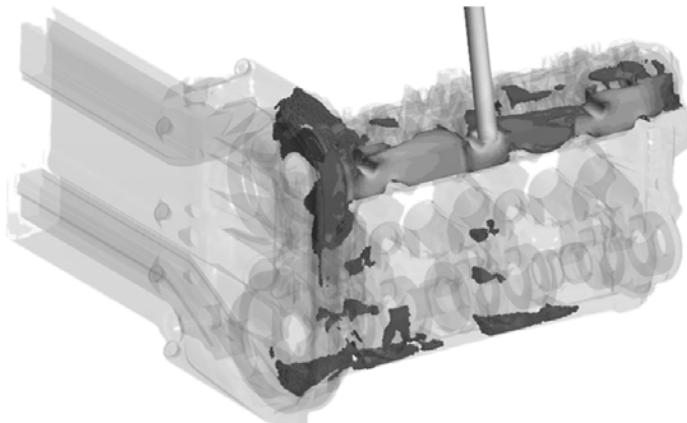


Bild 8: Berechnungsmodell des drucklosen Ölraums des Sechszylinders der Zylinderbank 2

## 2.2.5 Gesamtstruktur

Der Verband von Kurbelgehäuse, Zylinderkopfdichtung, Zylinderkopf, Nockenwellenlagerung und Ventilhaube wurde früh als Segmentmodell (siehe Bild 9) und später als Vollmodelle (siehe Bild 10) zur Bewertung der Temperaturen, Spannungen und Sicherheiten berechnet. Mit diesen Modellen erfolgte auch die Auslegung der Dichtsysteme, insbesondere die Topographie der Stopper und Sicken der Zylinderkopfdichtungen.

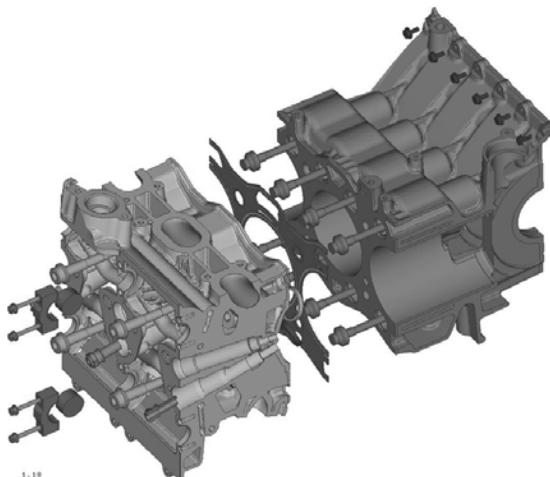


Bild 9: FEM-Segmentmodell des 2,5-Liter-Vierzylinders

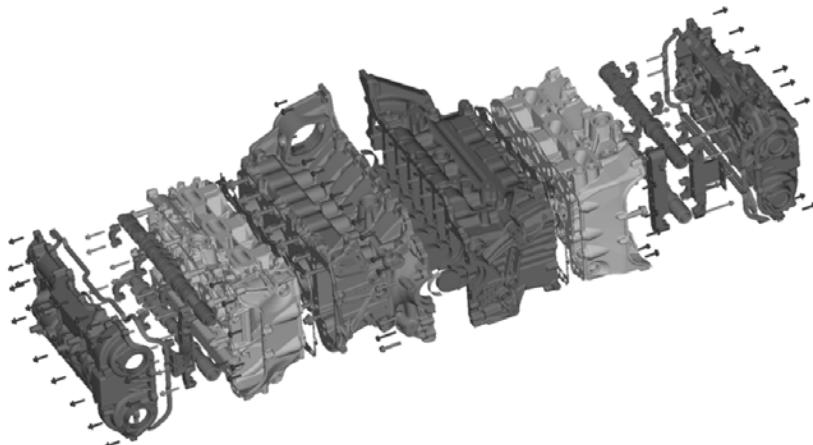


Bild 10: FEM-Vollmodell des 3,0-Liter-Sechszylinders

## 2.2.6 Gießsimulation

Auf Basis der detaillierten Sandguss-Konstruktionen erfolgten neben den Machbarkeitsanalysen zum Guss und der Bearbeitung auch die ersten Gießsimulationen. Mit diesen gießtechnischen Verbesserungen hatten auch die Zylinderköpfe aus Sandguss eine hinreichende Nähe zum späteren Kokillenguss, um die notwendige Designverifikation vor der Erstellung der Kokillen zu ermöglichen.

### 2.3 Entwicklungsmethodik

Durch die kaskadierte Entwicklung (siehe Bild 11) hatte die Konstruktion zu einem frühen Zeitpunkt schon eine sehr hohe Entwicklungsreife in Bezug auf Funktion und Herstellbarkeit. Daher konnte die Produktion der Serienwerkzeuge mit einem validen Designstand erfolgen. In der Folge fielen wenige Änderungen an und die Prozessentwicklung konnte sich auf die Qualität der Bauteile fokussieren. Dies führte zu qualitativ sehr hochwertigen Bauteilen und verursachte geringe Änderungskosten.

Mit Hilfe der durchgehenden Prozesskette waren im Wechselspiel von Konstruktion und Simulationen bis zum kompletten CAD-Datensatz kurze Konstruktions- und Änderungszeiten möglich. Die Freigaben der drei Satz Rohteile erfolgten innerhalb von sechs Wochen.

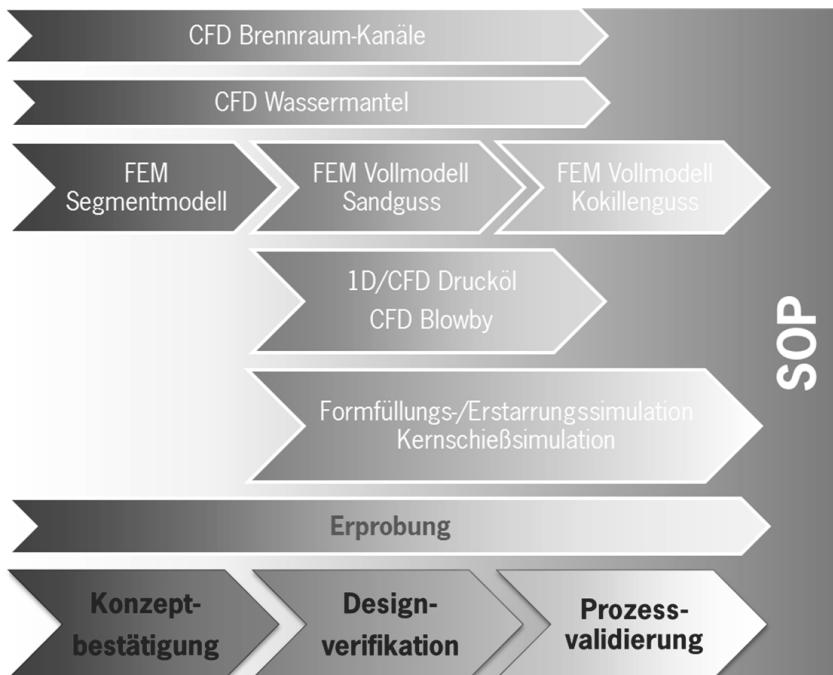


Bild 11: Vorgehensweise bei der Zylinderkopfentwicklung

### 3. Das Rohteil

#### 3.1 Gießverfahren, Legierung und Wärmebehandlung

Beim Vorgängerprojekt wurde erfolgreich von Kopfguss auf Rotacast umgestellt. Hierdurch konnte der komplexen Gestalt der Boxermotoren-Zylinderköpfe mit einer adäquaten Formfüllung begegnet werden. Aufgrund der sehr guten Erfahrung im Hinblick auf die anhaltende Prozesssicherheit und die hohe Ausbringung wurde Rotacast auch bei den neuen Zylinderköpfen zum Einsatz gebracht.

Die Legierung AlSi7MgCu0,5 T6 mit Luftabschreckung wurde wegen der guten Erfahrungen hinsichtlich Gewicht, Korrosion, mechanische Kennwerte sowie Gieß- und Zerspanbarkeit und deren Wärmebehandlung unverändert übernommen.

#### 3.2 Formaufbau

Die Erkenntnisse aus der Erprobung der Sandgussteile, der Strukturberechnung und der Gießsimulation der Kokillenkonstruktion ergaben schließlich das finale Design zur Erstellung der Serienwerkzeuge.

Die Rotacast-Kokille besteht aus der Grundplatte mit gekühlten Brennraumeinsätzen und vier Seitenschiebern. Die beiden Ein- und Auslassschieber können zur besseren Zugänglichkeit nach außen geklappt werden.

Die Kühlung der Zylinderköpfe wird durch einteilige Wassermantelkerne mit einem Schieber auf der Auslassseite dargestellt. Die Wassermäntel der Zylinderköpfe sind wie bei Porsche üblich nur mit brennraumseitigen Kernmarken ohne zusätzliche Entlüftungen nach oben und ohne aktive Absaugung ausgeführt.

Die Ein- und Auslasskanäle sind jeweils auf einer Kernleiste zusammengefasst und werden durch Kernabstiege direkt auf der Grundplatte gelagert, um die Positionstoleranzen der Kanäle gering zu halten. Die Bereiche zwischen den Kanälen werden durch hammerförmige Geometrien auf der Kanalleiste zur maximalen Gewichtsreduktion geformt.

Die Wassermäntel, wie auch die Kanalkernleisten, sind pro Derivat für beide Bänke gleich und können auf Umschlag in die Kokillen beider Zylinderbänke einlegt werden. Dies kommt einer flexibleren Fertigung entgegen und erhöht die Ausbringung.

Für die drei Satz Zylinderköpfe gibt es bankweise jeweils nur einen Kettenkastenkern. Gleichermaßen gilt für die beiden Ölabsaugkanalpaare, welche auf Kernmarken oben und unten zusammengefasst sind und zwecks Reduktion der Positionstoleranzen an die Kernmarken der Kettenkastenkerne geklebt werden.

Ein Ölraum besteht als verklebtes Kernpaket entsprechend der Montagefolge aus folgenden Sandkernen:

- Dem Deckkern, der über der eigentlichen Zylinderkopfkontur liegt und über den die Speiser frei gestaltet werden können. Der Deckkern bildet auf der Unterseite die Vorgießung der Nockenwellenlager und den Höcker zur Aufnahme der Hochdruckpumpe ab.
- Dem oberen Ölkerne im Bereich der Nockenwellenlagerstühle und des Flanschs der Ventilhaube.
- Den beiden Kernen für die Ölgalerien, welche die Längsleitungen und die Stichkanäle zu den Tassen enthalten.
- Dem unteren Ölkerne im Bereich der Federtellerauflagen und Zylinderkopfschrauben bis hinunter zum Offset des Wassermantels.

Für einen Zylinderkopf werden insgesamt zehn Kerne benötigt. Der Wassermantel und die Ölgalerien werden im Hotboxverfahren, die anderen Kerne im Coldboxverfahren hergestellt. In der Tabelle 1 sind alle zur Herstellung der sechs Zylinderköpfe notwendigen Werkzeuge aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht der notwendigen Werkzeuge (WZ)

	3,0-Liter-Sechszylinder		2,0-Liter-Vierzylinder		2,5-Liter-Vierzylinder		Summe Werkzeuge
	Bank 1	Bank 2	Bank 1	Bank 2	Bank 1	Bank 2	
Kokille	1. WZ	2. WZ	3. WZ	4. WZ	5. WZ	6. WZ	6
Wassermantel	1. WZ		2. WZ		3. WZ		3
Einlasskanal	1. WZ		2. WZ		3. WZ		3
Auslasskanal	1. WZ		2. WZ		3. WZ		3
Kettenkasten	1. WZ	2. WZ	1. WZ	2. WZ	1. WZ	2. WZ	2
Ölabsaugkanal	1. WZ	2. WZ	1. WZ	2. WZ	1. WZ	2. WZ	2
Deckkern	1. WZ	2. WZ	3. WZ	4. WZ	5. WZ	6. WZ	6
oberer Ölkerne	1. WZ	2. WZ	3. WZ	4. WZ	5. WZ	6. WZ	6
Ölgalerie Einlass	1. WZ	2. WZ	3. WZ	4. WZ	5. WZ	6. WZ	6
Ölgalerie Auslass	1. WZ	2. WZ	3. WZ	4. WZ	5. WZ	6. WZ	6
unterer Ölkerne	1. WZ	2. WZ	3. WZ	4. WZ	5. WZ	6. WZ	6
Gesamtmenge Werkzeuge							49

Das Bild 12 zeigt den kompletten Aufbau der formgebenden Geometrien des Zylinderkopfes des Sechszylinders der Zylinderbank eins.

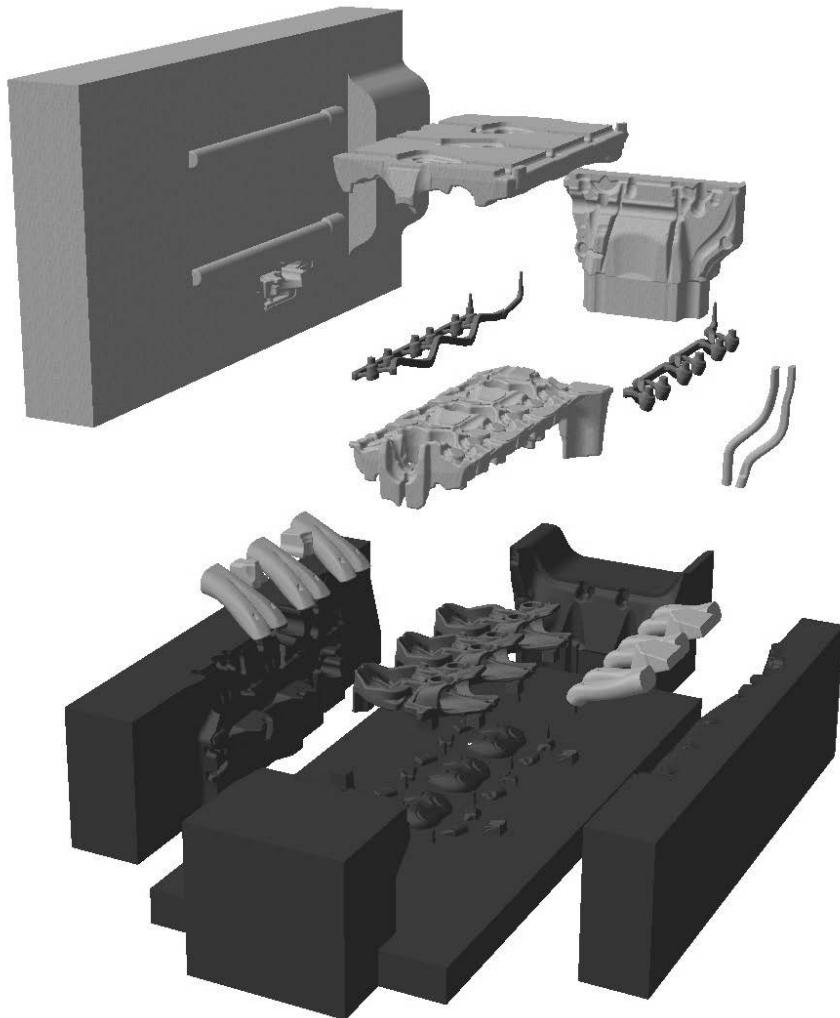


Bild 12: Übersicht der formgebenden Geometrien des Sechszylinderkopfs der Zylinderbank 1

### 3.3 Prozessentwicklung Rohteil

Durch die frühe Verfügbarkeit der Serienwerkzeuge können insbesondere die in der Simulation als kritisch detektierten Stellen eingehend untersucht werden. Diese Bereiche galt es so weit zu optimieren, dass sie auch gegenüber Prozessschwankungen robust werden.

Alle gießtechnischen Optimierungen wurden zunächst durch Simulationen bewertet. Erst nach positiven Beurteilungen erfolgten Änderungen an den Werkzeugen und im Anschluss die Verifizierung anhand der Gussteile. Auch funktional notwendige Änderungen wurden stets simuliert bevor diese in die Werkzeuge eingebracht wurden.

### 3.4 Gießentwicklung am Beispiel der Kettenkastenschrauben

Die Bildung der Lunker wird stark von der Konstruktion selbst beeinflusst. Die Erfahrung zeigt, dass Priorität bei der Reduktion von Lunkern folgende sein muß:

1. Materialabbau
2. Kühlung
3. Speisung

Als gutes Beispiel können die Butzen der Kettenkastenschrauben herangezogen werden. Aus der Entwicklung der vorherigen Zylinderköpfen waren sowohl die Porositätsanzeichen in der Simulation als auch deren Lunker- und Leckageneigung bekannt. Ebenso war klar, dass über die Höhe der Kettenkastenwand im zur Verfügung stehenden Bauraum, mit vertretbarem Materialeinsatz und Zugänglichkeit der Bearbeitung, keine ausreichende Speisung von oben möglich ist.

In der Gießsimulation zeigten sich diese Lunker teilweise und mit wechselnder Intensität. Daher wurde beschlossen, die Serienwerkzeuge zunächst ohne zusätzliche Maßnahmen in diesem Bereich zu erstellen. Die ersten Abgüsse aus der Kokille hatten zum Teil leichte Lunkeranzeichen. In mehreren Schritten wurden die Bohrungen vorgegossen, Material um die Butzen reduziert und kleine Kühlrippen in die Kokille eingebracht. Letztere erhöhen zwar lokal die Masse, können aber über die vergrößerte Oberfläche und damit gesteigerte Wärmeabfuhr die gerichtete Erstarrung beschleunigen (siehe Bild 13).

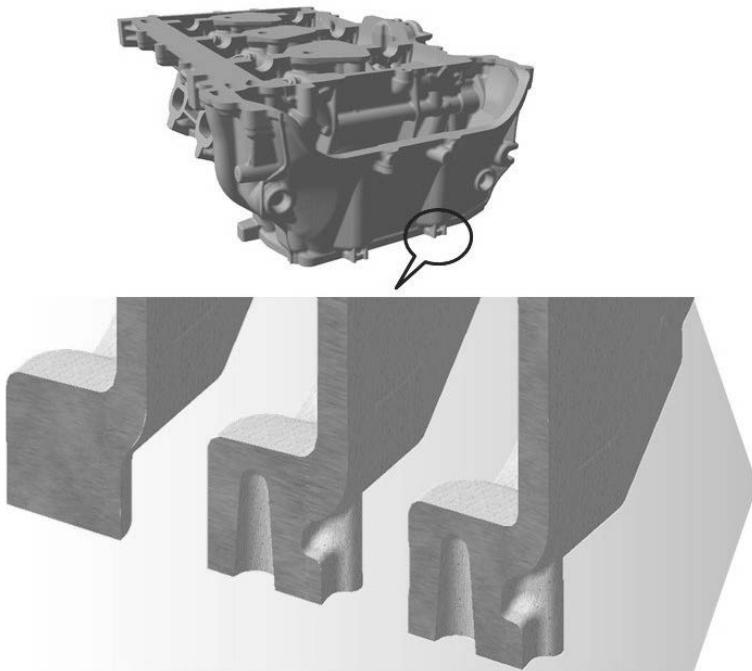


Bild 13: Optimierung Schraubenbutzen an der Kettenwand

### 3.5 Vorgegossene Ölgalerien

#### 3.5.1 Designfindung

Wie schon unter Kapitel 2.1.3 beschrieben, konnten die Zylinderköpfe durch leiterartige Ölkanäle weiterhin einteilig ausgeführt werden. Die notwendigen Sandkerne beinhalten neben den Längsgalerien auch die Stichkanäle zu den Tassenstößel (siehe Bild 14). Die inneren Galerien winden sich dabei schlängelnd um die Tassenbohrungen, Zylinderkopfschrauben und Kerzen- beziehungsweise Injektorschächte.

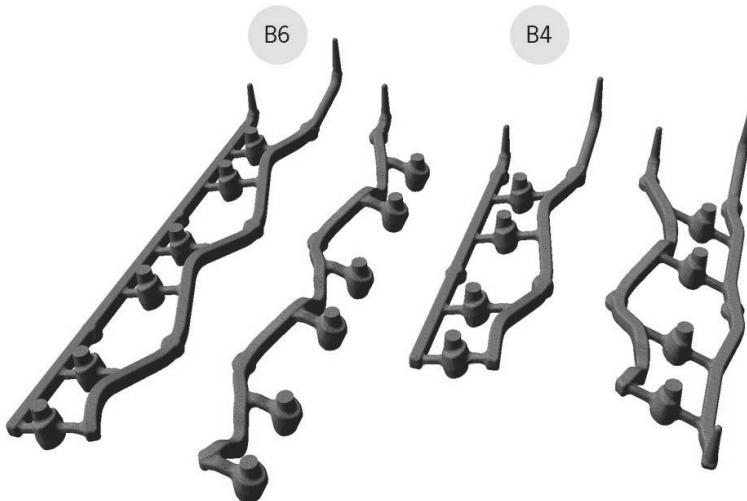


Bild 14: Vergleich der Ölgalerien des Sechs- und Vierzylinders der Zylinderbank 1

Die Kernlagerung erfolgt mit den als Kernmarken ausgebildeten Vorgießungen der Tassenbohrungen. Die Kernmarken werden über die Stichkanäle zur Ölversorgung des hydraulischen Ventilspielausgleichs und der Betätigung der Hubumschaltung mit den Längsgalerien verbunden (siehe Bild 15). Weitere Kernlager finden sich im Kettenkasten in Form von hakenförmigen Kernmarken, die im Kettenkasten bei der Bearbeitung entfernt werden.

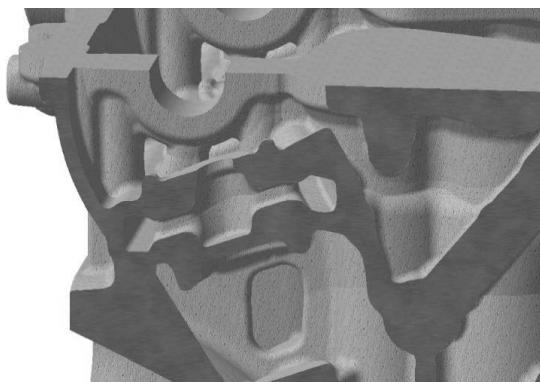


Bild 15: Detailansicht der Kernlagerung der Einlassgalerie des Sechszylinders

Neben den funktionellen Anforderungen wurde bei der Gestaltung der Kerne für die Ölgalerien größten Wert gelegt auf:

- Prozesssichere Kernherstellung und Vermeidung von Sandanhaltungen oder Penetrationen über die günstige Gestaltung der Kernkästen und effektive Verdichtung des Sandes
- Sichere Kernlagerung durch gleichmäßige Abstände der Kernmarken
- Einhaltung der Lagetoleranzen und Prüfbarkeit am Rohteil durch Vermeidung über die Kernmarken hinaus ragende freie Enden.
- Gute Reinigungsfähigkeit über eine Vielzahl von Öffnungen

Das Vorgießen der Galerien erübrigt eine Vielzahl von Bearbeitungen. Diese sind teilweise durch die großen Bohrungstiefen bei relativ kleinen Durchmessern sehr zeitintensiv und damit teuer. Die Tieflochbohrungen können taktzeit-bestimmend sein und bedingen entweder Sondermaschinen oder große Bearbeitungszentren, welche zu zusätzlichem Invest führen.

### 3.5.2 Kernschießsimulation

Eine besondere Sorgfalt galt einer optimalen Verdichtung des Kerns durch bestmögliche Formfüllung und Entlüftung, um letztlich das Risiko von Sandanhaltungen und Penetrationen zu minimieren. Deshalb wurden die Ölgalerien konstruktionsbegleitend einer Kernschießsimulation unterzogen, um so die Form sowie die Positionen der Schuss- und Entlüftungsdüsen zu optimieren.

Diese Erkenntnisse haben schließlich in die Serienwerkzeuge Einzug gehalten. Die ersten Abgüsse aus den Serienwerkzeugen zeigten sogleich die sehr geringen Sandmengen noch vor den Prozessschritten Wärmebehandlung, mechanische Bearbeitung und Hochdruckwäsche.

### 3.5.3 Prüfkonzept

Im Rahmen der automatisierten Kernmontage wird zunächst die Lage der verklebten Ölgalerien mittels Laser gemessen. Die Lage der Öffnungen in den Zylinderköpfen wird mittels spezieller Taster in den Ölübergabequerschnitten gemessen. Am Rohteil erfolgt abschließend noch ein kombinierter Lecktest und eine Durchflussprüfung. Bei letzteren können Verschlüsse und Teilverschlüsse bis 30 % des Querschnittes detektiert werden. In der Entwicklung wurden gezielte Grenzmuster mit Teilverschlüssen untersucht. Diese Restquerschnitte sind

immer noch deutlich größer als die der zur Ölverbrauchsreduktion eingebrachten Drosselstellen und haben daher keine Relevanz für die Funktion.

### 3.5.4 Reinigungskonzept

Aus der Reinigung der Wassermäntel in den Zylinderköpfen ist bekannt, dass eine ausgeprägte Tiefenwirkung einer Hochdruckwäsche infolge der starken Umlenkungen nicht gegeben ist. Die ersten Versuche mit den Sandgussprototypen bestätigten zum wiederholten Male diesen Umstand.

In der Entwicklung wurden daher die alternativen Reinigungsverfahren Strahlen, Stoßwellen und Ultraschall untersucht. Infolge des sehr guten Ergebnisses über das gesamte Bauteil bei vertretbaren Kosten wurde schließlich die Ultraschallreinigung als ideales Verfahren gewählt. Die Rohteile werden vor der ersten Spannung der mechanischen Bearbeitung in einem fünfstufigen Prozess mittels Ultraschall gereinigt.

Die Ultraschallanlage verfügt über zwei Ultraschallbecken, zwei Spülbecken und einer Trocknung. In allen Becken werden die Zylinderköpfe während der Reinigung mehrmals getaucht und um die Längsachse gedreht. Die Bearbeitungszeit erfolgt im Abgleich mit der Taktzeit der mechanischen Bearbeitung.

## 4. Mechanische Bearbeitung

### 4.1 Auslegung der mechanischen Bearbeitung

Bereits zu Beginn der Entwicklung der neuen Zylinderköpfe war klar, dass die bestehende Bearbeitungslinie für die neuen nicht verwendet werden kann. Daher begann die Entwicklung zunächst mit der Retrospektive des vorangegangenen Projekts.

Wesentliche Ansätze zu Verbesserungen fanden sich in den Bereichen:

- Der Bearbeitung vor allem im Sinne der Taktzeitreduktion
- Vollautomatisiertes Teilehandling zur Reduktion von Beschädigungen
- Des Spannkonzepts durch den Einsatz von Adapterplatten (siehe Bild 16), um gleichermassen die Vier- und Sechszylinderköpfe bearbeiten zu können
- Die Vermeidung von Graten durch günstige Gestaltung der Übergänge von den Rohkonturen zur Bearbeitung
- Reinigungsfähigkeit durch vorteilhafte Formgebung der Sandkerne

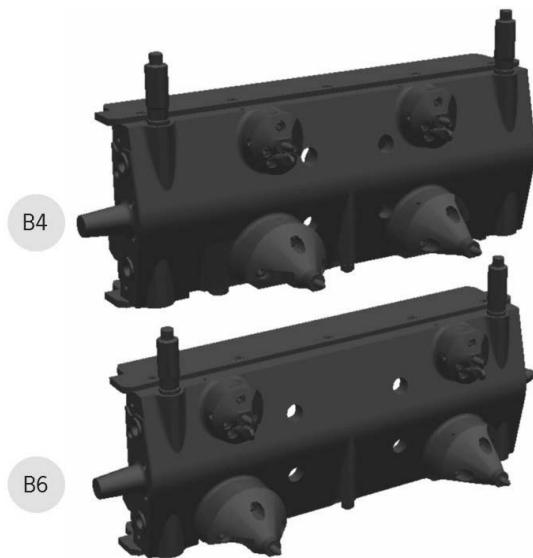


Bild 16: Adapterplatten zur mechanischen Bearbeitung der Vier- und Sechszylinderköpfe

Infolge der gemeinsamen Designfindung der Rohteile und der Bearbeitung zwischen Gießer, Bearbeiter und OEM (Original Equipment Manufacturer) konnte die Konstruktion der sechs Zylinderköpfe effektiv abgestimmt werden. Neben der kurzen Termschiene konnte der Änderungsumfang während den Prozessentwicklungen klein gehalten werden.

#### 4.2 Prozessentwicklung Bearbeitung

Die Prozessentwicklung begann mit der Inbetriebnahme der Serienbearbeitung. Dabei war zu Beginn eine Synchronisierung mit der Prozessentwicklung der Rohteile notwendig, denn die Vielzahl der Bearbeitungsschritte bedingt eine große Anzahl von Einfahrteilen. Diese wiederum konnten in diesem Stadium nur durch eine umfangreiche Planung zur Verfügung gestellt werden.

Mit der Prozessentwicklung der Bearbeitung konnten die Qualität und die Kapazität der gesamten Bearbeitungslinie während der Vorserien bestätigt werden. Die Bewertung der Zylinderköpfe nach der Bearbeitung lieferte in dieser Phase eine wichtige Rückmeldung für den Gießer in Bezug auf die Gussqualität.

## 5. Ergebnis

### 5.1 Die Zylinderköpfe

Die einteilige Ausführung mit integriertem Kettenkasten und Tassenführungen konnte dank der vorgegossene Ölgalerien umgesetzt werden. Durch die Schalttassenstößel auf der Einlassseite sind bei den Sechszylinderköpfen drei Längsgalerien notwendig. Die ein- und auslassseitigen Schalttassenstößel bedingen bei den Vierzylinderköpfen vier Längsgalerien. Des Weiteren finden sich hydraulische Flügelzellensteller auf den Nockenwellen nun auf der Ein- und Auslassseite (siehe Bild 17).

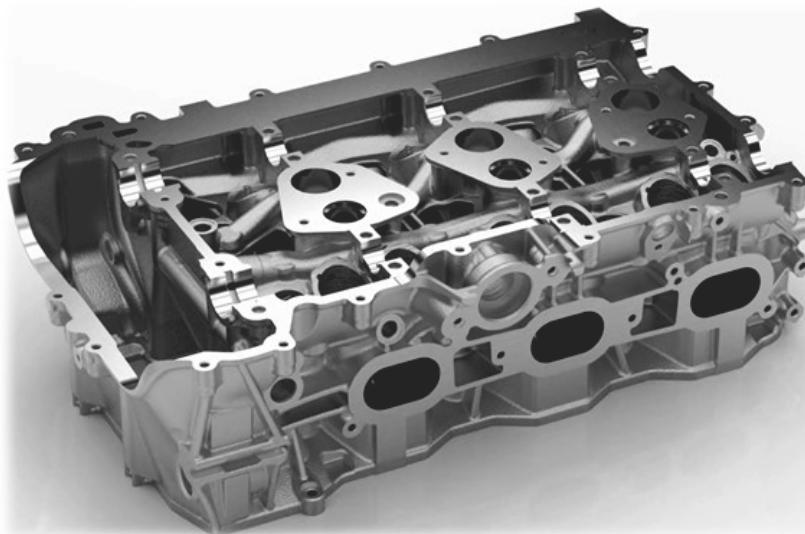


Bild 17: Zylinderkopf des 3,0-Liter-Sechszylinder der Zylinderbank 1

Der 3,0-Liter-Sechszylinder und der 2,0-Liter-Vierzylinder haben die gleichen Ventiltriebsteile und das gleiche Brennverfahren (siehe Bild 18). Der 2,5-Liter-Vierzylinder hat eine auf die größere Bohrung angepasste Anordnung der etwas größeren Ventile, wogegen der Injektor und die Zündkerzen über alle Derivate die gleichen Lagen besitzen.



Bild 18: 9A2 Zylinderkopf B6 und B4 mit zentraler Injektorlage

Kennzeichnend für das Brennverfahren sind die vier Ventile je Zylinder, die zentrale Injektorlage und die Tumble-Einlasskanäle. Die zentrale Injektorlage verhilft hierbei zu einer deutlichen Verbesserung gegenüber den Vorgängermotoren hinsichtlich Effizienz und Emissionierung, insbesondere unter den Randbedingungen eines abgasturboaufgeladenen Betriebs.

Mit Hilfe der optimierten Querstromkühlung und deutlich reduzierten Wandstärken zwischen Brennraum und Wassermantel konnten die maximalen Temperaturen im Brennraum deutlich unter 250 Grad Celsius gehalten werden. Daher konnte die Legierung AlSi7MgCu0,5 T6air weiterhin verwendet werden. Die Luftabschreckung ermöglicht ein niedriges Eigenspannungsniveau. Die komplexe Ölraumgestaltung mit den Ölgalerien und den Tassenführungen würde bei Wasserabschreckung zu sehr hohen Eigenspannungen führen.

Mit Hilfe des Gleichteilkonzepts wird die Produktion auf einem Montageband in Stuttgart Zuffenhausen auch weiterhin gewährleistet und eine Mixfertigung der Vier- und Sechszylinderaggregate in Kombination mit allen bisher vorhandenen Boxerderivaten ermöglicht (siehe Bild 19).

Mittels einheitlicher Schnittstellen konnten existierende Fertigungseinrichtungen auch beim Gießen und der Bearbeitung bei der parallelen Fertigung der Vier- und Sechszylinderaggregate und den vorherigen Boxerderivaten eingesetzt werden. Eine Vielzahl von neuen Werkzeugen und Vorrichtungen konnten durch vereinheitlichte Schnittstellen gleichermaßen für Vier- und Sechszylinderköpfe verwendet werden. Somit wird die Fertigung flexibler und man reduziert Rüstzeiten. Dadurch können beispielsweise die Zylinderköpfe des 2,0-Liter-Vier- und des 3,0-Liter-Sechszylinder chaotisch mechanisch bearbeitet werden.

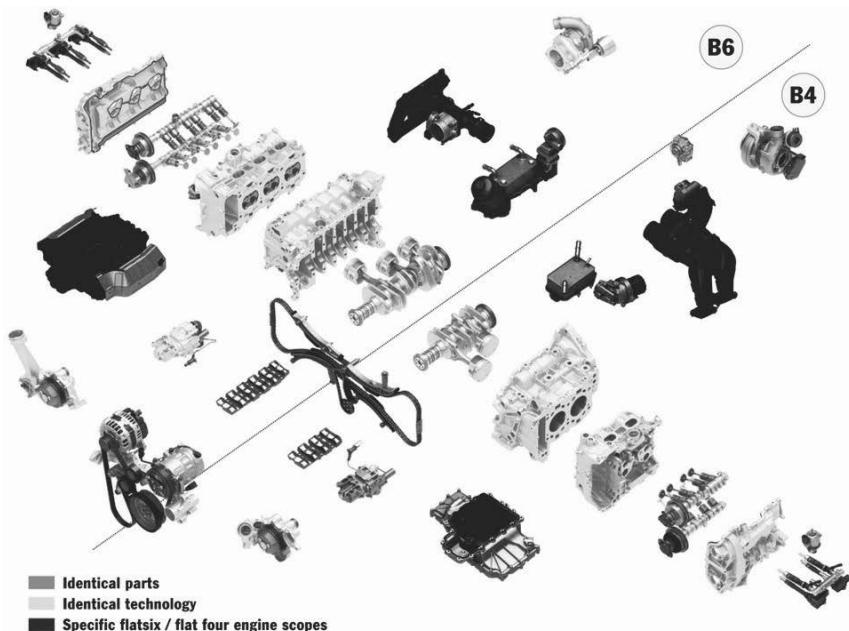


Bild 19: Gleichteile- und Gleichtechnologiemfang der neuen Motorfamilie 9A2

## 5.2 Entwicklungsfortschritt

Um den Fortschritt der neuen Zylinderköpfe gegenüber den vorherigen Generation aufzuzeigen, sind in den Bilden 20 und 21 die Vergleiche der Gewichte eines Satzes und die der Temperaturen bezogen auf die Kolbenflächenleistungen zu sehen.

Die Gewichte der neuen Sechszylinderköpfe bewegen sich auf dem Niveau der Zylinderköpfe des 3,8-Liter-Saugmotors, obwohl die neuen 3,0-Liter-Zylinderköpfe geometrisch näher an den rund ein Kilogramm schwereren Zylinderköpfen des 2,7-Liter-Saugmotors sind. Dieses Mehrgewicht der alten Generation ergibt sich vor allem durch die kleinere Bohrung, weil das Offset im unteren Ölkern bedingt durch die notwendigen Rippen nicht im notwendigen Maße nachgezogen werden kann. Die neuen Zylinderköpfe konnten infolge der geänderten Anordnung der Rippen in den relevanten Bereichen dünnwandiger ausgelegt werden.

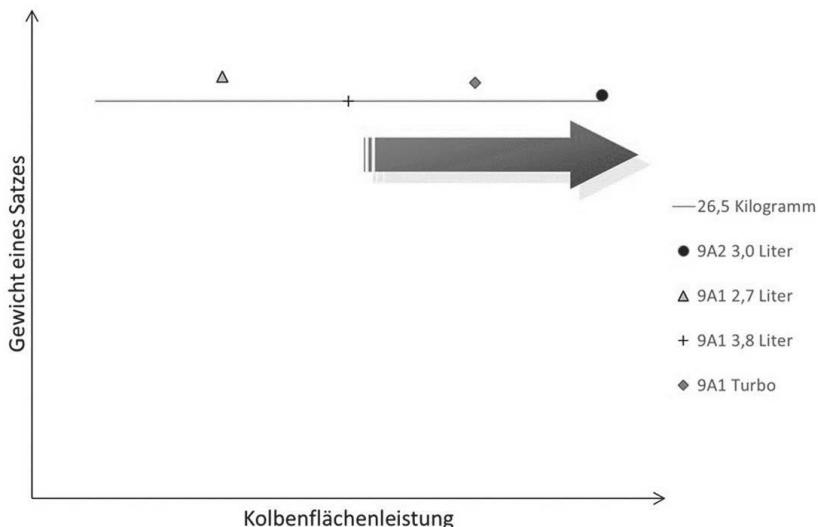


Bild 20: Vergleich der Satzgewichte bezogen auf die Kolbenflächenleistung

Gleichzeitig konnte aber die maximale Temperatur auf der Brennraumoberfläche auf dem Niveau des 2,7-Liter-Saugmotors gehalten werden, obwohl die Kolbenflächenleistung sogar deutlich über der des 9A1 3,8-Liter-Turbomotors liegt. Während die Strömungsgeschwindigkeiten im Wassermantel sich auf dem Niveau der Vorgänger bewegen, konnten die Wandstärken zwischen Brennraum und Wassermantel durch die steifere Struktur um rund ein Drittel reduziert werden.

Einen maßgeblichen Einfluss haben die in der Höhe von sieben auf vier Millimeter reduzierten Ventilsitzringe. Mit Hilfe dieser Maßnahme konnte auch auf die auslassseitige Kühlungsbohrung zwischen den Auslasskanalflügeln verzichtet werden. Der Wassermantelkern ist nun mit gleichmäßig geringem Abstand zum Brennraum ausgebildet. Daher wirken die unverändert hohen Wärmeübergangszahlen nun auf einer größeren Fläche und resultieren in einer niedrigeren Bauteiltemperatur.

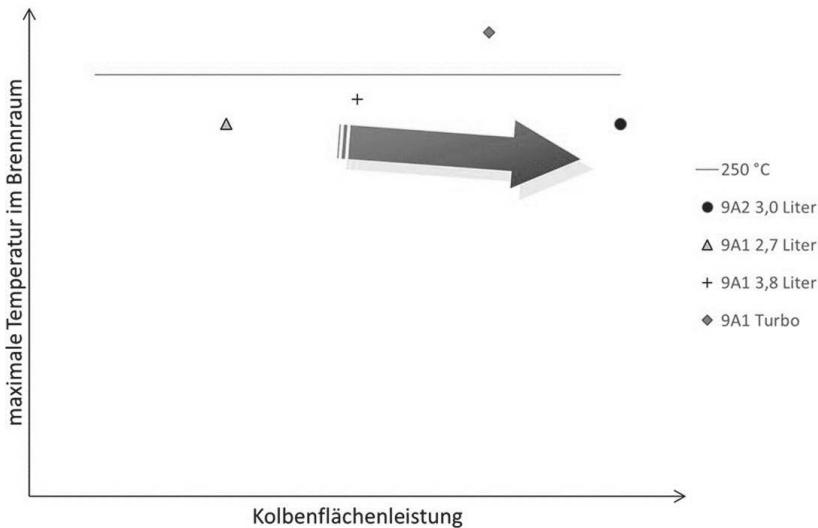


Bild 21: Vergleich der maximalen Temperaturen bezogen auf die Kolbenflächenleistung

## 6. Ausblick

### 6.1 Anforderungen an Legierungen und Dünnwandguss

Mit den frühen FEM-Berechnungen können die Kraftpfade in der Struktur eines Zylinderkopfes detektiert werden. Hierdurch lassen sich Steifigkeitssprünge entschärfen und mit der Maximierung von Radien können die Lasten ohne Probleme aufgenommen werden. Infolge einer verbesserten Struktur wiederum können die Wandstärken zwischen Brennraum und Wassermantel reduziert werden.

Das zentrale Entwicklungsziel bei der Auslegung des Wassermantels ist auch im Hinblick auf potentielle Ausbaustufen die Einhaltung der Grenztemperatur von maximal 250 Grad Celsius auf der Brennraumoberfläche. Durch die mehrjährige Erfahrung mit der Legierung Al-Si7MgCu0,5 T6air ist bekannt, dass diese den Ansprüchen bei Einhaltung der Grenztemperaturen hinsichtlich thermo-mechanische Ermüdung (TMF) und High-Cycle-Fatigue (HCF) bisher genügt.

Dem Potential von hochfesten Legierungen mit hohem Kupferanteil steht aktuell bei gleichen Wandstärken ein Mehrgewicht von rund 0,75 Kilogramm je Zylinderkopf gegenüber. Falls die derzeitigen Wandstärken aufgrund der schlechteren Gießbarkeit erhöht werden müssten, wäre ein noch höheres Differenzgewicht anzusetzen. Der hohe Kupfergehalt wird außerdem das Korrosionsverhalten negativ beeinflussen und unter Umständen Folgemaßnahmen an den Zylinderköpfen und den Anbauteilen nach sich ziehen.

Hinsichtlich der Festigkeit besteht also zunächst kein Handlungsbedarf. In weiten Bereichen eines Zylinderkopfes gilt es sogar nur die Dichtigkeit sicherzustellen. Im Sinne der Nachhaltigkeit durch ein geringeres Bauteilgewicht und eines reduzierten Energieaufwands bei der Herstellung müssen mittelfristig flächig dünneren Wandstärken kleiner als vier Millimeter das Ziel sein.

Mit dünneren Wandungen sind die Steifigkeiten über entsprechend aufwendigere Strukturen mindestens auf dem aktuellen Niveau zu halten. Speziell der Ventiltrieb benötigt im Betrieb eine verzugsarme Lagerung, um die Reibung und den Öldurchsatz gering halten zu können. Die tatsächlichen mechanischen Kennwerte wiederum müssen bei dünneren Wandungen mit Blick in die Zukunft gesteigert werden. Es sollten aber weniger andere Legierungstypen zur Anwendung kommen, sondern vielmehr gilt es das Potential der vorhandenen Legierung zu nutzen:

- Höhere Kennwerte über kleinere sekundäre Dendritenarmabstand ( $\leq 15$  Mikrometer)
- Höhere Kennwerte über Reduktion Gießfehler wie Oxide, Lunker, Poren

Weite Bereiche der Zylinderköpfe folgen primär der Forderung nach gussgerechter Konstruktion und können bisher nur in geringem Umfang zur Gewichtsreduktion genutzt werden. Neben der Reduktion der allgemeinen Wandstärken sind größere Freiheitsgrade bei der Konstruktion der Gussteile notwendig. Als Beispiele können genannt werden:

- Formschrägen der Kernkästen und der Kokille, die nicht auf der Gegenseite parallel ausgebildet werden können
- Erhöhte Formschrägen in der Kokille gegen Ziehstellen und Aufschrumpfen
- Bewusst gekürzte Bereiche an den Kernen zur Vermeidung von Hinterschnitten mangels Schiebern beziehungsweise bruchgefährdeten Stellen
- Hinreichend dicke Wandungen gegen Kaltlauf
- Speisungspfade, welche nicht bearbeitet werden

## 6.2 Anforderungen an künftige Entwicklungen

Um den sich immer schneller ändernden Gesetzesanforderungen auch künftig Rechnung tragen zu können, wird die Zusammenarbeit zwischen Gießer, Bearbeiter und OEM in Zukunft noch enger und vor allem effektiver werden müssen. Über trilaterale Abstimmungen auf Basis der ersten aussagefähigen Konstruktionsstände muss ein gegenseitiges Verständnis über die Anforderungen und Pflichten der anderen Parteien geschaffen werden. In Bild 22 sind einige Themen aufgelistet, welche jeder der drei Partner in die kommenden Entwicklungen einspeisen muss.

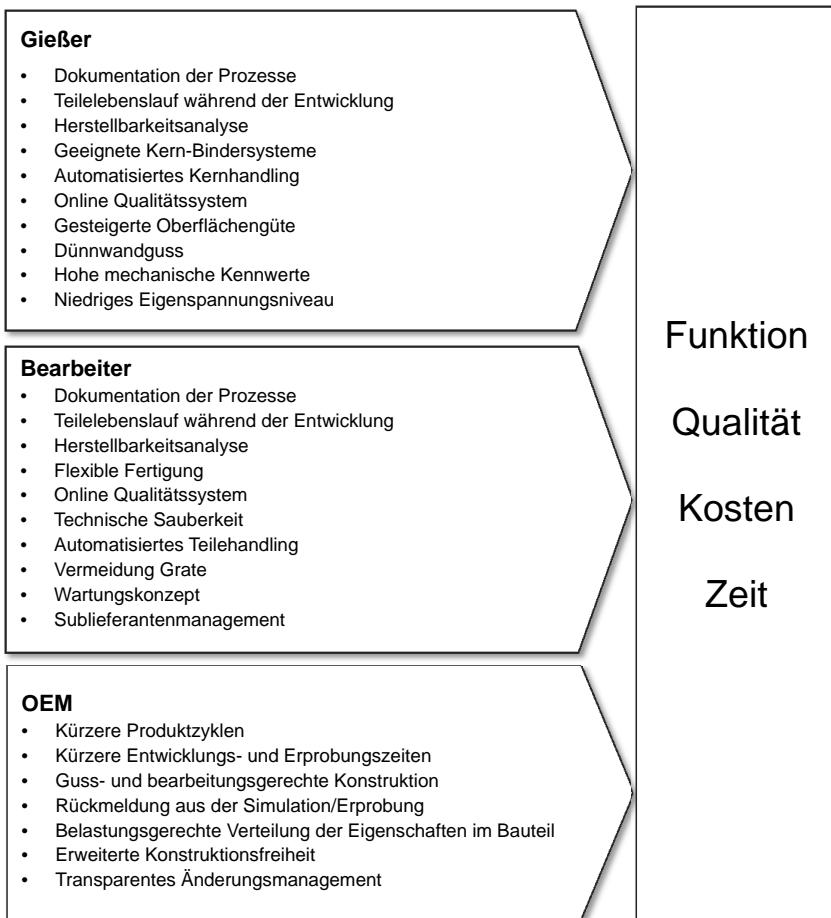


Bild 22: Aufgaben der drei Partner Gießer, Bearbeiter und OEM

## 7. Zusammenfassung

Die Anforderungen an die neue Generation der Zylinderköpfe hinsichtlich den funktionellen Aspekten Performance und Effizienz aber auch den Fertigungsbelangen konnten durch den kaskadierten Einsatz von Simulation und Erprobung in kurzer Zeit vollumfänglich erfüllt werden.

Der zielgerichteten Entwicklung der Gussteile kam die große Erfahrungen mit dem Gießverfahren Rotacast und der Legierung AlSi7MgCu0,5 T6air zu Gute. Diese Legierung hält mit der optimierten Kühlung und der Zylinderkopfstruktur auch den gestiegenen Belastungen stand. Hierzu tragen auch gusstechnische Sonderlösungen bei, wie die schlangenförmigen vorgegossenen Ölgalerien, welche die einteilige Konstruktion der Zylinderköpfe ermöglichen.

Neben den Gleichteilen der vorherigen und der neuen Generation konnten eine Vielzahl von einheitlichen Fertigungseinrichtungen beim Guss, der Bearbeitung und der Montage umgesetzt werden. Der erreichte Entwicklungsfortschritt der Zylinderköpfe lässt sich vor allem an der Reduktion der maximalen Bauteiltemperatur im Brennraum trotz deutlich gestiegenen spezifischen Belastung aufzeigen.

Für kommende Entwicklungen gilt es weitere Potentiale zur Verbesserung der mechanischen Kennwerte zu heben. Hierzu sind Gießfehler durch optimierte Prozesse zu reduzieren. Im Hinblick auf Leichtbau und Nachhaltigkeit sind Dünnwandkonzepte und größere Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Gussteile zu erarbeiten. Um auch künftig den immer kürzeren Produktlebenszyklen Rechnung tragen können, ist die Zusammenarbeit zwischen Gießer, Bearbeiter und OEM weiter auszubauen.

## K1 Prototyping – Druckgussprototypen in 12 Wochen

### K1 Prototyping – High Pressure Die Casting prototypes in 12 weeks

Dipl.-Ing (FH) **B. Jung, A. Weißbennner**,  
B. Sc., Heck + Becker GmbH Co. KG, Dautphetal

#### Kurzfassung

Die Entwicklungsintervalle der Automobilindustrie hinsichtlich neuer Antriebstechniken haben sich in den vergangen Jahren erheblich verkürzt. Somit wird es immer wichtiger, auf schnellste Art und Weise Prototypen herzustellen, welche die Eigenschaften der späteren Serienteile aufweisen. Aktuell bietet der Sandguss hier die einzige Möglichkeit, Gussteile in kurzer Zeit herzustellen, jedoch sind die Eigenschaften dieser Gussteile für den Fall, dass in der Serie das Druckgussverfahren vorgesehen ist, nur bedingt mit denen der späteren Serienteile vergleichbar. Hierdurch kam es in der Vergangenheit immer wieder dazu, dass „fertig“ entwickelte Druckgussbauteile zu Beginn des Serienprozesses noch einmal umfangreiche Änderungen durchlaufen mussten, um schließlich die geforderten Eigenschaften zu erreichen.

Da Heck + Becker nicht nur als klassischer Formenbauer, sondern auch als Engineering Partner agiert, kann schon in einem sehr frühen Entwicklungsstadium die Umsetzbarkeit der Bauteile im Druckgussprozess analysiert und optimiert werden. Den Entwicklern der Motorenkomponenten steht hierfür das Heck + Becker Expertenteam zur Seite. Mit K1 Prototyping ermöglicht Heck + Becker, den Sandguss zu substituieren, und bereits 12 Wochen nach einem vorläufigen design-freeze Druckgussbauteile zu fertigen. Diese Komponenten haben die Eigenschaften der späteren Serienbauteile, wodurch erste Erprobungen bereits in einem sehr frühen Stadium mit serienkongruenten Bauteilen durchgeführt werden können. K1 Prototyping ermöglicht zudem auch die Weiterentwicklung der Gussteile, denn Änderungen an den konturgebenden Formteilen sind binnen kürzester Zeit umsetzbar. Durch das Druckguss Technologie Zentrum (DTC) der Fa. Heck + Becker ist es möglich, die Prototypengussteile bereits beim ersten Abguss mit konvergierenden Parametern zur späteren Seriengießerei herzustellen. Das DTC ist mit modernster Anlagentechnik ausgestattet, wodurch auch neue und kundenindividuelle Technologien erprobt und verbessert werden können.

## 1. Stand der Technik

Bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge wird schon in einem sehr frühen Stadium festgelegt welches Fertigungsverfahren für die verschiedenen Komponenten im späteren Serienprozess genutzt werden soll. Gerade im Bereich der Druckgusskomponenten wird in den meisten Fällen auf Prototypen im Sandguss zurückgegriffen, da diese eine vergleichbare Alternative und relativ schnell verfügbar sind. Auch Änderungen am Gussteil selbst sind gut und schnell umsetzbar. Jedoch sind es keine Druckgussbauteile und deshalb ist es nur ein Zwischenschritt in der Entwicklung der eigentlichen Komponenten.

Im Unterschied zu Sandgussprototypen werden die Druckgussprototypen in anderen Legierungen gegossen, wodurch die mechanischen Eigenschaften und Kennwerte ( $R_{p,0,2}$ ,  $R_m$ , A) ebenfalls abweichen. Auch können die Abkühlgeschwindigkeiten der Schmelze nicht simuliert werden. Somit ist dies ein weiterer Faktor der dazu führt, dass Sandgussbauteile nur ähnlich der Druckgussbauteile sind. Weiterhin können die geringen Wandstärken nur teilweise im Sandguss realisiert werden, was gerade im Hinblick auf das Schwingungsverhalten der Bauteile sehr kritisch ist. Aus diesen Gründen müssen viele Validierungstest (Crashtest, Schwingungstest, akustische Test) der Komponenten mehrfach durchgeführt werden. Im ersten Schritt müssen die Sandgussbauteile getestet werden und anschließend das Druckgussbauteil, weshalb die Entwicklungsinvestitionen sehr hoch sind. Nicht zu vergessen sei jedoch der zeitliche Aspekt, wodurch in dieser Phase die eigentlichen Vorteile der Schnelligkeit des Sandgusses verloren gehen.

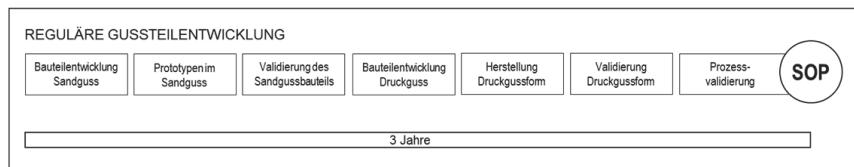


Bild 1: Regulärer Gussteilentwicklungsprozess

In Bild 1 wird der reguläre bzw. klassische Entwicklungsprozess für ein Powertrain-Bauteil schematisch dargestellt. Hierin wird deutlich, dass die Bauteilentwicklung zweimal durchgeführt wird. Es wird meist ein Funktionsbauteil entwickelt und anschließend ein Sandguss- und Druckgussbauteil abgeleitet.

Zudem entstehen immer wieder Überschneidungen zwischen der Entwicklung der Gussteile aufgrund geänderter Anforderungen an das Funktionsbauteil. In dieser Zeit werden die ersten Prototypen im Sandguss erstellt und gleichzeitig mit der Konstruktion der Seriendruck-

gussform begonnen. Durch diese Überlagerung kommt es immer wieder zu Verzögerungen bei der Herstellung der Druckgussform und damit zu unnötigen zusätzlichen Kosten.

## 2. K1 Prototyping

Durch das K1 Prototyping-Verfahren werden die Entwicklungszeiten und -kosten deutlich reduziert. Ziel ist es, zusammen mit den Entwicklern der Funktionsbauteile, schon im ersten Schritt ein gießbares Druckgussbauteil zu entwickeln. An dieser Stelle leistet Heck + Becker durch ein kompetentes Engineering-Team wichtige Unterstützungsarbeit in der gießgerechten Bauteilgestaltung.

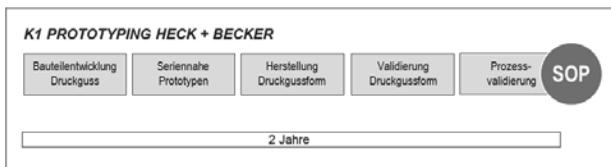


Bild 2: Schematische Darstellung des K1 Prototyping

In Bild 2 ist der schematische Ablauf der Druckgussbauteilentwicklung mit Hilfe des K1 Prototyping zu sehen. Im Vergleich zur Darstellung in Bild 1 lässt sich sofort eine deutliche Verkürzung des Zeitraumes bis zum „*Start of Production*“ erkennen.

### 2.1 Bauteilentwicklung Druckguss

Ein Bauteil ist immer ein Kompromiss zwischen der Funktion und der Gießbarkeit. In dieser ersten Phase werden die grundlegenden Eigenschaften und Funktionen des Bauteiles festgelegt und maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des Prozesses bestimmt. Heck + Becker ermöglicht durch das K1 Prototyping ein „simultanes“ Engineering bereits in einem sehr frühen Stadium des Entwicklungsprozesses. Des Weiteren können mögliche Änderungen, z.B. aufgrund der Gießbarkeit (Materialanhäufungen, „Stahlspitzen“ durch kleine tiefe Taschen, usw.) innerhalb dieses Zeitraums sehr leicht einfließen. Heck + Becker leistet an dieser Stelle Unterstützung, indem parallel zur Berechnung der mechanischen Eigenschaften (FEA, FEM) auch Füll- und Erstarrungssimulation durchgeführt werden. Zudem bewertet das Expertenteam zusammen mit dem Kunden die Gießbarkeit und erarbeitet sinnvolle Optimierungen.

Dies führt dazu, dass nicht wie bei der klassischen Vorgehensweise Bauteile „komplett“ neu für den Druckguss entwickelt werden müssen. Durch das vereinfachte „Änderungsmanage-

ment“ (was in diesem Stadium noch gar nicht vorhanden ist) werden die Umsetzungen benötigter Änderungen deutlich stilisiert. Weiterhin ist es aus Sicht von Heck + Becker wichtig, dass die verantwortlichen Qualitätsabteilungen bereits in diesem frühen Stadium in das Entwicklungsteam integriert werden. Dadurch lässt sich die Qualität der Bauteile sehr früh planen und nicht erst während der ersten Bemusterung der Seriendruckgussform festlegen.

## 2.2 Seriennahe Prototypen

Das Grundsätzliche Ziel ist es so schnell wie möglich Bauteile zu erhalten, welche die Eigenschaften der späteren Serienbauteile haben. Aufgrund dessen hat Heck + Becker im Zuge des K1 Prototypings ein einzigartiges Formkonzept entwickelt, welches ermöglicht mit dem Bau der Prototypen-Druckgussform zu beginnen, nachdem die Bauteilentwicklung einen „gießbaren“ Stand erreicht hat, Daraus resultiert die Möglichkeit bereits nach 12 Wochen die ersten Prototypenbauteile in Druckgussqualität zu erhalten.

Ein spezieller Formaufbau ermöglicht es in einem Rahmenpaar die konturgebenden Bauteile unterschiedlichster Gussteile zu integrieren, ganz gleich ob Zylinderkurbelgehäuse, Getriebegehäuse, Wandergehäuse oder Strukturbau teil. Auch gibt es nahezu keine Limitation bezüglich der Schieberanordnung und -anzahl.

Durch die bereits thematisierten Aspekte wird die Entwicklungszeit des Bauteils beträchtlich reduziert. Des Weiteren ergeben sich auch deutliche Kostenvorteile, auf welche im Folgenden näher eingegangen werden soll.

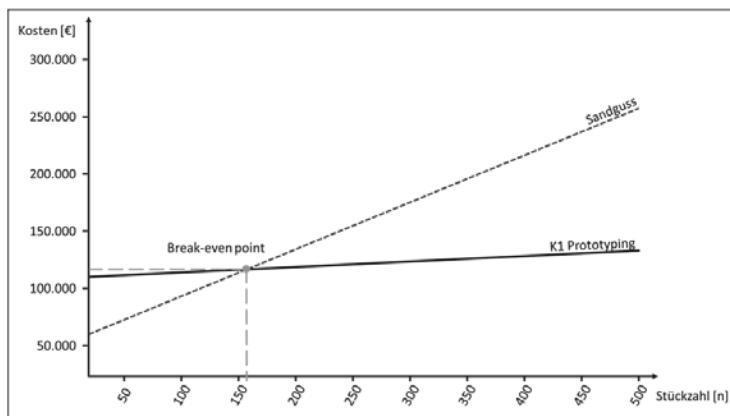


Bild 3: Beispielhafter Break-even-Point für ein Getriebegehäuse

Bei Betrachtung der Anfangsinvestition wird deutlich, dass diese beim K1 Prototyping höher sind als beim Prototypensandguss. Jedoch ist zu beachten, dass im Fall des K1 Prototyping nicht eine komplette Druckgussform hergestellt bzw. beschafft werden muss, sondern nur die Konturbauteile. Der Formaufbau wird durch Heck + Becker zur Verfügung gestellt. Genau wie beim Prototypensandguss ist der Fixkostenanteil beim K1 Prototyping abhängig von der Komplexität der Gussteile. Jedoch sind die variablen Kosten beim Sandguss deutlich höher. Durch den K1 Prototyping-Druckgussprozess ist eine schnellere, einfachere Produktion der Gussteile möglich und durch die gesenkten variablen Kosten pro Stück liegt die Rentabilitätschwelle in den meisten Fällen zwischen 100 und 200 Prototypen. In der Betrachtung des Break-even-Points werden die reinen Investitionen für die Herstellung der Prototypen-Gussteile (inkl. der Werkzeugkosten) verglichen. An dieser Stelle werden jedoch nicht die finanziellen Vorteile durch die verkürzte Entwicklungszeit, die reduzierte Anzahl an Validierungstests und die doppelte Entwicklung der Bauteile betrachtet. Somit wird sehr schnell deutlich, dass mit dem K1 Prototyping eine sehr gute Möglichkeit vorhanden ist Zeit, Geld und Ressourcen einzusparen.

### 3. Zusammenfassung

Das K1 Prototyping ist eine Möglichkeit um zum einen die Entwicklungszeit neuer Bauteile deutlich zu verkürzen und zum anderen eine Reduktion der Investitionsaufwendungen zu realisieren. Aufgrund der seriennahen Bauteileigenschaften erübrigen sich doppelte Validierungstests (im Vgl. zum Prototypensandguss). Durch die kurze Fertigungszeit der K1 Prototyping-Druckgussform sind Prototypen in Serienqualität innerhalb von 12 Wochen verfügbar. Aufgrund des einzigartigen Formkonzepts lassen sich Änderungen auf dem schnellste Wege und mit geringem finanziellen Aufwand implementieren, wodurch es möglich ist die Gussteile auf eventuell veränderte Anforderungen sehr flexibel anzupassen.



## Doppelguss mit neuem Speisersystem und anorganischen Kernen

**Lothar Hartmann**, Kurtz GmbH, Kreuzwertheim;  
**Dipl.-Ing. (TU) Thomas Heller**, BMW Group, Landshut

### 1. Innovatives Gusskonzept für Leichtmetall-Zylinderkurbelgehäuse in Doppelinformung mit anorganischen Kernen der BMW Group

Die BMW Group hat in der Leichtmetallgießerei in Landshut die Kernfertigung seit dem Jahr 2008 vollständig auf anorganische Sandbinder umgestellt. Zu Beginn der Umstellung von Organik auf Anorganik standen die Vorteile durch die stark reduzierten Emissionen im Vordergrund. Die konsequente Umstellung zeigte, dass die anorganische Sandkernfertigung auch für hochkomplexe Aluminiumgussbauteile wie Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderköpfe in der Großserie geeignet ist und die Ziele hinsichtlich Kosten, Qualität und Funktion erfüllt.

Inzwischen finden die Vorteile der anorganischen Kernfertigung Einzug in die Entwicklung innovativer Gießkonzepte. Die aktuelle Generation der anorganischen Gießkonzepte nutzt die spezifischen Vorteile des Bindersystems gezielt aus und eröffnet neue Möglichkeiten bei der Prozessentwicklung. Im vorgestellten Fall für die Serienfertigung der 3- und 4-Zylinder Kurbelgehäuse der aktuellen Baukasten-Motorgeneration von BMW werden zwei Bauteile in einem Abguss hergestellt. Durch ein neu entwickeltes Zentralspeiserverfahren, welches eine gezielte Erstarrungslenkung ermöglicht, konnte trotz deutlich gestiegener Bauteilkomplexität und doppelter Ausbringung pro Gießplatz eine signifikante Reduktion der Taktzeit erreicht und so ein erheblicher Produktivitätsgewinn erzielt werden.

Die vorgestellten Entwicklungen der anorganischen Sandkernfertigung und der Gusskonzepte wurden zuletzt in der neuen Leichtmetallgießerei der BMW Group in Shenyang, China übernommen. Dort werden seit 2015 Zylinderkurbelgehäuse für Ottomotoren mit anorganischen Kernen produziert.

### 2. Wer ist Kurtz

Kurtz Ersa ist ein Hightech- und Zuliefer-Konzern mit einer über 235-jährigen Tradition. Die drei Business-Segmente - Electronics Production Equipment, Moulding Machines und Metal Components - bieten innovative Lösungen für die produzierende Industrie. Als Technologieführer im In- und Ausland setzt Kurtz Ersa immer wieder neue Maßstäbe.

KURTZ wurde 1779 gegründet und ist seit sechs Generationen in Familienbesitz. Seit rund 150 Jahren besitzt KURTZ Gießereierfahrung im eigenen Haus und seit über 30 Jahren baut KURTZ Niederdruck-, Kipp- und Schwerkraftgießmaschinen für Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Neben Kokillenguss, bietet KURTZ auch Niederdruckgießmaschinen für Gips-, Keramik- und Sandformen an. Darüber hinaus baut KURTZ Entgratpressen in verschiedensten Ausführungen und bis zu 300 Tonnen Presskraft, was das Portfolio abrundet.

## Historische Entwicklung

1779	Hammerschmiede
1852	Eisengießerei
1860	Maschinenfabrik
1971	Bau von Schaumstoffmaschinen
1983	Bau von Gießmaschinen
1984	Internationalisierung: USA
1993	Löttechnologie
1996	Feinblechtechnologie
1998	Kurtz Holding
2004	225-jähriges Firmenjubiläum Kurtz Zhuhai: China
2006	Neubau Feinblechtechnologie Kurtz Ost -Moskau, Russland
2007	Schablonendrucker
2009	Entgratpressen
2011	Neues Erscheinungsbild
2012	Neubau Pulverbeschichtung
2013	Neubau Montagehalle
2014	Jubiläum 235 Jahre / HAMMERMUSEUM
2015	Eröffnung SMART FOUNDRY



Bild 1: Vorstellung – Wer ist Kurtz

### 3. Niederdruck Technologie für BMW Motoren

#### 3.1 Niederdruck

Kurtz ist schon seit 2000 Lieferant für Niederdrucktechnologie bei BMW. Auf Basis der Neu-entwicklung „Doppelabguss“ war eine weiter entwickelte Technik nötig, die in vielen Workshops besprochen und beschlossen wurde.

Kern und Herz ist der Niederdruckprozess. Anforderungen an die Niederdrucksteuerung sind

- Kontrollierte, turbulenzfreie Formfüllung
- Jede Formfüllung muss reproduzierbar gleich sein
- Dichtspeisen nach Form voll

Diese Prozesspunkte sind vor allem nötig um die geforderte Qualität in den Laufflächen zu erhalten. Poren oder Lunker würden sich beim nachfolgenden thermischen Prozess „Beschichten“ sofort zeigen.

Neben all den technologischen Vorteilen spart das gering anfallende Kreislaufmaterial erheblich Kosten. Nicht benötigter Kreislauf muss weder entfernt, das heißt das Gussteil geputzt, noch muss unnötig Material eingeschmolzen werden. Pro Kurbelgehäuse also bares Geld.



	Schwerkraftguss	Niederdruckguss	Ersparenis
<b>Gussteilgewicht (brutto)</b>	21,3 kg	12,2 kg	9,1 kg
<b>Ausschussrate</b>	12 %	4 %	8 %
<b>Gießzyklus</b>	7 St./h	8 St./h	17 %
<b>Putzaufwand</b>	120 s/Teil	20 s/Teil	83 %
<b>Schmelzkosten (brutto)</b>	10,65 €/Teil	6,10 €/Teil	27 %

*Verfahrensvergleich am Beispiel eines Kompressorgehäuses*

Bild 2: Vergleich Ertrag: Niederdruck - Schwerkraft

### 3.2 Angussystem

Finden Mehrfach-Steigrohre bei Struktur- und Fahrwerksteilen Verwendung, kommt beim Kurbelgehäuse die Angussbox zum Einsatz. Anders als mit einer Box, sind die vielen kleinen, sehr nah aneinander liegenden Anschnitte nicht zu realisieren. Die Angussbox ist Bestandteil der Kokille und wird mit der Kokille zusammen als ein Teil innerhalb der Gießmaschine gehandelt.

### 3.3. Schmelzen / Ofentechnik / Ofenlogistik

Um Kurbelgehäuse in der geforderten Qualität gießen zu können, ist eine top Schmelzequalität unumgänglich.

Um dieser Voraussetzung gerecht zu werden, haben wir direkt in die Gießlinie den Schmelzofen integriert. Die Gießlinie selbst ist nach dem Prinzip „Kurtz FSC“ aufgebaut, das heißt alles in einer Linie: Impellerstation, Warhmhaltestation, Gießmaschine und Ofenshuttle. Durch die direkte Integration des Schmelzofens kann das Alu direkt vom Schmelzofen in die Niederdrucköfen gefüllt werden.

Technologische Vorteile sind:

- Weniger Umleervorgänge nötig
- Die Schmelztemperatur kann niedriger gehalten werden
- Direktes Impellern / Reinigen im Niederdruckofen
- Erreichen des geforderten Dichteindex
- Durch Verschließen des Ofens kein negativen Einfluss auf Schmelze von außen

Diese technologischen Vorteile werden mit weniger Arbeitsschritten und Personal erreicht, somit neben prozesstechnischen Vorteilen auch erheblicher wirtschaftlicher Nutzen.

Da die Schmelzeaufbereitung separat und getrennt von der Gießmaschine stattfindet, kostet dies keinerlei Unterbrechung des Gießvorgangs.

Der eigentliche Ofenwechsel läuft schnell ab und kann in der Nebenzeiten erfolgen. Nebenzeiten bedeutet, sobald kein Druck mehr am Ofen anliegt, beginnt der Wechselvorgang. Die Kokille selbst ist noch geschlossen und das Gussteil befindet sich noch in der Erstarrungsphase.

Durch Nutzung der Nebenzeiten erreicht man je nach Gussteil, dass man ohne Taktverlust den Ofen wechseln kann.

Kein Warten - somit bleibt die Kokille auf Betriebstemperatur und Anfahrausschuss nach dem Befüllen beziehungsweise dem Ofenwechsel entfällt. Produzierte Teile sind sofort „verkaufbar“.

Um Kurbelgehäuse gießen zu können ist es wichtig den geforderten Dichteindex über die „komplette Ofenfüllung“ zu halten, was durch die Kombination „Ofenlogistik - Ofentechnik – Anguss“ erreicht wird.

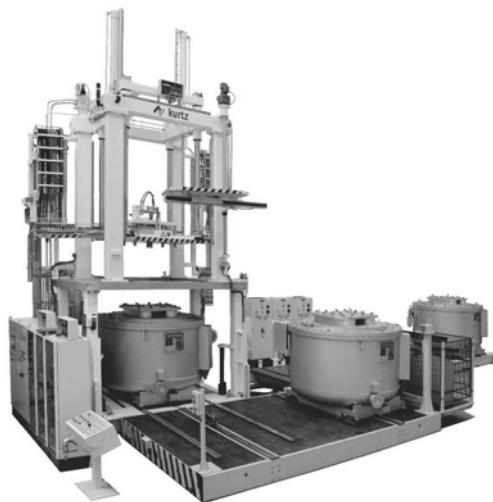


Bild 3: FSC Linie

### 3.4 Kühlung

Um auf die hohen Qualitätsanforderungen wie

- Lauffläche
- Festigkeit im Steg
- Festigkeit im Lagerstuhl

Einfluss nehmen zu können, ist entsprechende Kühlung nötig. Als Kühlmedium kommt Wasser und Luft zum Einsatz. Es stehen in Summe 30 Kühlkreise Wasser und 22 Kühlkreise Luft zur Verfügung. Die Ansteuerung der Kühlungen erfolgt über Zeit und / oder Temperatur. Unbedingt nötig ist die Ansteuerung über Temperatur um zu vermeiden, dass eine eventuell zu kalte Kokille weiter gekühlt wird.



Bild 4: Medienschrank mit Kühlung

Um beim Werkzeugwechsel keine Fehler beim Anschließen der Kühlkreise zu machen, werden alle Kühlkreise mit Kupplungen versehen. Das Koppelsystem der Kühlung macht das Anschließen nicht nur sicher, sondern auch schnell. Rüstzeiten werden verringert, Produktionsverfügbarkeit erhöht. Fehler beim Koppeln der Kühlung bemerkt man häufig erst, wenn es zu spät ist, das heißt am Ausschuss.



Bild 5: Werkzeugwechsel

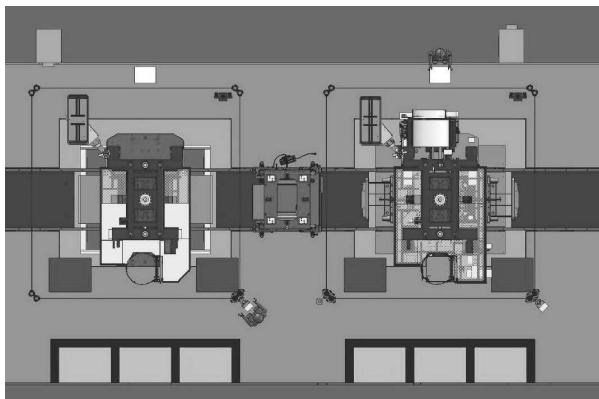


Bild 6: Layout Prinzip Werkzeugwechsel

### 3.5 Temperierung

Aufgrund des von BMW neu entwickelten Gießkonzepts kann die Kokille „relativ kalt“ gefahren werden. Der Temperaturhaushalt selbst ist allerdings ein relativ enges Prozessfenster. BMW entscheidet hierbei für die Temperierung der Kokille mittels elektrischen Heizpatronen, welche über die Maschinen-SPS angesteuert werden.

Die Regelung selbst erfolgt auch hier über Thermoelemente.

### 3.6 Verfügbarkeit und Kapazität

Eine weitere Vorgabe seitens BMW war, sowohl die Verfügbarkeit als auch den Kapazitätsfaktor zu erhöhen. Erreicht wurde dies mit der Gießlinienkonzeption Typ FSC welche Kurtz für Kurbelgehäuse, Fahrwerk und Strukturteile einsetzt.

### 3.7 Turnkey

Das mit BMW gemeinsam besprochene Konzept durfte als Turnkey Solution umgesetzt werden. Von Medien über Schmelzen, Gießen bis hin zur Wasseraufbereitung des Kühlwassers, alles aus einer Hand.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

BMW setzte mit der neuen Speisetechnik und durch Verwendung der anorganischen Kerne neue Maßstäbe und Möglichkeiten im Bereich „Gießen von Kurbelgehäusen“: Ergebnisse in Gussqualität und Taktzeit herausragend.

Dies in Verbindung mit entsprechender Maschinentechnologie brachte einen Quantensprung im Niederdruckguss für Motorblöcke, sowohl technologisch als auch wirtschaftlich.

**Fazit:**

Mit der angewandten Technologie ist Niederdruckguss mehr als eine Alternative zur Produktion von Kurbelgehäusen. Dies gilt nicht nur für Klein- oder Mittelserien, sondern auch für den „Massenmotor“.

# **Höchstleistungs-Otto-Zylinderkopfentwicklung in Aluminium**

## **Zylinderkopf für höchste spezifische Leistung in Serienanwendungen**

## **High Performance Gasoline Cylinderhead Development in Aluminium**

### **Cylinder head for extreme specific Power in Production applications**

**W. Schöffmann, C. Knollmayr, B. Kaltenegger,**

AVL List GmbH, Graz, Österreich;

**M. Rafetzeder, B. Stauder,**

Nemak Linz GmbH, Österreich

#### **Kurzfassung**

Durchgängig aufgeladene Motorfamilienarchitekturen mit Gleichteile- und Gleichbearbeitungskonzept sind Basisforderungen für zukünftige Otto- und Dieselmotoren geworden.

Neben den stückzahldominierenden Verbrauchskonzepten und Effizienzvarianten mittlerer Leistung sind leistungsstarke Spitzentmotorisierungen auch weiterhin ein bedeutender Faktor zur Positionierung der Modellreihen.

Hat hier in den letzten Modellwechseln ein durchgängiger Übergang von freisaugenden Motoren auf aufgeladene Varianten stattgefunden, ist aktuell ein zunehmender Trend zu kleineren Zylinderzahlen und Hubräumen mit signifikant steigenden spezifischen Leistungen festzustellen.

Die Ableitung dieser Höchstleistungsvarianten aus bestehenden Motorenfamilien ist meist eine Prämisse zur Begrenzung der Investitionsaufwände, wobei das hochbelastete Bauteil Zylinderkopf spezifische Lösungen gegenüber den Volumenvarianten erfordert.

Gegenstand des Beitrags war die Entwicklung eines Zylinderkopfs für einen 1.8L 4-Zylinder-Ottomotor mit einer spezifischen Leistung von 200 kW/L, der sich in einem Demonstrator-Sportfahrzeug der Fa. AVL aktuell in Erprobung befindet.

Dargestellt werden zuerst die Architektur- und Strukturmaßnahmen hinsichtlich der hohen Zünddrücke. Für den 4-Ventil-Zylinderkopf wurde ein Kühlkonzept entwickelt, das eine effektive Kühlung der kritischen Ventilstoße und der Bereiche der Injektoren und Zündkerzen ge-

währleistet, andererseits im Hinblick auf die Aufwärmphase minimales Kühlmittelvolumen, sowie hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades minimalen Druckverlust aufweist.

Der Beitrag gibt Einblick in die virtuelle Entwicklungsschleife zur Optimierung der Struktur und Kühlung, wobei hinsichtlich der Validierung der Höchstleistungsvariante ein methodischer Ansatz zum Einsatz kommt, der sich auf die tatsächlichen Last- und Einsatzprofile der Fahrzeuge stützt.

Für die Dauerhaltbarkeit des Zylinderkopfes, insbesondere der hinsichtlich thermomechanischer Belastung kritischen Ventilstegen, ist neben einem optimierten Kühlkonzept der Zylinderkopfwerkstoff von entscheidender Bedeutung. Während an den mittleren und hohen Leistungsdichten bewährte Aluminium-Silizium-Gusslegierungen, bei Einsatz von optimalen Gieß- und Wärmebehandlungsverfahren, zielführend sind, eröffnen Neuentwicklungen auf Aluminium-Kupfer-Basis weiteres Potential.

Die Komponente wurde sowohl in einer primären Aluminium-Silizium-Legierung, als auch einer von der Fa. Nemak neu entwickelten Aluminium-Kupferlegierung ausgeführt, gegenübergestellt und optimiert. Auf Grund der deutlichen Überlegenheit der neu entwickelten Al-Cu-Legierung wird die weitere Erprobung mit dieser neuen Legierung, die im Rahmen der Tagung 2015 vorgestellt wurde, erfolgen.

### **Abstract**

Common turbocharged engine family architectures with shared parts and processing concepts have become the basic requirements for future gasoline and diesel engines.

High performance engines will continue to be a major factor in the positioning of model ranges alongside fuel consumption concepts and efficiency variants of medium performance engines that dominate production volume.

Previous model range changes have seen a transition from naturally aspirated engines towards turbocharged variants and currently there is a developing trend towards a lower number of cylinders and lower capacities with significantly increased specific power.

The derivation of these high performance variants from existing engine families is mainly a premise of limited investment effort, whereby component-specific special solutions as on the high loaded cylinder head can prove to be the better choice compared to volume variants.

Focus of the paper is the development of a cylinder head for a 1.8L 4-cylinder-Gasoline engine with a specific power of 200 kW/L, currently in prototype development phase in a demonstrator vehicle at AVL.

In the first part the architecture- and structure measures due to the increased peak pressures are explained. A specific cooling concept had been developed for the 4-valve cylinder head, on one side providing effective cooling of the critical valve bridges and the injector and spark

plug areas, on the other side minimized coolant volume in regard of the warm up phase, as well as minimized pressure loss in regard of overall efficiency.

The article describes the optimisation of the structure and cooling in a virtual development loop, utilising a methodical validation approach of the high performance variant, based on the real load and usage profiles of the target vehicle applications.

In regard of the durability of the cylinder head, in particular the thermomechanical fatigue of the critical valve bridges, the cylinder head material is of essential importance beside an optimised cooling concept. Whereas aluminum-silicon-alloys are proven standard in combination with optimised casting and heat treatment processes for medium and high power ratings, new developments based on aluminum-copper open up further potential.

The component had been designed and optimised in both a primary aluminum-silicon alloy, as well as a new aluminum-copper alloy, developed by Nemak. Due to the clear advantages of the new Al-Cu alloy, presented at the conference in 2015, the further development phase is being continued with this version.

## **Einleitung**

Zukünftige CO<sub>2</sub> Szenarien mit strikten Flottenverbrauchszielen und verschärften Testzyklen, weitere Reduktion der Schadstoffemissionen im realen Betrieb, sowie die steigende Nachfrage nach verbrauchsgünstigen Fahrzeugen sind die entscheidenden Entwicklungstreiber zukünftiger Antriebskonzepte. Die Elektrifizierung ist ein unverzichtbarer Teil zur Erfüllung dieser Ziele, wobei die Verbrennungskraftmaschine (VKM) eine entscheidende Komponente integrierter Antriebskonzepte bleiben wird.

„Downsizing“ und „Downspeeding“ mit Turboaufladung und Direkteinspritzung für alle Motorkonfigurationen stellen dabei die Hauptroute für beide Brennverfahren dar.

Hinsichtlich der steigenden Anforderungen an die Basismotorstruktur gilt dabei den Kriterien Reibungs- und Gewichtsreduktion besondere Beachtung, um das volle Verbrauchspotential erzielen zu können, und dies mit parallelem Fokus auf Kostenreduktion am Grundmotor.

Effizienzsteigerung des Antriebs, Verbrauchsreduktion der Fahrzeuge und Optimierung der Gesamtkosten für den Endverbraucher stehen klar im Vordergrund der Entwicklung, jedoch ist das positive Fahrerlebnis, Dynamik und Agilität, neben den wirtschaftlichen Aspekten zunehmend ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl des Fahrzeuges.

Bei Otto- wie Dieselmotoren ist eine verstärkte Differenzierung zwischen verbrauchsorientierten Konzepten mit moderater Leistung und moderatem Mitteldruck einerseits, sowie extrem leistungsorientierten Konzepten andererseits, festzustellen. Durchgängig ist dabei der Einsatz von Aufladung und Direkteinspritzung bei gleichzeitiger Hubraumverkleinerung quer durch alle Fahrzeugkategorien.

Ist unter Downsizing [1] die Hubraumreduktion bei gleichbleibender Fahrzeugperformance mit Fokus auf größtmögliche Effizienzsteigerung zu verstehen, so lässt sich der Einsatz von Motoren mit sehr hoher Leistungsdichte als Leistungserweiterung bezeichnen. Ziel dieser Spitzenmotorisierungen in sportlichen PKW-Modellen ist herausragende Performance in Verbindung mit exzellenter Fahrbarkeit bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung gegenüber herkömmlichen, hubraumbetonten Leistungskonzepten.

### **Entwicklungsziel**

Der Motorenfamilienansatz mit modularem Komponentenbaukasten ermöglicht erhebliche Kostenvorteile für alle Motorvarianten. Für die Höchstleistungsvarianten, sowohl an Otto- als auch Dieselausführung, sind allerdings bei manchen Komponenten Sonderlösungen zielführender, um die Stückzahlvarianten nicht zu belasten.

Ziel der in diesem Beitrag dargestellten Entwicklung ist die Höchstleistungsvariante eines Zylinderkopfs aus einem modularen Motorenbaukasten.

Die Schnittstellen der Familienmotoren, sowie alle Anschluss- und Packagemasse wurden unverändert beibehalten, wobei die Hauptkomponenten als maßgeschneiderte eigene Bauteile entwickelt wurden, und sowohl Roh-, als auch Fertigteile eigenständig gefertigt werden.

In einer vor angegangenen Konzeptstudie wurde eine Hochleistungsvariante auf Basis einer idealen Motorenfamilie in Hinblick auf optimale Struktur und Kühlung entwickelt [2,3].

Für die Umsetzung in einem Demo-Fahrzeug wurden die Erkenntnisse soweit innerhalb der Randbedingungen des Basistriebwerks möglich, umgesetzt:

Das Basistriebwerk im Alfa-4C ist der 1,75L-4-Zylinder aus der FCA-Familie B mit 240 PS (177kW). In einer ersten Evolutionsstufe wurde der gleiche Grundmotor in einem AVL-Demonstrationsfahrzeug Alfa-Giulietta mit 350 PS (257kW – 200PS/L) mit Turboaufladung sowie elektrischer 12V-Zusatzaufladung aufgebaut.

Die Steigerung auf 200kW/L im Alfa-Romeo 4C Fahrzeug erforderte eine völlige Überarbeitung des Grundmotors und der gesamten Konzeption des Aufladesystems.

### **Maßnahmen am Gesamtmotor**

Der Grundmotor und die Aufladung wurden grundlegend überarbeitet [4], so wurden folgende Baugruppen neu entwickelt und als Prototyp-Komponenten gefertigt:

- Verstärkter Kurbeltrieb
- Neuer Zylinderkopf
- Überarbeitetes Verbrennungssystem
- Neues Layout des Einspritzsystems
- Verstärkter Ventiltrieb für hohe Drehzahlen
- Bi-turbo Aufladung mit 2-stufigen Kompressoren

- Elektrische Zusatzaufladung (48V)
- Optimierte Peripherie

Die Leistungsdaten des fertiggestellten Triebwerks im Testfahrzeug sind:

- 349 kW (474 HP) @ 8000 1/min
- 422 Nm (30.5 bar BMEP) @ 7000 1/min

Im Folgenden wird die Entwicklung des neuen Zylinderkopfs, der Werkstoff- und Gusstechnisch in Zusammenarbeit von AVL mit NEMAK-Linz entstanden ist, im Detail beschrieben.

### Anpassungen und Maßnahmen am Zylinderkopf

In der vorangegangenen Studie für Hochleistungsmotorkonzepte wurde eine Zylinderkopfarchitektur für 200kW/L als modulares Konzept dargestellt [3,5,6].

Für die Umsetzung unter den Basismotor-Randbedingungen des Demonstrator-Fahrzeugs wurden die wesentlichen Erkenntnisse der Studie eingeführt, jedoch mussten die Hauptdimensionen, sowie die Montageschnittstellen beibehalten werden.

### Ideales Zylinderkopfkonzept für 200kW/L

Die modulare Architektur mit kompaktem Basis-Zylinderkopf und separatem Druckguss-Nockenwellenmodul erlaubt die Vereinheitlichung der Hauptbearbeitungen wie z.B. der Zylinderkopfhöhe (Bild 1). Neben Kosten- und Gewichtseinsparungen erlaubt dieser Ansatz Flexibilität für den Einsatz unterschiedlicher variabler Ventiltriebssysteme.

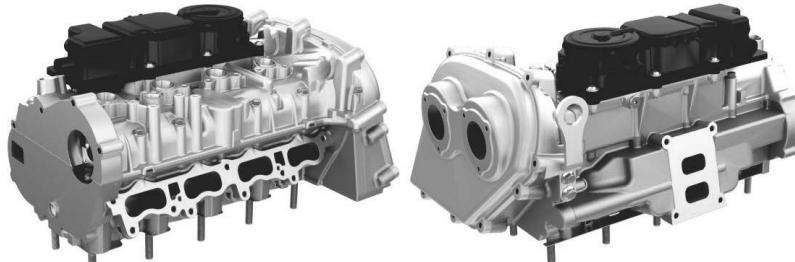


Bild 1 : Modularer Zylinderkopf Konzeptmotor

Der Basis-Zylinderkopf mit Brennraum, Gaswechselkanälen und Kühlmantel besitzt einen gekühlten, integrierten Abgaskrümmer mit kompakter Zusammenführung, bei den Ottovarianten mit Flutentrennung. Neben Verbrauchsvorteilen an den aufgeladenen Motoren sind Reduktion von Gewicht und Bauraum, Material- sowie Montagekosten und die Steigerung der Systemzuverlässigkeit durch den Wegfall der Dichtfläche zwischen Zylinderkopf und Abgaskrümmer erzielbar.

Eine gezielte Kühlung um die Auslasskanäle bzw. im ATL-Flanschbereich ist notwendig, um die Werkstofftemperaturen im Zylinderkopf innerhalb der Festigkeitsgrenzen halten zu können. Überkühlung soll jedoch vermieden werden, damit einerseits der zusätzliche Wärmeeintrag ins Kühlsystem begrenzt wird und andererseits, besonders am Diesel die Reduktion der Abgastemperatur am ATL-Eintritt nicht zu groß wird und die Funktion der Abgasnachbehandlung sichergestellt ist.

Partielle Isolierung der Auslasskanäle durch keramische Beschichtung bietet hier an Hochleistungs-Ottovarianten sowie an den Diesel-Varianten neue Möglichkeiten – die Neuentwicklung wurde von einem weltweit agierenden Gusslieferanten vorgestellt [7].

Die Zylinderkopfkühlung erfordert gerade bei aufgeladenen Motoren mit hohen Leistungs-dichten besondere Betrachtung. Einerseits ist für eine effektive Kühlung der kritischen Ventilstege und der Bereiche der zentralen Injektoren und Zündkerzen zu sorgen, andererseits ist im Hinblick auf die Aufwärmphase auf minimales Kühlmittelvolumen, sowie hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades auf minimalen Druckverlust und einen niedrigen Gesamtkühlmit-telstrom zu achten.

Für 4-Ventil-Zylinderköpfe wurde mit diesen Prämissen ein Kühlkonzept entwickelt, das sowohl für Ottomotoren mit Seiteninjektor, als auch für Dieselmotoren mit zentralem Injektor und seitlichem Glühstift geeignet ist.

Das AVL Top-Performance-Cooling-Concept (Bild 2 links) basiert auf der AVL Top-Down-Cooling und besitzt zwei Kühlmantel im Zylinderkopf, welche über effiziente Kühljets zwischen den Auslassventilen verbunden sind.

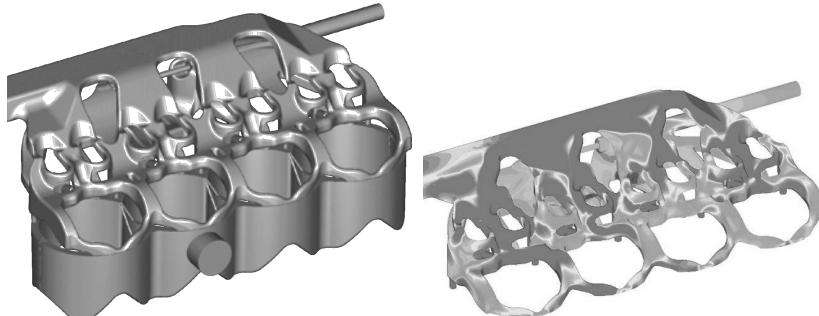


Bild 2 : Top Performance Cooling Concept und Wärmeübergangsverteilung

Der Kühlmitteleintritt in den Zylinderkopf erfolgt oberhalb des integrierten Abgaskrümmers. Dadurch kann einerseits auf eine großvolumige Kühlmittelverteilleiste verzichtet werden (Reduktion Kühlmittelvolumen), andererseits steht dem Zylinderkopf Kühlmedium mit der nied-

rigsten Temperatur im System zur Verfügung. Als weitere große Vorteile sind die ideale Durchströmung der kritischen Bereiche hinsichtlich Bauteiltemperatur (Zündkerze, Kraftstoffventil, Ventilstange) und die extrem gute Gleichverteilung über die Zylinder zu nennen (Bild 2 rechts).

Die Ausströmung des Kühlmittels erfolgt durch den Wasserraum des Kurbelgehäuses, was sich wiederum hinsichtlich des Temperaturniveaus im Kurbelgehäuse im Vergleich zum Zylinderkopf und zur Reduktion des Wasservolumens durch Wegfall einer Sammelleiste als vorteilhaft erweist.

Eine speziell für Top Performance Motoren entwickelte Geometrie für eine gezielte, gleichmäßige Kühlung der Auslassventilführungen garantiert eine gute Wärmeableitung aus den Ventilführungen bzw. Ventilschäften.

Aus dem Motorsportbereich sind Sitzringkühlungen zur Reduktion von Ventil-, Ventilsitzring- und Zylinderkopftemperaturen bereits seit längerem bekannt. Beim AVL Top-Performance-Cooling-Concept wurde auch eine effektive und in Serie herstellbare Ausführung einer Ventilsitzringkühlung untersucht und dargestellt.

### Umsetzung des Zylinderkopf unter den Basismotor-Randbedingungen

Durch die gesetzten Projektrandbedingung, von einem am Markt erhältlichen Basismotor so viele Teile wie möglich unverändert zu übernehmen, wurde das Konzept des vorhandenen Motorkühlsystems inklusive aller Schnittstellen und Anbauteile übernommen.

Hinsichtlich der Limits des Fahrzeugkühlsystems wurde am Zylinderkopf auf einen integrierten Abgaskrümmer verzichtet, auch wurde die originale Ventiltriebsgeometrie und die Position der Wasserpumpe an der Vorderseite des Zylinderkopfs beibehalten. Durch die erhöhte Motordrehzahl auf 8000 U/min konnte der Kühlmittelvolumenstrom im vorhandenen Packageraum der Pumpe ausreichend erhöht werden.

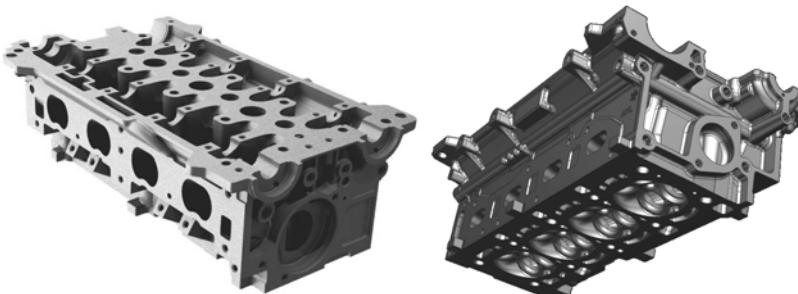


Bild 3: Zylinderkopf des Demo-Fahrzeugs, Bearbeitet

Am Kurbelgehäuse waren ausschließlich mechanische Nacharbeiten und Einbauteile möglich, da auch hier keine Neukonstruktion des Bauteils erfolgte. Der größte Änderungsumfang war am Zylinderkopf erforderlich, wo unter Einhaltung der Schnittstellen und Anbauteile der Bereich des Kühlmittelraums neu entwickelt werden konnte und die Struktur verstärkt wurde.

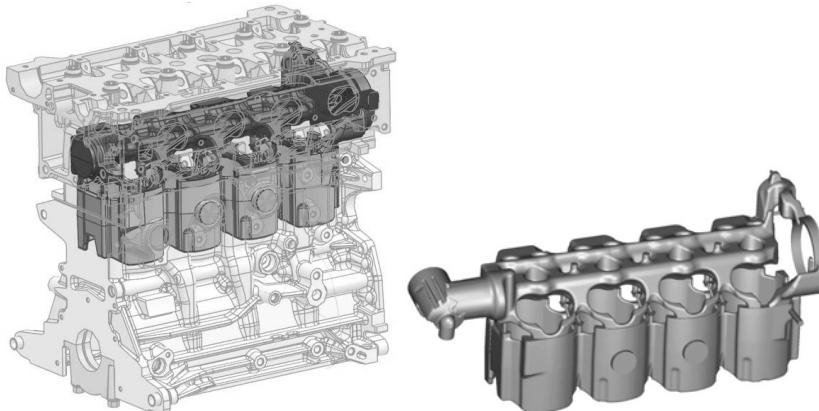


Bild 4: Kühlmantel in Kurbelgehäuse und Zylinderkopf

Als Resultat des hohen Energieeintrages im Bereich des Brennraumes steigen die Bauteiltemperaturen dementsprechend an. An verschiedenen Bereichen des Zylinderkopfes ergeben sich aus den lokalen Funktionsanforderungen unterschiedliche zulässige Grenzwerte. Im Bereich des Kontaktes zwischen Zylinderkopf einerseits und Stopper und Dichtsicken der Zylinderkopfdichtung andererseits, sollte die Temperatur den Bereich von 210° bis 220° für übliche Zylinderkopflegierungen nicht überschreiten, um Heißkriechen des Aluminiums und als Folge davon Verlust der Dichtfunktion der Zylinderkopfdichtung zu vermeiden. Am Markt bekannt sind Lösungen mit Kühlslitzen im Bereich des Zylindersteges, entweder am Kurbelgehäuse oder/und am Zylinderkopf. Diese Lösung benötigt aber deutlich breitere Ventilsteg, um die beidseitige Abdichtung der Brennräume zum Wasserraum zu gewährleisten. Um diese Verbreiterung der Ventilsteg, und damit eine Vergrößerung der Motorlänge zu vermeiden, wurden erstmals V-Bohrungen im Zylinderkopf, analog zu bekannten Kühlbohrungen im Zylindersteg des Kurbelgehäuses, ausgeführt.

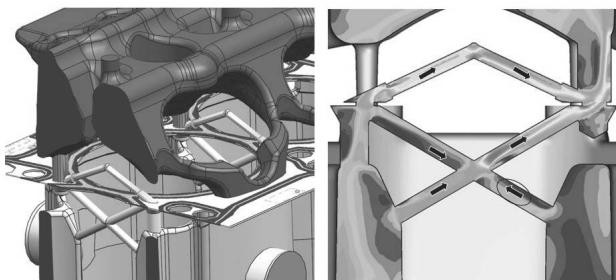


Bild 5: Kühlpassagen im Zylindersteg in Kurbelgehäuse und Zylinderkopf

Wie in den folgenden Bildern ersichtlich, verringern diese zusätzlichen Kühlpassagen im Zylinderkopf das Temperaturniveau im genannten Bereich zwischen den Brennräumen um circa 50°.

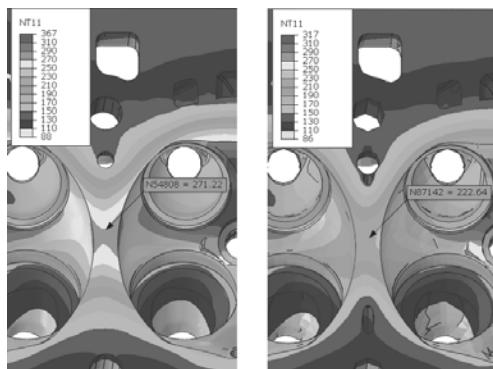


Bild 6: Bauteiltemperaturen mit und ohne V-Bohrungen im Zylinderkopf

Des Weiteren ersichtlich ist auch eine deutliche Temperaturreduktion seitlich im Brennraum, was zu einer reduzierten Klopfneigung der Verbrennung führt. Der positive Effekt der Stegkühlung im Zylinderkopf hat durch Wärmeleitung der Zylinderkopfdichtung auch positive Auswirkung auf das Temperaturniveau im Kurbelgehäuse. Dort konnten die Wandtemperaturen um circa 40° gesenkt werden.

### Strukturmaßnahmen am Zylinderkopf

Die Überarbeitung und Optimierung der Zylinderkopfstruktur war einerseits auf Grund der erhöhten mechanischen Belastung durch den Zünddruck und die Auslegung des Motors auf die deutlich höhere Nenndrehzahl, sowie andererseits hinsichtlich der thermischen Belastung durch die hohe Leistungsdichte.

In der folgenden Abbildung ist die Struktur in den Querschnitten in der Zylinderkopf-Schraubenebene, sowie in der Zylindermitte durch die zentrale Zündkerze und den seitlichen Injektor der Benzin-Direkteinspritzung zu sehen.

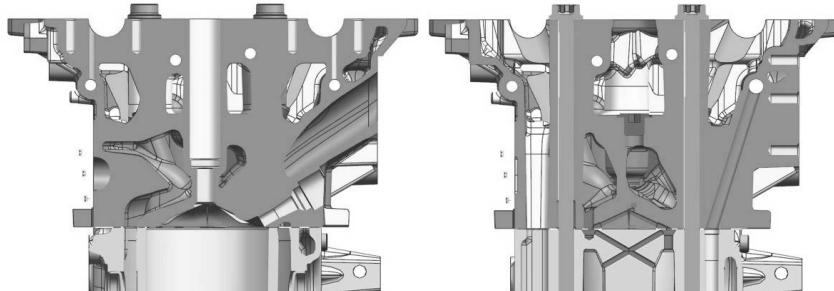


Bild 7: Zylinderkopfquerschnitte – Struktur Zylindermitte und Schraubenebene

Um die Bauteiltemperaturen in den Ventilstegen auf ein zulässiges Niveau zu bringen, wurden die Wanddicken zum Brennraum in den kritischen Bereichen deutlich reduziert. In der Ventilbrücke zwischen den Auslassventilen auf 7,5mm, im Bereich zwischen Einlass- und Auslassventilen lokal auf 9mm.

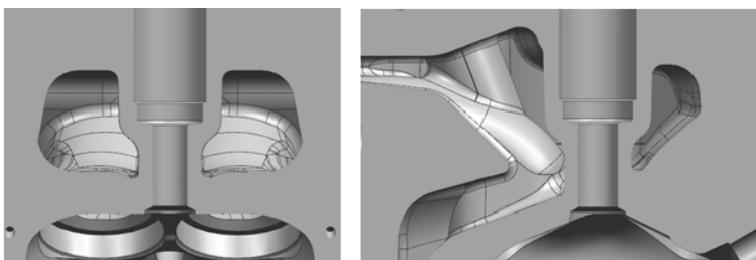


Bild 8: Struktur und Wasserraum im Bereich der Ventilstege

Die dadurch reduzierte Bauteilsteifigkeit konnte dank der V-Bohrungen im Zylinderkopf durch Strukturverstärkung im Bereich zwischen den Zylindern überkompensiert werden.

### Werkstoffkonzept – eingesetzte Legierungen

In der Entwicklung des Hochleistungszylinderkopfs wurden unterschiedliche Legierungen untersucht. Ausgehend von der etablierten Aluminium-Siliziumlegierung AlSi7Cu0,5Mg wurde die von Nemak neu entwickelte NemAlloy<sup>®</sup> HT200 - AlCu7 Legierung hinsichtlich der Eigenschaften für diese Komponente untersucht [8].

	AlCu7	AlSi7Cu0,5Mg	AlSi8Cu3
<b>Cu</b>	<b>6 - 8</b>	<b>0,4 - 0,6</b>	<b>2,8 - 3,5</b>
<b>Fe</b>	<b>0 - 0,25</b>	<b>0 - 0,20</b>	<b>0 - 0,4</b>
<b>Si</b>	<b>0 - 0,125</b>	<b>6,5 - 7,5</b>	<b>8 - 9,5</b>
<b>Ti</b>	<b>0,05 - 0,2</b>	<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,07 - 0,15</b>
<b>Zr</b>	<b>0,15 - 0,25</b>	<b>0 - 0,03</b>	<b>0 - 0,05</b>
<b>Dichte in g/cm<sup>3</sup></b>	<b>2,84</b>	<b>2,70</b>	<b>2,74</b>
<b>Spez. Wärme in J/gK</b>	<b>0,87</b>	<b>0,89</b>	<b>0,92</b>
<b>Wärmeausdehnungsk. in K<sup>-1</sup> (25-300°C)</b>	<b>24,5*10<sup>-6</sup></b>	<b>23,3*10<sup>-6</sup></b>	<b>22*10<sup>-6</sup></b>

Bild 9: Physikalische Eigenschaften der untersuchten Legierungen

Als Referenzbauteil wurde der Zylinderkopf in der AlSi7-Legierung ausgelegt und untersucht. Hinsichtlich High-Cycle-Fatigue Belastung zeigt sich im Staircase-Zug-Druckversuch für die Aluminium-Kupfer Variante ein deutlicher Vorteil.

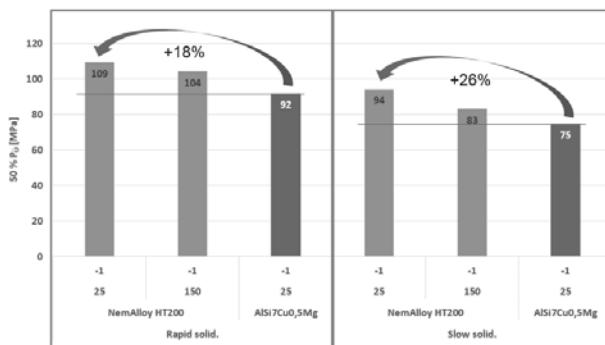


Bild 10: Hochzyklische Festigkeitswerte der Legierungen

In der Thermomechanischen Festigkeit zeigt die AlCu-Legierung das signifikant höhere Potential hohen Temperaturen. So ist die Lebensdauer bei 250°C gegenüber der AlSi-Legierung mehr als 100% höher.

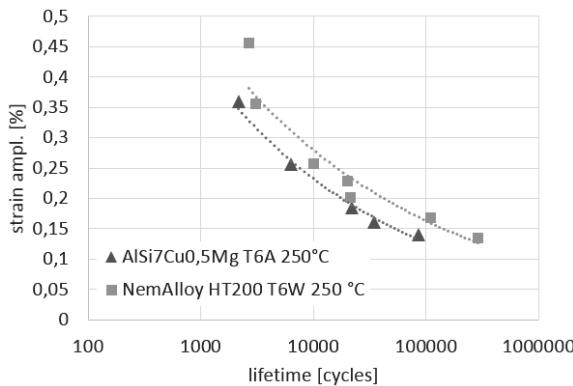


Bild 11: Low Cycle Fatigue Vergleich bei 250°C

Die hohe Wärmeleitfähigkeit der AlSi7-Legierung ist vom konstruktiven Blickpunkt besonders im Feuerdeckbereich des Zylinderkopfs der wesentliche Vorteil gegenüber anderen Legierungen. Die Abbildung zeigt den Vergleich, wobei die AlCu7-Legierung aber deutlich bessere Resultate, als die AlSi8Cu3-Legierung zeigt.

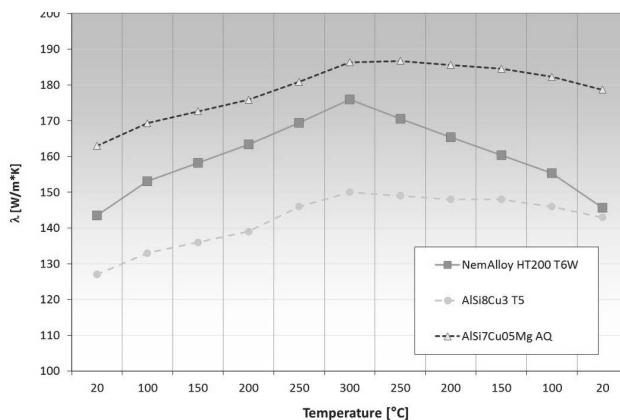


Bild 12: Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Legierungen

Die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften der AlCu7-Legierung im Vergleich zur AlSi7Cu0.5Mg am realen Bauteil im Bereich der Brennraumkalotte bestätigen die Vorteile.

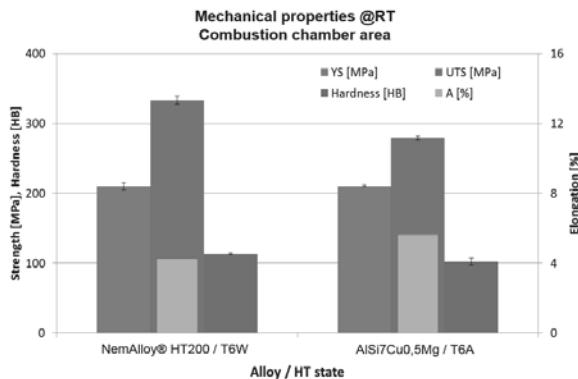


Bild 13: Mechanische Kennwerte am Bauteil

### Virtuelle Entwicklungsschleife

In der Anwendung als Hochleistungsvariante ist der Zylinderkopf hohen mechanischen Belastungen durch Schraubenvorspannung, Injektoreinbau, Ventilsitz- und Ventilführungspresspassung, Spitzendruckbelastung, sowie extrem hohen thermischen Belastungen durch Brennraum und Auslasskanal, sowie den Kühlmantel ausgesetzt. Um diesen Belastungen standzuhalten, ergeben sich für die Struktur teilweise gegensätzliche Anforderungen, einerseits hinsichtlich mechanischer Steifigkeit und Festigkeit, andererseits hinsichtlich Kühlung der thermisch hochbelasteten Bereiche. Um die Dauerfestigkeit sicherzustellen, sollte die Steifigkeit des Zylinderkopfes möglichst hoch sein, hingegen müssen die Wandstärken möglichst gering sein, um bei hohen thermischen Lasten die Bauteiltemperaturen auf ertragbarem Niveau zu halten.

Ein wichtiger Aspekt für die Dauerhaltbarkeit des Zylinderkopf ist die Materialauswahl, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben. Die Auswahl der erforderlichen Legierung ist natürlich nicht zuletzt kostensensitiv, wonach die Mindestanforderungen für die jeweilige Leistungsvariante gerade erfüllbar sind.

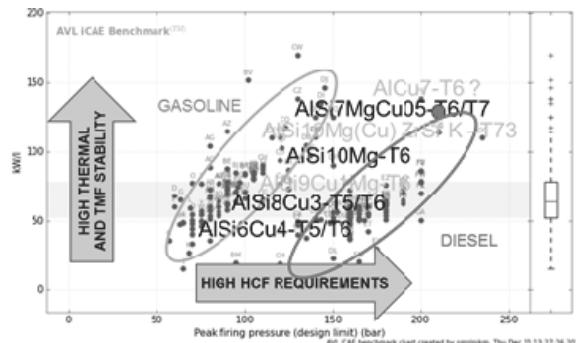


Bild 14: Werkstoffwahl abhängig von Spitzendruck und spezifischer Leistung

Die Abbildung zeigt die Anforderungsfunktion, nach der auf Basis des erforderlichen Spitzendrucks und der spezifischen Leistungsanforderungen der passende Werkstoff ausgewählt werden kann.

Die virtuelle Entwicklungsschleife ist eine erste virtuelle Baustufe und wird als Front Loading Prozess bezeichnet. Tatsächlich ist durch die virtuelle Optimierung durch numerische Berechnungsverfahren in Kombination von FEM und CFD die erste reale Prototyp-Baustufe bereits begrenzt dauerlauffähig.

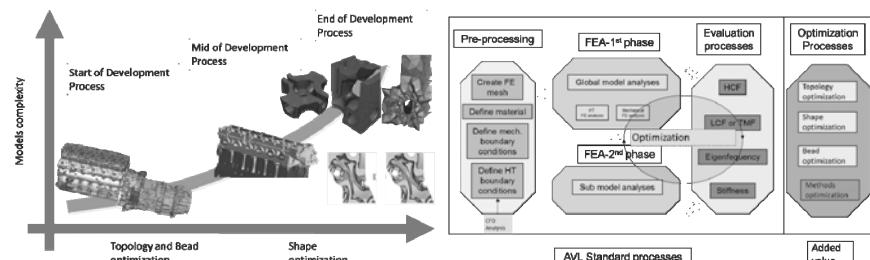


Bild 15: Topologieoptimierung im AVL-Frontloading Prozess

### Kühlung - Temperaturverteilung

Die Temperaturverteilung im Zylinderkopf ist abhängig vom Zylinderkopfaufbau (Feuerdeckdicke, Wassermantelkonzept, ...), Kühlleistung (Wasserpumpe, Kühlmittelstrom, ...), Motorleistung und Werkstoffauswahl (Wärmeleitfähigkeit).

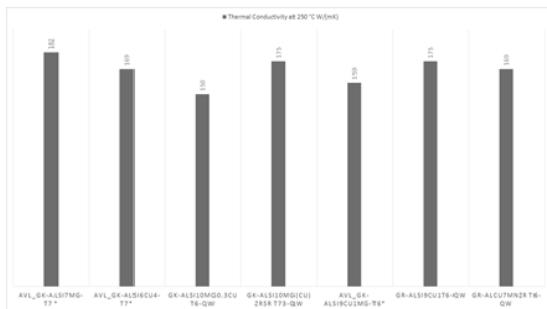


Bild 16: Wärmeleitfähigkeit bei 250°C

Die höhere Wärmeleitfähigkeit von AlSi7Cu0.5Mg im Vergleich zu AlCu7 reduziert die Temperatur im Bereich des Feuerdecks um etwa 10 °C, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist.

Es zeigt sich, dass mit beiden Materialien sehr hohe Temperaturen im Zylinderkopf auftreten. Für die Serienanwendung muss dieses Temperaturniveau noch optimiert werden. Die Zielrichtung wurde am Konzept-Zylinderkopf mit dem dort umgesetzten Top-Performance-Kühlkonzept dargestellt. Für die Demonstrator Anwendung ist dieses Temperaturniveau insofern akzeptabel, als hier reduzierte Lebensdaueranforderungen ausreichend sind.

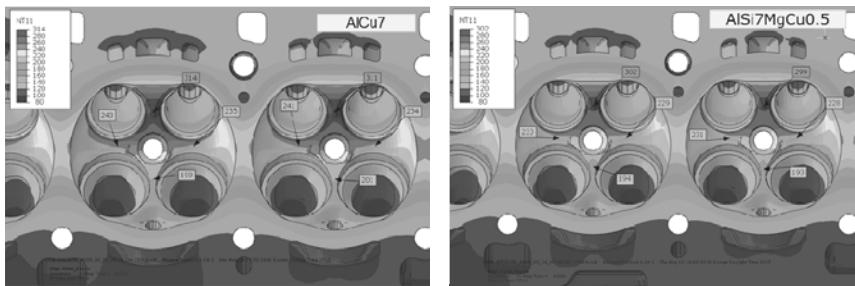


Bild 17: Vergleich der Bauteiltemperaturen AlCu7 vs. AlSi7Cu0.5Mg

Neben den maximalen Temperaturen auf den Zylinderkopf-Brennraumoberflächen ist ein weiterer wichtiger Bereich die Kühlmanteloberfläche. AVL entwickelte eine spezielle Methode zur Bewertung der Sicherheit gegen Filmsieden.

Da Kühlmittel bei hoher Belastung mit der Betriebszeit altern und Ablagerungen im Kühlmantel auftreten können, sind auch die Wandtemperatur und die lokalen Abkühlbedingungen (Geschwindigkeit, Druck und Temperatur) von großer Bedeutung. Im Vergleich zur Gasseite

ist die Temperaturdifferenz zwischen beiden Materialien eher gering ( $\sim 2^\circ\text{C}$ ). Die höhere Temperatur des AlCu7-Materials bedeutet aber tendenziell eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Filmsieden.

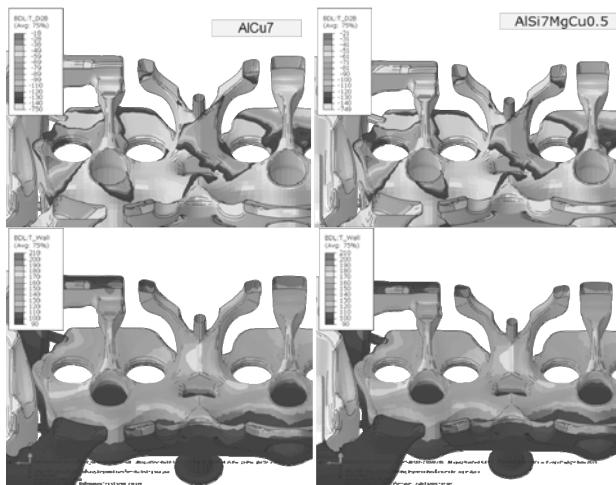


Bild 18: Robustheit gegen Filmsieden - Vergleich AlCu7 vs. AlSi7Cu0.5Mg

### Strukturfestigkeit – Hochzyklische Belastung (HCF)

Im Folgenden werden die wichtigsten statischen und dynamischen Materialparameter für die gängigsten Materialdaten beschrieben. Ein sehr hohes Potential für erhöhten Spitzendruck ist bei der AlCu7-Legierung zu sehen. Dies ist hauptsächlich auf deutlich bessere Ermüdungsdaten im Vergleich zur AlSi7Cu0.5Mg zurückzuführen. Dieser Vorteil kann auch den Nachteil einer geringeren Wärmeleitfähigkeit mehr als kompensieren, unter Berücksichtigung konstruktiver Maßnahmen, wie einer reduzierten Feuerdeckwandstärke. Des Weiteren ist der Fokus auch auf Bereiche mit hohen Wandtemperaturen auf der Kühlmittelseite zu legen, um Ablagerungen und Altern vom Kühlmittel entgegenzuwirken.

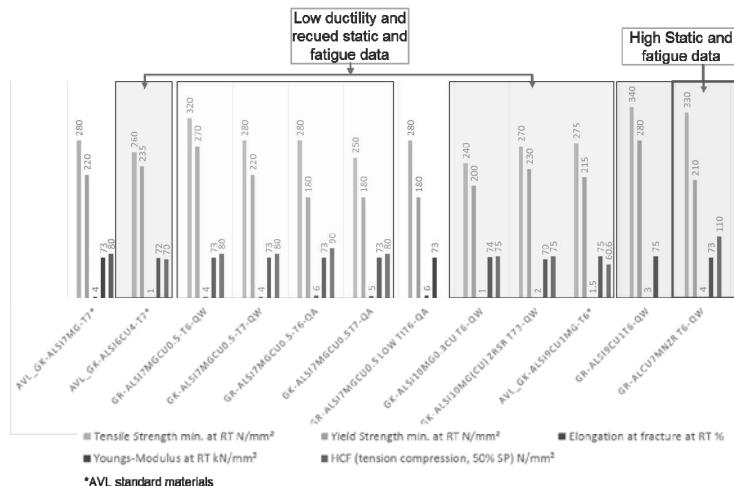


Bild 19: Statische und Dynamische Werkstoffdaten bei RT

Die Steigerung der HCF Lebensdauer von AlCu7 im Vergleich zu AlSi7Cu0.5Mg bestätigt das Potential mit AlCu7 für Hochleistungsmotoren.

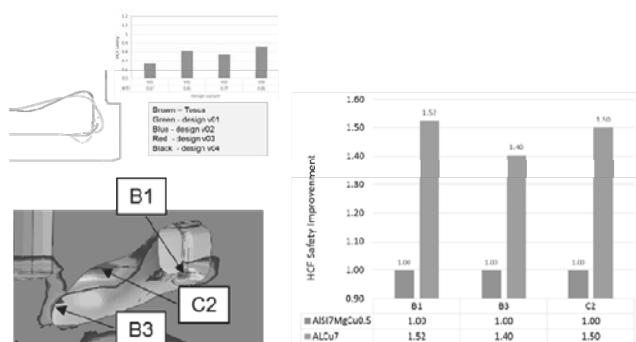


Bild 20: HCF Sicherheitsfaktoren im Vergleich AlSi7Cu0,5Mg zu AlCu7

Thermomechanik - TME

Die TMF-Anforderung für den Großserieneinsatz auf Basis von AVL Load Matrix beträgt etwa 3000 Zyklen. Dieser Wert liegt aber weit über den Anforderungen von Hochleistungsmotoren.

toren mit geringeren Lebensdaueranforderungen, beziehungsweise Laufleistungen, die typischerweise, je nach Einsatzweck bei etwa 1000 Thermoschock Zyklen liegen.

Die TMF-Daten für AlCu7, welche für die hier gezeigte Simulation verwendet wurden, stammen aus einem gerafften Materialprüfprogramm und sind bis 275 °C gültig, d.h. die Lebensdauerschätzung bei Temperaturen jenseits dieses Bereichs ist mit etwas höheren Streuungen zu betrachten.

Bei Temperaturen bis 260°C ist eine deutlich höhere TMF-Lebensdauer im Zylinderkopf mit AlCu7 festzustellen – im großen Bereich mit einem Faktor größer als 2. Bei Annäherung an Temperaturen bis 270 °C wird der Vorteil von AlCu7 geringer. Eine weitere Erhöhung der TMF-Lebensdauer bei AlCu7 ist mit weiteren konstruktiven Maßnahmen zu erzielen, wie durch Reduktion der Dicke des Zylinderkopfffeuerdeck. Diese Maßnahme ist möglich, da die dynamischen Sicherheitsfaktoren ausreichend hoch sind.

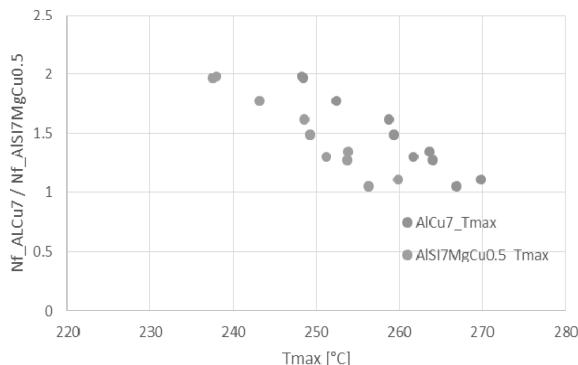


Bild 21: TMF Vergleich von AlCu7 mit AlSi7Cu0.5Mg abhängig von Tmax

### Umsetzung der Komponente für beide Legierungen

Die grundsätzliche Gießtechnik wurde für beide Werkstoffe sehr ähnlich gewählt, vom Prinzip im Schwerkraftguss mit Kernpaket mit Stahlbodenteil.

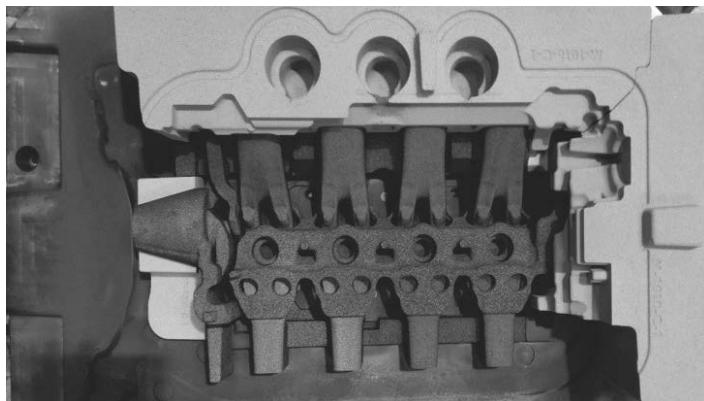


Bild 22: Kernpaketaufbau für die Prototypkomponenten

Dennoch waren für die Umsetzung der Prototypeteile Unterschiede in den Verfahren erforderlich, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

In der gießtechnischen Umsetzung ist in der Aufbereitung der Schmelze an der AlCu-Legierung eine Kornfeinung erforderlich. Die Wahl der optimalen Wärmebehandlung für niedrigste Eigenspannungen bedeutet für die AlSi7-Legierung ein T6-Verfahren mit konventioneller Luftabschreckung, während sich für die AlCu-Legierung eine T7-Behandlung mit Wasserabschreckung und Überalterung als zielführend erwiesen hat.

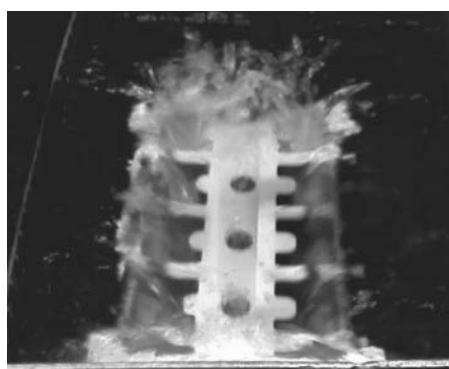


Bild 23: Wärmebehandlung mit Wasserabschreckung der HT200 Komponente

Die aus den Prototypeteilen erzielten mechanischen Eigenschaften hinsichtlich Streckgrenze, sowie der ertragbaren Dehnung sind in folgender Abbildung zusammengefasst.

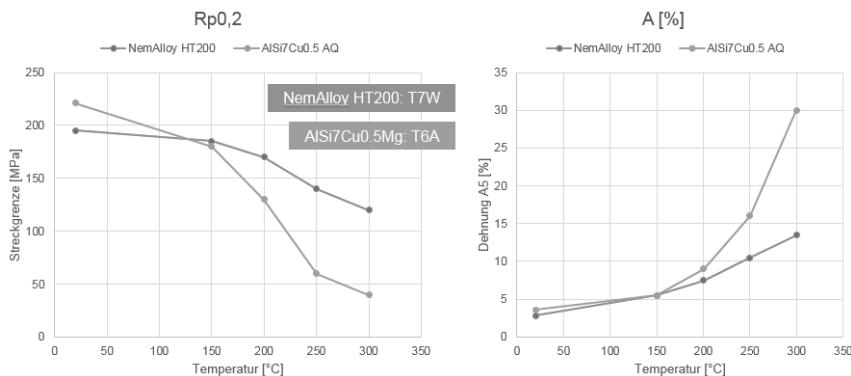


Bild 24: Streckgrenze und Dehnung der Legierungen aus dem Bauteil

Insgesamt sind die Eigenschaften der Bauteile in beiden Legierungen bei Raumtemperatur vergleichbar, für den Temperaturbereich über 200°C zeigt sich jedoch ein deutlicher Vorteil für die NemAlloy®-HT200 Legierung.

### Validierung des Hochleistungs-Zylinderkopfs

Um die Zuverlässigkeit von Höchstleistungsmotoren in der Serie sicher zu stellen, bedarf es einer Adaption von bestehenden Validierungsprogrammen [9]. Meist kann man für die Entwicklung eines leicht modifizierten Aggregats die Vorerfahrung aus schon bestehenden Motorenentwicklungen nutzen. Betritt man allerdings mit dem Motorkonzept Neuland, wie z.B. bei Motoren mit Leistungsdichten von 200kW/l, so birgt dies ein hohes Risiko für spätere Schadensfälle beim Kunden. Dieses Risiko ist einerseits bedingt durch den Einsatz neuer Komponenten und Technologien, die hohe mechanische und thermomechanische Belastungen ertragen sollen, andererseits durch das unbekannte Kundennutzungsverhalten. Abhängig, ob der neue Motor in einen Sportwagen oder in einem Sport Utility Vehicle eingesetzt wird, muss mit unterschiedlichen Motorbelastungen gerechnet werden. Um mit diesen Einflussfaktoren einen zuverlässigen Motor zu entwickeln, implementiert AVL den „Design Validation Plan“ (DVP) in den Entwicklungsprozess, der Verifikations- und Validierungsaufgaben kombiniert (Dauerlauferprobung am Prüfstand und im Fahrzeug). Für die Validierungsplanung kommt der AVL-Load Matrix™ Ansatz zum Einsatz [10,11].

### Load Matrix – Methodikansatz für Hochleistungsvarianten

Der AVL-Load Matrix Ansatz (LM) verbindet theoretische Überlegungen auf Ebene von failure modes (Bauteil-Schadart-Kombinationen) mit dem Dauerlaufprogramm über das Werkzeug der Schädigungsrechnung und Weibull-Analyse. Ziel des Ansatzes ist es, für die verbauten

Komponenten Validierungsmaßnahmen zu definieren. Verifikationsthemen werden durch Funktionstests, Robustheitstest („robustness testing“) oder auch HALT (Highly accelerated testing) am Komponentenprüfstand bzw. durch Front loading in der Simulation abgesichert, während die Validierung am Gesamtmotor mithilfe von Prüfstandstests und Fahrzeugtests durchgeführt wird. Die Definition der erforderlichen Tests und deren Laufzeit wird anhand der AVL-LM in einem 4 Stufigen Prozess durchgeführt:

- Systemanalyse
- Applikationen und Zielwerte
- Testprogramm und Belastungsanalyse
- Evaluierung & Optimierung

### Validierungsbeispiele am Zylinderkopf

Bild 25 zeigt schädigende Betriebsbedingungen in welchen ein Motor betrieben werden kann. Diese Betriebspunkte umfassen stationäre Betriebspunkte wie Niedriglast, Teillast und Hochlast und den transienten Betrieb, welcher noch weiter in verschiedene thermische Trägheiten (Zeitkonstanten der Komponenten), unterteilt werden kann. Zusätzlich gibt es Sonderthemen wie z.B. Heißabstellen, häufige Motorstarts und Langzeitstillstände.

Aufgrund der hohen mechanischen und thermomechanischen Belastung des Zylinderkopfes von Hochleistungsmotoren sind spitzendruckinduzierte Hochlast und transientes thermomechanisches Versagen relevant.

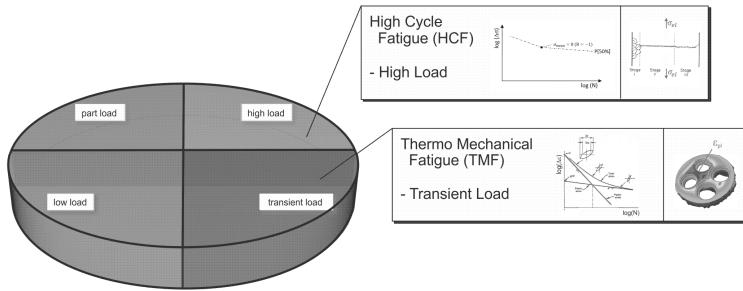


Bild 25: Schädigende Motorbetriebsbedingungen welche einen hohen Anteil an Bauteilschadartkombinationen adressieren.

### Ausblick

Bei der Definition neuer, durchgängig aufgeladener Motorenfamilien gilt der steigenden mechanischen und thermischen Lasten auf die Motorstruktur besondere Beachtung, um einerseits das Motorgewicht durch gezielten Leichtbau zu senken, andererseits das volle Verbrauchspotential durch Reibungsoptimierung erzielen zu können.

Der Motorenfamilienansatz mit modularem Komponentenbaukasten ermöglicht erhebliche Kostenvorteile für alle Motorvarianten. Für die Höchstleistungsvarianten, sowohl an Otto- als auch Dieselausführung, sind allerdings bei manchen Komponenten Sonderlösungen zielführender, um die Stückzahlvarianten nicht zu belasten.

Sorgfältige Konzeptauswahl und Optimierung, unterstützt durch den Einsatz moderner CAE Werkzeuge, ist die Basis im Entwicklungsprozess.

Der Einsatz neuer Werkstoffe, sowie optimierter Gieß- und Wärmebehandlungstechnologien ergänzt insbesondere für den mechanisch und thermisch hoch belasteten Zylinderkopf die konstruktive Optimierung in Hinblick auf Strukturfestigkeit und Thermomechanische Integrität.

Um die Zuverlässigkeit von Höchstleistungsmotoren in der Serie sicher zu stellen, bedarf es einer Adaption von bestehenden Validierungsprogrammen. Abhängig ob der neue Motor in einem Sportwagen oder in einem SUV eingesetzt wird, muss mit einer stark unterschiedlichen Motorbelastung gerechnet werden. Hinsichtlich der Dimensionierung der Komponenten ist die volle Nutzung der Belastungsgrenzen dabei eine Voraussetzung zur Erfüllung der Zielwerte. Um unter Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren einen zuverlässigen Motor, bzw. zuverlässige Komponenten zu entwickeln, nutzt AVL den „Design Validation Plan“ (DVP) im Entwicklungsprozess. Diese Planung kombiniert Verifikations- und Validierungsaufgaben (Dauerlauferprobung am Prüfstand und im Fahrzeug). Der Load Matrix (LM) Ansatz ist dabei eine zielführende Basis der Validierungsplanung unter Berücksichtigung der kunden- und applikationsspezifischen Einsatzprofile. Die Applikation der entwickelten Modelle der Schädigungsanalyse durch virtuelle Sensorik bietet Optionen zur gezielten Echtzeitbeurteilung der Bauteilbelastung und Schädigungskumulation im Fahrzeug.

## Literaturhinweise

- [1] Sorger, H.; Howlett, M.F.; Schnider, W.; Ausserhoffer, N.; Bartsch, P.; Weißbäck, M.; Soustelle, O.; Ragot, P.; Mallet, P.: Herausforderung CO<sub>2</sub>: Aggressives Downsizing am Dieselantrieb – Motorkonzeptdefinition. Wien, 31. Internationales Wiener Motorensymposium, 2010
- [2] Fraidl, G.; Dreisbach, R.; Kapus, P.; Sorger, H.; Weißbäck, M.: Diesel versus Otto: Synergie oder Wettbewerb. Wien, 35. Internationales Wiener Motorensymposium, 2014
- [3] Schöffmann, W.; Sorger, H.; Zieher, F.; Kapus, P.; Weissbäck, M.; von Falck, G.; Rehrl, C.; Hammer, M.; Kukucu, M.; Seiringer, C.; Howlett, M.F.; Prevedel, K.: Realization of Gasoline and Diesel High Performance Engines. Vienna, 36. International Vienna Motor Symposium, 2015
- [4] Schöffmann, W.; Sorger, H.; von Falck, G.; Howlett, M.F.; Weihrauch, K.: Leichtbau, Funktionsintegration und Reibungsreduktion – der Grundmotor im Spannungsfeld zwischen Kosten und CO<sub>2</sub>-Optimierung. Wien, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, 2013
- [5] Schöffmann, W.; Howlett, M.; Weihrauch, K.; Berger, R.; Pramberger, H.; Zieher, F.; Sorger, H.: Hochleistungsdiesel-Kurbelgehäuseentwicklung in Aluminium. Magdeburg, 7. VDI Tagung - Gießtechnik im Motorenbau, 2011
- [6] Sorger, H.; Schöffmann, W.; Wolf, W.; Steinberg, W.: Leichtbau von Zylinderkurbelgehäusen aus Eisenguss. In MTZ 76 (2015), N° 3, Seiten 42-47
- [7] Gosch, R.; Feikus, F.-J.: Thermisch isolierte Gaskanäle in Zylinderköpfen zur Verbesserung des Motorverhaltens. Magdeburg, 8. VDI Tagung - Gießtechnik im Motorenbau, 2015
- [8] Kniewallner, L.; Rafetzeder, M.; Stauder, B.; Djurdjevic, M.; Feikus, F.-J.: Entwicklung und Anwendung einer AlCu-basierten Hochleistungsgusslegierung für Zylinderköpfe. Magdeburg, 8. VDI Tagung - Gießtechnik im Motorenbau, 2015

- [9] Sorger, H.; Zieher, F.; Sauerwein, U.; Schöffmann, W.: Hochbelastete Zylinderköpfe für Otto- und Dieselmotoren. In MTZ 69 (2008), N° 2, Seiten 104-113
- [10] Zieher F. , Langmayr F.,; Ennemoser A. ,; Jelatancev A.,; Hager G., ; Wieser K.: Advanced Thermal Mechanical Fatigue Life Simulation of Cylinder Heads. 2004 ABAQUS Users' Conference
- [11] Osterwisch C., ; DeJack M.; Smolnikar M.:CAE Process for Developing Cylinder Head Design including Statistical Correlation and Shape Optimization, 2010 SAE

# Aluminium-Motorblöcke der neuesten Generation im CPS®-Verfahren

Dr. **Dirk Schnubel, Dr. Marcus Speicher,**

Nemak Dillingen GmbH, Dillingen/Saar;

Dr. **Leopold Kniewallner, Prof. Dr. Franz Josef Feikus,**

Nemak Europe GmbH, Frankfurt a.M.

## Abstract

Die stete Absenkung der gesetzlichen Grenzwerte hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Kraftfahrzeugen führen seitens der Automobilhersteller zu einer hohen Motivation Leichtbaupotentiale konsequent zu nutzen. Bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren kann man dabei durch die Auswahl von Aluminium sowohl Materialleichtbau umsetzen, als auch strukturellen Leichtbau betreiben, indem man die motorische Leistungsdichte steigert und durch dieses „Rightsizing“ immer kompaktere und damit leichtere Motoren konstruiert. Das Kurbelgehäuse als zentrales Bauteil im Verbrennungsmotor kann durch eine Steigerung der Werkstoffeigenschaften bei gleichzeitiger Zunahme der geometrischen Funktionalität mittels Integration von Kühlkanälen und Anbauteilen einen entscheidenden Beitrag dazu leisten.

Heute ist das CPS®-Verfahren ein etablierter Prozess zur Herstellung funktionaler, hochbelasteter Aluminium-Motorblöcke. Im Beitrag werden einige der aktuell am Markt erscheinenden Produkte samt gießtechnischen Neuerungen dargestellt. Zentrale Punkte sind hierbei das hoch produktive Serienfertigungskonzept, die gegossene Stegkühlung mit optimierter, doppelter Kanalgeometrie und die gießtechnologische Darstellung von Zylinderrohren zur thermisch gespritzten Laufbahnbeschichtung.

Abgerundet wird der Beitrag durch die Vorstellung aktueller Forschungs- und Entwicklungsergebnisse für die verfahrens- und werkstofftechnische Weiterentwicklung des CPS®-Verfahrens. Ein Fokus liegt hierbei auf der Nutzung alternativer Legierungen. Am Ende des Artikels wird kurz ein Ausblick auf mögliche zukünftige Einsatzfelder des CPS®-Verfahrens zur Herstellung komplexer, hochintegrierter E-Motorengehäuse mit innenliegenden Wasser- kühlungen gegeben.

## 1. Das CPS®-Verfahren

Im Gegensatz zu herkömmlichen Sandguss-Verfahren gewährleistet der hohe Automatisierungsgrad des CPS®-Verfahrens die wirtschaftliche Herstellung großer Stückzahlen [1], [2].

Die einzelnen Kerne werden direkt nach ihrer Herstellung im Sekundentakt mittels Robotermontage in mehreren simultanen Arbeitsschritten zu einer selbst tragenden Sandform zusammengefügt. Taktzeiten von 21-45 s sind dabei die Basis für eine sehr hohe Produktivität. Die Kernpakete bestehen aus bis zu 40 Einzelkernen und erlauben maximale Designfreiheit zur konsequenten Ausschöpfung von Leichtbaupotentialen, z.B. durch eine weitreichende Funktionsintegration in das resultierende Bauteil.

Die Kernmacherei in einer CPS<sup>®</sup>-Produktionslinie besteht aus acht bis zehn Kernschießmaschinen mit integrierter Sandmischlanlage und automatischem Werkzeugwechsel. Wie in Bild 1 zu sehen werden die frisch geschossenen Kerne auf dem unmittelbar vor den Kernschießmaschinen gelegenen Montageband sequentiell zu einem vollständigen Kernpaket zusammengebaut.

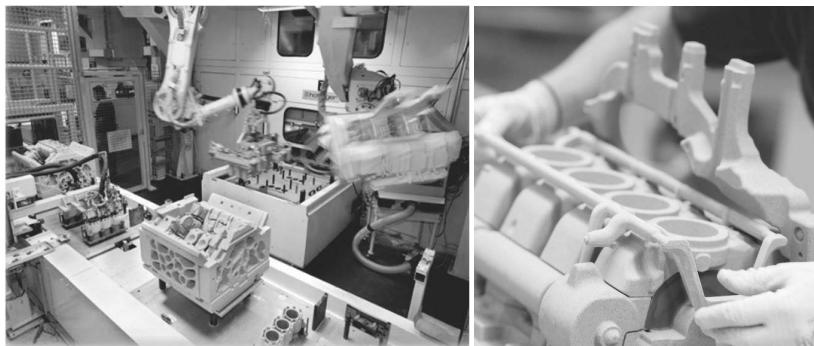


Bild 1: Automatisierte Kernmontage in Kernmacherei im CPS<sup>®</sup>-Verfahren  
Kernkontrolle am vormontierten Kernpaket

Während in den älteren Produktionslinien alle Kernschießmaschinen in Reihe ein Montageband bedienen, auf dem im so genannten Doppeltakt parallel zwei Kernpakte aufgebaut werden, wurde für die neuste Produktionslinie bei Nemak Dillingen ein neuartiges Konzept umgesetzt. Hier wurden jeweils vier Kernschießmaschinen zu einem autarken Strang zusammengefasst, auf denen parallel je ein Kernpaket produziert wird. Dieses neue Konzept bietet den Vorteil einer deutlich erhöhten Anlagenverfügbarkeit.

Das fertig montierte Kernpaket wird durch eine Pufferstrecke der voll automatisierten Gießline zugeführt. Im Zweikammer-Schachtschmelzofen wird Masselmaterial aufgeschmolzen. Alternativ kann zusätzlich auch Flüssigmetall bei der Überführung in den Warmhalteofen mit eingespeist werden. Der Warmhalteofen dient gleichzeitig zur Homogenisierung und Vorrei-

nigung des flüssigen Aluminiums. Die Überführung vom Warmhalteofen in den Gießofen erfolgt über eine fest in das System integrierte Impellerstation, wo durch eine Spülgasbehandlung nichtmetallische Einschlüsse aufgeschwemmt werden und gleichzeitig Wasserstoff aus der Schmelze entfernt wird. Der weitere Transport des Metalls erfolgt über ein kontinuierliches Schmelzesystem, bei dem die komplette Metallführung bis zur Sandgießform in einem geschlossenen Rinnensystem erfolgt (Bild 2, links). Durch diese Minimierung der freien Metallocberfläche und die Vermeidung turbulenter Umfüllvorgänge wird die Bildung neuer Oxide sowie die Wiederaufnahme von Wasserstoff vermieden. Über die Steuerung des Innendrucks im induktionsbeheizten Gießofen, der unter dem Rinnensystem sitzt, wird der Schmelzepegel am Gießstopfen immer konstant gehalten. Zum eigentlichen Kontaktgießvorgang dockt ein Kernpaket von unten an die Gießrinne an und der Stopfen wird zur Formfüllung geöffnet.

Der Gießvorgang beim CPS® Verfahren erfolgt über einen unten liegenden Speiser steigend in den eigentlichen Formhohlraum (Bild 2 rechts). Das bedeutet, dass der heiße, dem Gießofen zugewandte Speiser als erstes gefüllt wird, erst dann strömt das Aluminium in die Form.

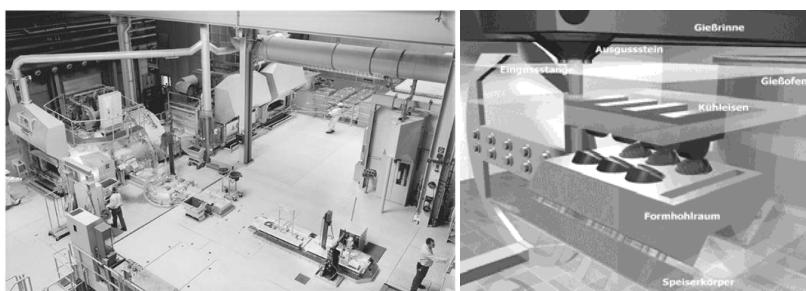


Bild 2: Gießerei CPS® Verfahren  
Kernpaket während des Füllvorgangs über den unten liegenden Speiser [3]

Somit erfolgt stets eine turbulenzarme Formfüllung, wodurch auch hier die Bildung neuer Oxide vermieden wird. Gleichzeitig besitzt der Speiserkörper auch einen maximalen Wärmeinhalt, da er dem Gießofen zugewandt ist und der Schmelztransport komplett über das Volumen des Speisers erfolgt. Der im Vergleich zum Gussstück heißere Speiser wird dann durch eine Drehung des gesamten Kernpaketes unmittelbar nach dem Gießen nach oben gewendet („roll-over“), so dass die Dichtspeisung des Gussstücks schwerkraftunterstützt mit optimalem Temperaturgradienten erfolgt. Der gesamte Vorgang des Gießens inklusive Roll-over ist innerhalb von 22-45 Sek. abgeschlossen. Derzeit wird im Werk Dillingen ausschließ-

lich eine AlSi8Cu3 Recyclinglegierung verwendet [4]. Im Vergleich zur Nutzung von Primärlegierung ergibt sich hierdurch für Nemak Dillingen jährlich eine Vermeidung von ca. 620 000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent und 93.000 t schadstoffbelastetem Rotschlamm [5].

Direkt nach dem Abguss durchlaufen die Kernpakete den „3 in 1“- Prozess. Dieser ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Im gekapselten Wärmebehandlungsofen werden die Bauteile thermisch entsandet, der Sand wird im Wirbelbett regeneriert und es erfolgt mit dem Lösungsglühen der erste Wärmebehandlungsschritt. Durch die saubere Verbrennung des organischen Binders im geschlossenen Ofen mit anschließender thermischer Nachverbrennung sind Emissionen auf ein Minimum reduziert. Zudem handelt es sich um einen besonders energieeffizienten Prozess. Neben der Nutzung der Gießwärme wird auch der Brennwert des organischen Cold-Box-Binders für den Prozess genutzt. Der große Vorteil dieser Technologie ist ein quasi geschlossener Sandkreislauf mit einer ressourcenschonenden Regenerierquote von ca. 98%.

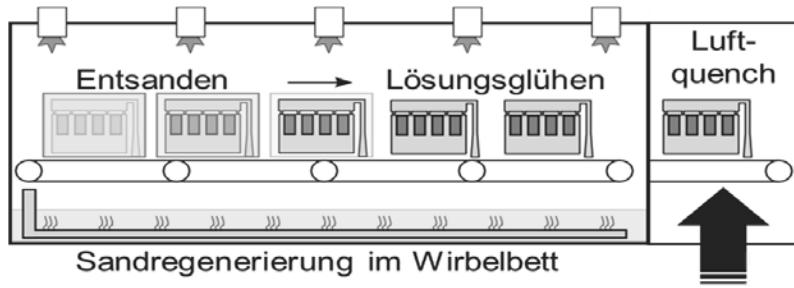


Bild 3: Schematische Darstellung des „3 in 1“- Prozesses.

Nach dem Lösungsglühen mit anschließender Luftabschreckung wird das Linienfertigungskonzept nach der FIFO-Systematik bis zum Schluss konsequent weitergeführt. Zudem erfolgt auch die Gussteilnachbehandlung voll automatisiert. Die Prozesse in jeder Zelle, angefangen bei einer mehrstufigen mechanischen Entsandung über die Entgratung bis hin zum Entfernen von Speiser und Kühleisen, erfolgen mittels Roboterhandlung. Den Transport zwischen den Zellen übernehmen automatisierte Rollenbänder. Bis zu visuellen Endkontrolle werden keine manuellen Operationen am Gussteil durchgeführt.

## 2. Technische Highlights aktuell am Markt erscheinender CPS AI-Motorblöcke

Das CPS®-Verfahren bietet die Möglichkeit die mechanischen Eigenschaften des Aluminiums an den hoch belasteten Bereichen in den Kurbelwellenlagern und auch im Steg zwischen

den Zylindern gezielt zu optimieren („local engineering“ [6], [7]). Dazu werden an den betreffenden Stellen im Hauptlager und an den Zylinderbohrungen Kühlelemente in das Sandkernpaket eingebracht, die eine schnelle Erstarrung des Aluminiums nach dem Gießen ermöglichen. Bild 4 zeigt dies exemplarisch am neuen Kurbelgehäuse Daimler OM654. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften an den betreffenden Stellen signifikant erhöht (Bild 4, links).

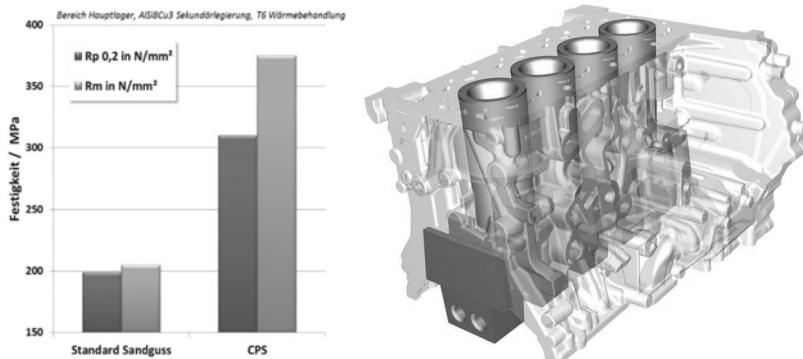


Bild 4: Eigenschaftsvergleich der statischen mechanischen Eigenschaften (links), Gussteil Daimler OM654 mit Kühleisen am Hauptlager und in Zylinderbohrungen

Eine weitere besondere Stärke des Kernpaketverfahrens liegt in den vielseitigen Möglichkeiten zur Funktionsintegration. Ein hervorragendes Beispiel hierfür sind gegossene Stegkühlkanäle zwischen den thermisch hoch belasteten oberen Zylinderrohren. Ein Abbilden dieser Kanäle im Gießprozess bietet gleich mehrere fertigungstechnische und funktionale Vorteile:

- Reduzierung des Fertigungsaufwandes im Motorenwerk durch das Entfallen aufwendiger Bohroperationen
- Dichtheits- und Funktionsprüfung bereits sehr früh in der Wertschöpfungskette
- optimale Gestaltung und Höhenlage der Kanäle im „Hot-Spot“ Bereich zwischen den Zylindern
- deutliche Temperaturreduzierung an kritischen Positionen im motorischen Betrieb

Bild 5 zeigt die gegossene Stegkühlung des bereits seit 2009 von Nemak Dillingen in Serie produzierten Zylinderkurbelgehäuses für den Ford 2.0l GTDI Motor. Von diesem Bauteil wurden seit der Markteinführung in 2009 bereits mehr als 3.5 Mio. Einheiten an den Kunden

ausgeliefert. Unter maximaler motorischer Last wird hier durch eine verbesserte Kühlleistung eine Temperaturreduzierung von mehr als 20 K im betroffenen Stegbereich erreicht.

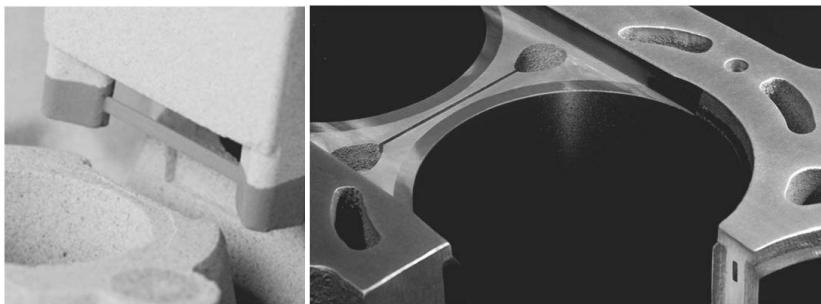


Bild 5: Kern zur Gestaltung eines Kühlkanals zwischen den Zylindern (links) und entsprechende Bauteilgeometrie im Ford 2.0l GTDI Motor

Bild 6 zeigt ein Beispiel für die Realisierung von gegossenen Stegkühlkanälen der neusten Generation. Im Vergleich zur der in 2009 etablierten Technik können hier problemlos mehrere Kühlkanäle pro Steg gleichzeitig dargestellt werden. Zudem ist es möglich variable, strömungsoptimierte Kanalquerschnitte abzubilden, was zu einer deutlichen Steigerung der Funktionalität führt. Bild 7 zeigt das Zylinderkurbelgehäuse des neuen Audi 3.0l-V6-TFSI Motors mit Serienanlauf bei Nemak Dillingen in 2016. Ein technisches Highlight dieses Bauteils ist die Implementierung einer solchen gegossenen Doppelstegkühlung. Durch eine kundenseitige berechnungsbasierte Designoptimierung konnten durch diese Technologie die Stegtemperaturen im Vergleich zum Vorgängermotor mit gebohrter Stegkühlung um mehr als 20 K gesenkt werden [8].

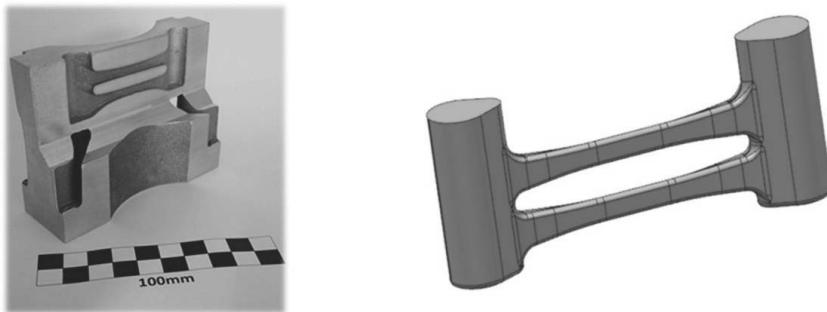


Bild 6: Beispiel für die Realisierung von gegossenen Stegkühlkanäle der neusten Generation mit strömungsoptimierten Querschnitten.

In Bild 7 (links) ist das Zylinderkurbelgehäuse des neuen 4.0l V8 Turbomotors von Porsche ebenfalls mit Serienanlauf in 2016 zu sehen. Auch hier kommt eine gegossene Doppelstegkühlung zum Einsatz.

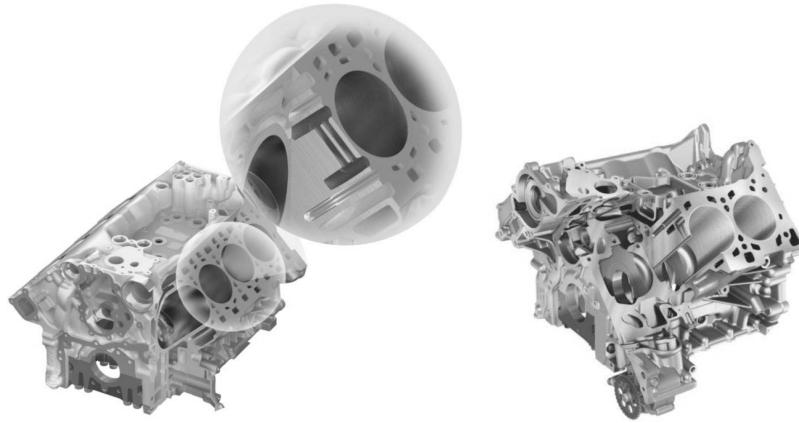


Bild 7: Zylinderkurbelgehäuse des neuen EA 839 V6T (rechts) und EA 825 V8T (links) mit geometrieoptimierter gegossener Doppelstegkühlung [8, 9].

Die Realisierung beider Zylinderkurbelgehäuses im Kernpaketverfahren hat es ermöglicht einen sehr hohen Integrationsgrad an Funktionen im Gussbauteil zu realisieren. In Kombination mit der Deep-Skirt-Bauweise wurde hierdurch ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion

des Motorgewichts geleistet. Beim Porsche V8T wurde eine Einsparung um 6.7 kg gegenüber dem Vorgängermotor realisiert, bei gleichzeitiger Steigerung der maximalen spezifischen Motorleistung. Beim Audi V6T wurden 14 kg Gewichtersparnis im Vergleich zum Vorgänger umgesetzt [8, 9].

Ein weiteres technisches Highlight des neuen Porsche V8 Turbomotors sind die mittels atmosphärischem Plasmaspritzen applizierten Zylinderlaufbahnbeschichtungen. Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, kommt hier bei Porsche ein mechanischer Aufrauprozess zum Einsatz, durch den eine mechanische Verklammerung der Spritzschicht mit dem Al-Grundwerkstoff erreicht wird.

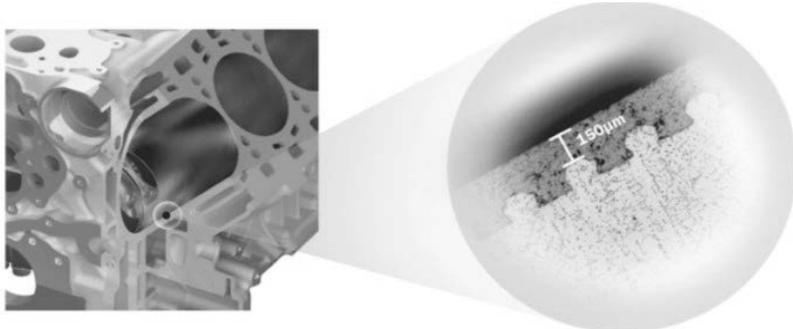


Bild 8: Thermisch gespritzte Zylinderlaufbahnbeschichtung des neuen EA 825 V8T von Porsche [9]

Eine wesentliche Grundlage für die technische Realisierung solch einer Zylinderlaufbahnbeschichtung ist die Bereitstellung eines defektarmen Grundgefüges im Umgussbereich des Zylinderkurbelgehäuses. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf einem porösitätsarmen Grundgefüge, das zudem noch frei von Hartphasen sein muss, um einen fehlerfreien Ablauf des sensiblen mechanischen Aufrauprozesses zu gewährleisten. Zudem kann die 100-200  $\mu\text{m}$  dicke Spritzschicht nur wenig zur strukturellen Stabilität des Zylinderrohres beitragen. Diese Funktion muss der Umguss aus Aluminium übernehmen, der dafür gerade bei Motoren mit hoher spezifischer Leistung, hohe mechanische Eigenschaften bereitstellen muss.

Auch hier hat Kernpaketverfahren technologisch eine Spitzenstellung. Durch das Einbringen passiver Kühlelemente im Zylinderrohr wird eine besonders schnelle Erstarrung, resultierend in einer sehr guten und porenarmen Gefügequalität erreicht. Dies resultiert in hohen mechanischen Eigenschaften an diesen hochbelasteten Stellen. Die in Kapitel 1 näher beschriebe-

ne effektive Schmelzebehandlung des CPS<sup>®</sup>-Verfahrens, gefolgt von der beruhigten, steigenden Formfüllung im Kernpaket, minimiert zudem den Anteil störender Hartphasen im Gefüge des Aluminiums.

Das hohe Eigenschaftsprofil von CPS<sup>®</sup>-Motorblöcken macht auch einen Einsatz von Zylinderlaufbahnbeschichtungen für Dieselmotoren interessant. So wird der neue Daimler OM654 2.0l Diesel mit einer thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnbeschichtung ausgestattet. Dieses Kurbelgehäuse des ersten Vollaluminium-Diesel-Vierzylinders von Mercedes wird ebenfalls von Nemak Dillingen im CPS<sup>®</sup>-Verfahren hergestellt. Gegenüber dem Vorgängermotor wurde das Gesamtgewicht um 35 kg reduziert, was einer Einsparung von 18 % entspricht. Gleichzeitig wurde bei 0.15l geringerem Hubraum die Leistung von 125 kW auf aktuell 143 kW gesteigert [10]. Weitere Highlights aus gießtechnischer Sicht sind der besonders hohe Integrationsgrad als auch die dargestellten mechanischen Eigenschaften des Gussteils. In gemeinsamer Entwicklung mit dem Kunden konnten höchste Festigkeiten durch eine konsequente Optimierung der lokalen Erstarrungsbedingungen für die hochbelasteten Bauteilbereiche erreicht werden. Hier sind speziell die Geometrieoptimierung der im Kernpaket befindlichen Kühlkörper, sowie ein genau an das Anforderungsprofil angepasster neuer Wärmebehandlungsprozess zu nennen (Bild 4, rechts).

Ein Paradebeispiel für strukturellen Leichtbau mit dem CPS Verfahren ist der 2,0 l Diesel von BMW, der aktuell in der 3. Generation B47 hergestellt wird (Bild 9).

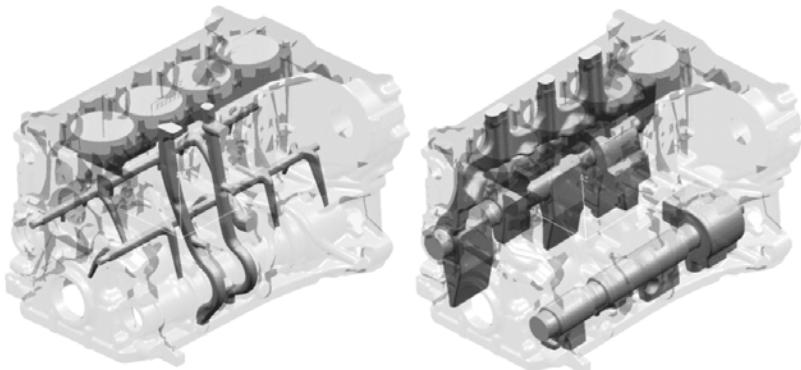


Bild 9: Zylinderkurbelgehäuse des BMW 2.0l Dieselmotors

Hier konnten neben dem sehr schlanken Design des Grundmotors durch konsequente Ausnutzung der Leichtbaupotentiale im CPS maximale Gewichtsreduzierungen umgesetzt werden. In das Gussteil integrierte Ausgleichswellengehäuse und das konturnahe Vorgießen von Öl- und Wasserkanälen erlauben neben anderen Designaspekten ein Gewichtspotential bis zu 25% [11], [12]. Das vorbearbeitete Rotheil wiegt trotz des hohen Integrationsgrades deutlich unter 24 kg.

### 3. Potentiale für die weitere Optimierung der mechanischen Eigenschaften

Wie in der Prozessbeschreibung des CPS®-Verfahrens dargelegt, wird im Werk Dillingen derzeit ausschließlich eine AlSi8Cu3 Sekundärlegierung eingesetzt. Bild 10 zeigt anhand von Messwerten das Potential für eine weitere Eigenschaftssteigerung durch den Einsatz einer Fe-armen Legierung. Durch Reduktion des Eisengehalts von 0.5 auf 0.15 Gew. % lassen sich bei unveränderter Wärmebehandlung eine Erhöhung der Bruchdehnung und eine leichte Steigerung der Zugfestigkeit  $R_m$  erreichen. Mit Reduktion des Fe-Gehaltes sinkt die Triebkraft zu Ausscheidung von spröden, teils plattenförmigen Fe-haltigen intermetallischen Phasen während der Erstarrung. Durch die Vermeidung dieser versprödenden Phasen im Gefüge erhöht sich vor allem die Duktilität.

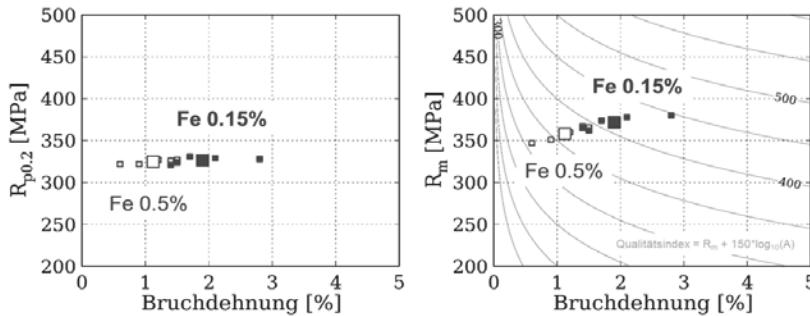


Bild 10: Vergleich der statischen mechanischen Eigenschaften für die AlSi8Cu3 Sekundärlegierung (Fe=0.5%) und einer Fe-armen Variante (Fe=0.15%) gemessen im Zylindersteg von Prototypen Kurbelgehäusen.

Auch der Einsatz von Zusatzprozessen wie dem Heiß-Isostatischen-Pressen (HIP) kann zur Eigenschaftssteigerung genutzt werden. Bild 11 zeigt dies am Beispiel von Zugversuchsergebnissen aus dem Lagerstuhlbereich. Durch den HIP-Prozess erfolgt eine Nachverdichtung des Gefüges, bei der die Mikroporosität weiter vermindert wird. Dies äußert sich in einer Er-

höhung der Duktilität bei nahezu gleicher Festigkeit. Besonders interessant ist der Einsatz des HIP-Prozesses zur weiteren Steigerung der Ermüdungsfestigkeit, da hier Poren oft als dominante rissinitierende Defekte wirken. Den geschilderten technischen Potentialen des HIP-Prozesses stehen jedoch auch einige Nachteile gegenüber. Hier sind die zusätzlichen Prozesskosten zu nennen, als auch mögliche Geometrieveränderungen der Bauteile durch die initiierten Kriechprozesse. Das Design der Gussstücke ist darauf sorgfältig auszulegen.

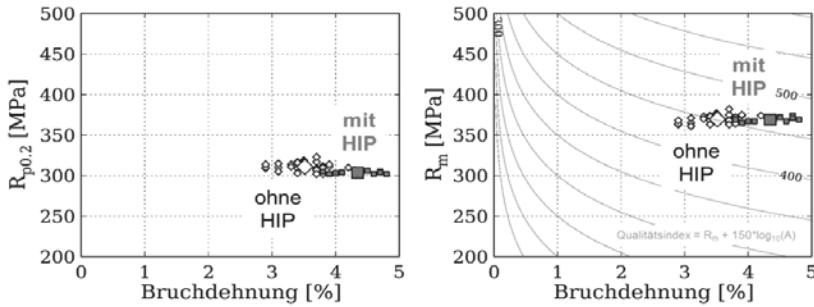


Bild 11: Vergleich der statischen mechanischen Eigenschaften für die AlSi8Cu3 Sekundärlegierung (Fe=0.5%) ohne und mit HIP-Behandlung gemessen im Lagerstuhl von Kurbelgehäusen.

Das Potential für eine sprunghafte Steigerung der mechanischen Eigenschaften bieten alternative Legierungssysteme, wie z.B. das AlCu-System. Das hohe Eigenschaftspotential der Legierungen auf AlCu-Basis ist seit geraumer Zeit bekannt. Der Einsatz dieser Legierungen beschränkt sich bisher allerdings auf Spezialanwendungen für Kleinserien. Dies begründet sich vor allem darin, dass die gießtechnische Darstellung von komplexen Bauteilen im Vergleich zu AlSi-Legierungen deutlich erschwert ist. Gründe hierfür sind die höhere Warmrissneigung, die geringeren Fließeigenschaften, das geringere Speisungsvermögen sowie die höhere Neigung zur Lunkerbildung.

Wichtige Stellschrauben zur Beeinflussung der Gießeigenschaften sind die Legierungszusammensetzung sowie die Schmelzebehandlung. Bild 12 zeigt hierzu Extrembeispiele aus einer Serie von Grundlagenversuchen an Realbauteilen. Die linke Konfiguration zeichnet sich im eher langsam erstarrenden Stehbolzenbereich durch ein grobkörniges dendritisches Gefüge aus. Zudem wird die Bildung von Warmrissen im Zylinderrohr beobachtet. Im Vergleich hierzu weist die optimierte Kornconfiguration rechts bei gleichen Gieß- und Erstarrungsbedingungen ein sehr feinkörniges, globulares Gefüge ohne Warmrisse auf.

Die größten Herausforderungen für die Herstellung hoch komplexer Bauteile in einer AlCu-Legierung sind das besagte geringere Speisungsvermögen, sowie die höhere Neigung zur Lunkerbildung im Vergleich zur AlSi8Cu3 Standardlegierung. Dies betrifft im besonderen die eher langsam erstarrenden äußeren Kurbelgehäusebereiche. Das Schaffen der gießtechnischen Randbedingungen, auch Kurbelgehäuse der neusten Generation defektfrei in einer AlCu-Legierung herstellen zu können, ist ein Fokus der laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Die hochbelasteten inneren Bauteilbereiche wie Lagerstuhl und Zylinderrohr können im Standard CPS®-Prozess bereits heute ohne weitere Prozessmodifikationen mit einer defektfreien Mikrostruktur dargestellt werden. Bild 13 zeigt das am Beispiel des feinkörnigen, porenarmen Gefüges aus dem Lagerstuhl eines in AlCu4Ti gegossenen Kurbelgehäuses.

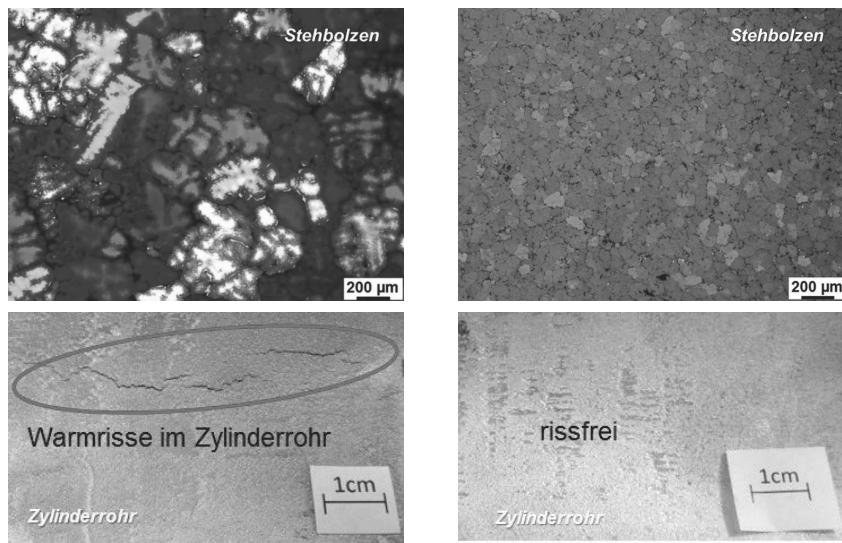


Bild 12: Grundlegende Bauteilversuche mit unterschiedlichen Legierungsvarianten und Schmelzebehandlungen im AlCu-System

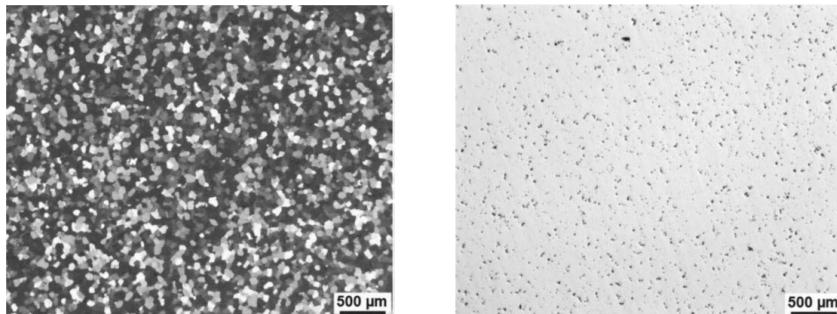


Bild 13: Feinkörnige Mikrostruktur aus dem Lagerstuhl eines in AlCu4Ti gegossenen Kurbelgehäuses mit optimierter Konfiguration.

Das enorme Potential der AlCu-Legierungen zeigt der Vergleich der Zugversuchsergebnisse im Lagerstuhl in Bild 13. Sowohl die Festigkeit als auch die Duktilität sind signifikant höher. Das Hauptaugenmerk der laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt auf der Optimierung von Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlung zur optimalen Anpassung des Eigenschaftsprofils an die Anforderungen im motorischen Betrieb.

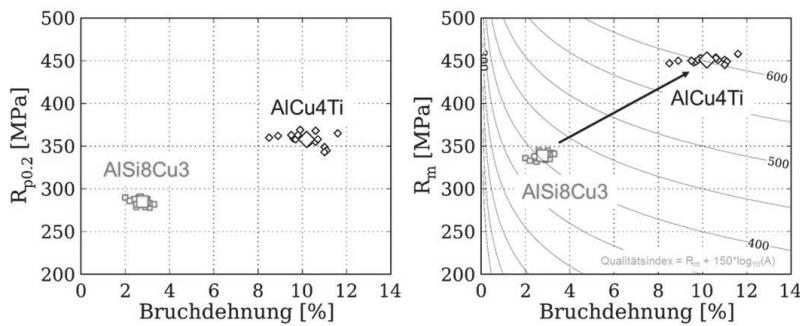


Bild 14: Vergleich der statischen mechanischen Eigenschaften der Legierungen AlSi8Cu3 und AlCu4Ti gemessen im Lagerstuhl.

## 5. Anwendungsfeld Elektromobilität

Ein weiterer Schwerpunkt der aktuellen Forschung und Entwicklung ist der Einsatz des CPS®-Verfahrens für zukünftige Anwendungen im Bereich der Elektromobilität. Speziell bei den Gehäusen des E-Motors ist ein Trend zu verstärkter Integration zu beobachten [13].

Neben dem eigentlichen Gehäuse um den E-Motor werden auch die Einhausung für die Leistungselektronik und Teile der Getriebeummantelung in ein gemeinsames Bauteil integriert. Dem Design des Wassermantels wird hierbei eine besonders Aufmerksamkeit entgegengebracht. Ein im Gussteil integriertes Kühlkonzept vermeidet Fügenähte und Dichtungen, die sowohl thermisch als auch mechanisch immer höher belastet werden. Zukünftige Gehäusestrukturen berücksichtigen diese erhöhten Anforderungen durch in sich geschlossene, gegossene Kühlkonzepte.

## 6. Zusammenfassung

Der CPS®-Prozess hat sich als hoch produktiver Prozess zur Großserienherstellung von Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen am Markt etabliert. Vielfältige Designmöglichkeiten erlauben die Umsetzung von Leichtbaupotentialen sowie gleichzeitig auch die Realisierung einer hohen Funktionsintegration, z. B durch gegossene Kühlkanäle zwischen den Zylinderbohrungen. Ein Einsatz in hochbelasteten Diesel- und Ottomotoren der neusten Generation wird durch sehr gute mechanische Eigenschaften an hochbelasteten Stellen ermöglicht.

Weitere Eigenschaftssteigerungen sind die Motivation aktuell laufender Entwicklungsarbeiten. AlCu-Legierungssysteme bieten ein hohes Potential das Niveau der mechanischen Eigenschaften signifikant zu erhöhen.

Ein sehr wichtiges, aktuelles Schwerpunktthema ist die Erweiterung des Anwendungsfeldes durch die Elektromobilität. Der wahrnehmbare Trend zur Erhöhung des Integrationsgrades bei Gehäusen für Elektroantriebe, z.B. durch die Vereinigung von Leistungselektronik, E-Motor und Getriebestufe in einem integralen Gehäuse, bietet hier interessante Anknüpfungspunkte. Insbesondere durch seine vielfältigen geometrischen Gestaltungsmöglichkeiten sind dem CPS®-Verfahren bei der Gestaltung eines gegossenen innenliegenden Wasserkühlkreislaufes kaum Grenzen gesetzt.

## 7. Literatur

- [1] Barschkett, D.; Lellig, K.; Püschel, J.; Speicher, M.: „Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium für V6-Dieselmotoren von Daimler-Chrysler“, MTZ 67 (2005), Nr. 2, S. 118–123
- [2] Smetan, H.: „Einsatz des Kernpaketverfahrens im Werk Dillingen der VAW Alucast GmbH“; Gießerei (1996), Nr. 3, S. 13–17
- [3] Kube, D.; Speicher, M.: „Fertigungstechnologie zur Großserienproduktion von Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium“, Tagungsband FTK 2008 – Fertigungstechnik für die Zukunft (2008), S. 265 – 276
- [4] Feikus, F. J.; Heusler, L.; Lellig, K.; Otte, M. O.: „Optimierung einer AlSi-Gusslegierung und anwendungsorientierte Entwicklung der Gießtechnik zur Herstellung hochbelasteter Motorblöcke“; Gießerei 88 (2001), Nr. 11, S. 25–32
- [5] Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry, EAA, 2008
- [6] Klaus Lellig, Markus Nolte, Rolf Gosch, Detlef Kube, Andre Gröschel, Bernhard Stauder, Dirk Ragus: „New Light Weight Concepts in Engine Design and Manufacturing: Responses to New Challenges in Modern Vehicle Construction“, 31st International Vienna Motor Symposium 2010
- [7] D. Kube, M. Speicher: “Casting mould for casting a cast part and use of such a casting mould”, Patent Application No. 20100139884 (2007)
- [8] J. Königstein, G. Bonn, C. Brinkmann, G. Fröhlich, T. Heiduk, J. Jablonski: „Der neue 3.0l-V6-TFSI-Motor von Audi“, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 12 (2016), Nr. 799, Band 1, S.24-48
- [9] J. Kerner, T. Günther, M. Werner, A. Kronich, M. Krämer, A. Kramer, C. Pleuß, S. König, W. Liesen, F. Maier: „Der neue V8 Turbomotor von Porsche“, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 12 (2016), Nr. 799, Band 1, S. 49-70
- [10] H. Saas, T. Eder, T. Tschamon, J. Böhm, H.-C. Behling: „Friction Optimization and Lightweight Construction as Key Development Areas for The New Mercedes Engine Family“, Tagungsband 25. Aachener Kolloquium (2016), S. 145-157
- [11] Steinparzer, F.; Mattes, W.; Nefischer, P.; Steinmayr, T.: „Der neue Vierzylinder-Dieselmotor von BMW“, MTZ 69 (2007), Nr. 11 und 12
- [12] Gruber, G.; Prandstötter, M.; Hollnbuchner, R.: „Integriertes Ausgleichswellensystem des neuen Vierzylinder-Dieselmotors von BMW“, MTZ 69 (2008); Nr. 6; S. 518–524
- [13] C. Heiselbetz et al.: „Herausforderung E-Drive Komponenten – Gießtechnische Lösungen“, 9. VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau 2017“ Tagungsband, im Druck (2017)



# Entwicklung von Al-Legierungen durch Nutzung von JMatPro®

## Development of Al alloys by utilizing JMatPro®

M. Sc. Thomas Stürzel, Daimler AG, Ulm

### Kurzfassung

Mit dem CAE-Tool JMatPro® ist eine effiziente und schnelle, virtuelle Werkstoffentwicklung möglich. Durch systematische Berechnungen wird eine gezielte Gefügeoptimierung und Kennwerterreichung aufgezeigt. Im Nachfolgenden werden praktische Beispiele zur Anwendung von JMatPro® für die Legierungsentwicklung dargestellt.

### Abstract

The CAE-Tool JMatPro® enables an efficient and fast virtual material development and engineering. By means of systematic computations, a targeted optimization of the microstructure and rapid attainment of mechanical characteristics is demonstrated. Practical examples of the application of JMatPro® for alloy development are shown below.

### 1. CAE-Tool JMatPro® für Legierungsentwicklung und Prognose von Werkstoffeigenschaften

Das Simulationstool JMatPro® der Firma Sente Software Ltd® ermöglicht die Berechnung der Eigenschaften und des Verhaltens von Legierungen, die auch aus mehr als zwei Elementen bestehen. Unter Einbezug verschiedener theoretischer Materialmodelle sowie Eigenschaftsdatenbanken eröffnet JMatPro® thermodynamische Berechnungen gewünschter Materialeigenschaften. Im festen Zustand können neben stabilen und metastabilen Phasengleich/ungleichgewichten auch bestimmte Eigenschaften wie thermische Leitfähigkeit und Elastizitätsmodul einzelner Phase eines Mehrkomponentensystems durch entsprechende Mischungsregeln ermittelt werden. Sobald die Eigenschaften der einzelnen Phasen definiert wurden, lassen sich die endgültigen Legierungseigenschaften mit Hilfe entsprechender Mischungsregeln berechnen. Diese Modelle wurden zu Anfangs für zweiphasige Systeme entwickelt und anschließend entsprechend erweitert, sodass Berechnungen für Mehrkomponentensysteme möglich sind. Für die wichtigsten Hauptphasen in Aluminium-, Eisen-, Magnesi-

um-, Nickel- und Titan-Legierungen existieren umfangreiche Datenbanken der relevanten Parameter, die innerhalb von Experimenten im festen Zustand bestätigt wurden. Zudem werden Beziehungen zwischen den Eigenschaften (z.B. elektrische und thermische Leitfähigkeit) genutzt, um andere Eigenschaften ohne Verwendung zusätzlicher Datenbanken zu ermitteln. Dazu gehören u.a. Dichte, Ausdehnungskoeffizient und Diffusionsvermögen. Für Gießsimulationen spielen vor allem thermodynamische und physikalische Eigenschaften der Schmelze und der Festphase eine wichtige Rolle. Die Eigenschaften (u.a. Dichte, thermische Leitfähigkeit, Festphasenanteil, Erstarrungsverhalten, Viskosität) sind von der Temperatur abhängig und lassen sich experimentell nur aufwändig ermitteln. Daher liegen nur wenige experimentelle Informationen zu komplexen Mehrkomponentensystemen vor. Aus diesem Grunde wurde ein entsprechendes Modul implementiert, durch das eine thermodynamische Modellierung kritischer und relevanter thermophysikalischer Eigenschaften verschiedener Legierungen, wie Aluminium-Legierungen, für die Gießsimulation möglich ist. Weiterhin kann mit Hilfe von JMatPro® die flüssige Phase während des Erstarrungsvorganges modelliert werden, was insbesondere für Gießsimulationen interessant erscheint. Im Zusammenhang mit dem Gullivier-Scheil Modell und den physikalischen Eigenschaften der festen Phasen können somit zuverlässige Vorhersagen physikalischer Eigenschaften während der Erstarrung getroffen werden.

Neben all diesen für die Gießsimulation relevanten Größen ist auch die Berechnung mechanischer Eigenschaften wie Dehngrenze, Zugfestigkeit und Härte sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen oder nach einem Temperatureinfluss möglich. Diese Berechnungen basieren auf der Modellierung der sich bildenden Ausscheidungen im Legierungssystem. Diese Ausscheidungen können ebenfalls entsprechend der gewünschten Wärmebehandlung für T5 oder T6 vorhergesagt werden. Zusätzlich ist die Abschätzung möglicher Phasenumwandlungen in Abhängigkeit der Wärmebehandlung bzw. Abschreckgeschwindigkeit in Form von ZTU-Diagrammen möglich. Relativ neu ist die Implementierung der Berechnung von Fließkurven für die Umformung von Aluminium-Legierungen. Diese bieten ohne Durchführung aufwändiger Versuche einen ersten Anhaltspunkt für das Verhalten neu entwickelter Legierungen.

## 2. CAE-Optimierung der Wärmebehandlung

Ausgangspunkt der CAE-Optimierung der Wärmebehandlung waren Schwankungen der Kennwerte eines Serienbauteils. Die geforderten Eigenschaften eines Schmiedebauteils mit eng begrenzter Legierungszusammensetzung wurden nicht sicher erreicht. Die bisherige Standardwärmebehandlung wurde im Labormaßstab mittels eines Prinzipbauteils nachge-

stellte und zeigte vergleichbare Schwankungen der Ergebnisse. Aufgabe war es nun mittels MatPro® eine zielführende, stabile Wärmebehandlung aus Berechnungen abzuleiten, welche großserienfähig umsetzbar ist. In einem ersten Schritt wurde mittels JMatPro® eine T6-Kurve als Funktion der Zeit und Temperatur berechnet um die Grenze zwischen unter- und überaltertem Zustand zu erkennen. Anhand dieser Kurve wurde die bisherige Standardwärmebehandlung als stark unteralterter Zustand identifiziert. Anschließend wurden serientaugliche Prozessparameter abgesteckt und eine Versuchsreihe gefahren. Resultierend aus den Berechnungen und Versuchen wurden die geforderten Kennwerte mit den neuen, moderateren Wärmebehandlungsparametern sicher erreicht.

### **3. Elastische Kenngrößen vs. Ultraschallmessungen**

Elastische Kenngrößen wie Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl sind für die Bauteilsimulation unerlässlich. Die sichere Vorhersage dieser Kenngrößen ohne großen experimentellen Aufwand ist u.a. mit Ultraschallmessungen möglich, sofern die Bauteile bereits real existieren. JMatPro® bietet die Möglichkeit der Berechnung elastischer Kenngrößen. Ein Vergleich mit Ultraschallmessungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und damit eine realitätsnahe Berechnung. Die Bestimmung des E-Moduls anhand des quasistatischen Zugversuchs ist hingegen immer mit einer vergleichsweise starken Streuung der Messwerte verbunden.

### **4. Gefüge von Al-Gussbauteilen in as-cast/T5**

Die Vorhersage des Gefüges von Aluminium-Gussbauteilen ist für Entwickler von höchster Bedeutung. JMatPro® eröffnet die Möglichkeit, mit der Vorgabe der Legierungszusammensetzung, der Berechnung der auftretenden Phasen sowie Phasenanteile und deren Erstarrungs-/ Bildungstemperaturen. So wird für eine AlSi10Cu3Fe Legierung z.B. eine Fülle an intermetallischen Phasen neben dem Aluminiummischkristall und eutektischem Silicium vorausgesagt:  $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ ;  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2(\text{Fe},\text{Ni})$ ,  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_6\text{Si}_6$ . Anhand von Erfahrung und Literatur in Kombination mit geschickter Interpretation des Erstarrungsverhaltens ist der Anwender von JMatPro® in der Lage das zu erwartende Gussgefüge vorherzusagen und zu skizzieren.

### **5. Warmfestigkeit als $f(T,t)$**

Eine Prognose der Warmfestigkeit von Aluminium-Legierung wird für Powertrain-Anwendungen immer wichtiger. Mit JMatPro® ist die Berechnung der Festigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit möglich. Durch geschickte graphische Darstellung kann so die

theoretische Warmfestigkeit für eine definierte Wärmebehandlung abgeschätzt werden. Damit können maximale Betriebstemperaturen oder Lebensdauer von Bauteilen in einem ersten Ansatz bewertet werden.

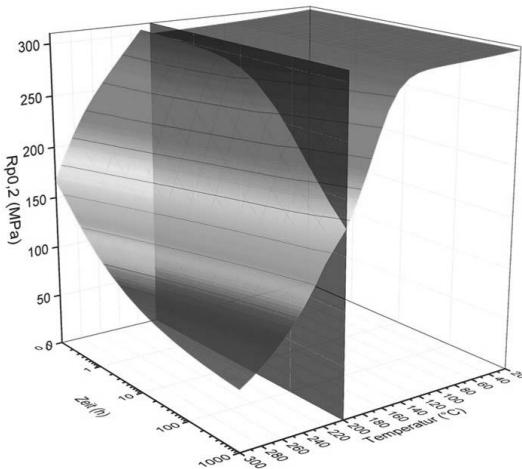


Bild 1: Warmfestigkeit einer AlSi9Cu3Fe-Legierung nach T5-230°C. Es ist erkennbar, dass mit steigender Temperatur und Zeit bei erhöhter Temperatur die Dehngrenze sinkt.

## 6. Isoplethe

Bei der Festlegung von Legierungsbereichen für Lieferantenspezifikationen ist es unerlässlich neben der Ziellegierung auch einen technisch machbaren Legierungsbereich zu nennen. Mit Hilfe der Berechnung von Isoplethen kann für Mehrkomponentensysteme die Variation eines Elements hinsichtlich des Einflusses auf die Phasenbildung untersucht werden. Diese Gleichgewichtsberechnungen dienen als erster Anhaltspunkt für eine mögliche Einschränkung des Legierungsbereichs z.B. in Abhängigkeit der maximal möglichen Lösungsglühtemperatur, wenn dennoch alle Magnesium- und Kupfer-haltigen intermetallischen Phasen aufgelöst werden sollen. So ist der Legierungsbereich auf das gewünschte Gefüge auch im Hinblick auf Materialkosten optimierbar.

## 7. Phasenanteile bei Gullivier-Scheil-Erstarrung für Gussbauteile

Bei der Herstellung von Gussbauteilen sind Isoplethe, d.h. Gleichgewichtsphasendiagramme, nicht immer hilfreich, da ein Gussgefüge in aller Regel nie dem Gleichgewichtszustand entspricht. In diesem Falle ist die Berechnung der auftretenden intermetallischen Phasen sowie deren Anteile mittels des Gullivier-Scheil Modells realitätsnäher. Mit

entsprechendem Rechenaufwand können auch hier Darstellungen berechnet werden, die dem Ungleichgewichtsfall der Isoplethe entsprechen. Diese Diagramme liefern zusätzlich den Phasenanteil in Abhängigkeit des varierten Legierungselements und stellen somit dreidimensionale Diagramme dar, anhand derer das Erstarrungsverhalten eines Legierungsreichs beurteilt werden kann.

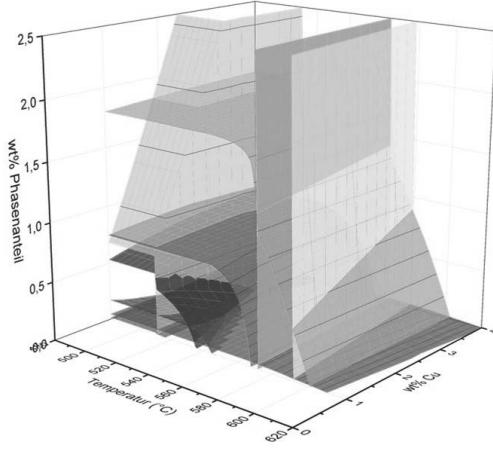


Bild 2: Schematische Darstellung der Phasenanteile nach Gullivier-Scheil Modell einer AlSi9Cu3Fe-Legierung in Abhängigkeit der Cu-Konzentration der Legierung. Hier wird deutlich, wie sich die Erstarrungstemperaturen und Anteile der sich bildenden Phasen in Abhängigkeit der Cu-Konzentration verschieben. Diese Berechnungsmethode ist für das Gefüge von Al-Gussbauteilen realitätsnäher als Gleichgewichtsberechnungen.

## 8. Lösungsglühparameter

Der Schritt des Lösungsglühens für T6 ist ein deutlicher Kostenfaktor für diese Wärmebehandlung. Somit erscheint es interessant diesen Wärmebehandlungsschritt entsprechend der Legierung individuell zu optimieren und so das optimale Kosten/Nutzen-Verhältnis zu generieren. Anhand der Legierungszusammensetzung und der Erstarrungsrechnung wird ein Ausgangszustand des Gefüges berechnet. Anschließend kann für eine gewünschte Lösungsglühtemperatur die Homogenisierung des Aluminiummischkristalls in Abhängigkeit der Zeit berechnet werden um so die minimale Lösungsglühdauer abzuschätzen. Die Lösungsglühtemperatur sollte zuvor mit Hilfe des Isoplethen bestimmt werden. Anschließend wird die

Mischkristallkonzentration der ausscheidungsrelevanten Elemente dargestellt und somit im nächsten Schritt die Optimierung der Warmauslagerung ermöglicht.

### 9. Ausscheidungen als $f(T,t)$

Bei bekannter Legierungszusammensetzung und Lösungsglühtemperatur wird basierend auf einem idealen Abschreckprozess die Entstehung von Ausscheidungen in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur der Auslagerung berechnet. Dabei werden die entsprechenden metastabilen, härtenden Phasen sowie die stabilen Gleichgewichtsphasen vorhergesagt. Anhand der graphischen Darstellung in einem dreidimensionalen Zeit-Temperatur-Phasenanteil-Diagramm ist eine schnelle und einfache Abschätzung der optimalen T6-Warmauslagerung möglich. Zusätzlich ist die Abschätzung des Erreichens der Überalterung anhand Berücksichtigung der stabilen Ausscheidungen denkbar.

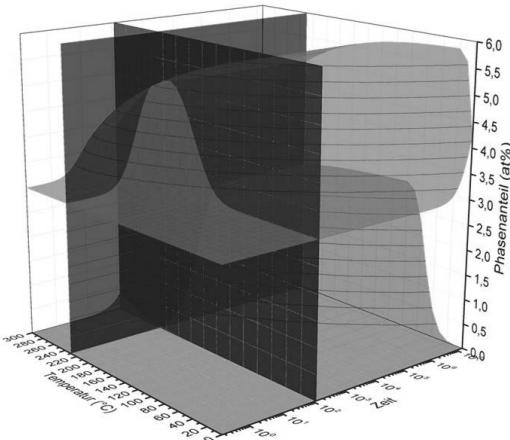


Bild 3: Schematische Darstellung der Ausscheidungen  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$  (oben) und deren Precursoren (unten) für eine T6-Wärmebehandlung mit 465 °C Lösungsglühen und 230 °C Warmauslagerung. Mittels der dreidimensionalen Darstellung wird eine gleichzeitige Einschränkung von Temperatur und Zeit der Warmauslagerung ermöglicht.

# Gussteileinstandsetzung mittels Laserschweißen – Wie Gießereien, Bearbeiter und OEMs ihre Effizienz, Rendite und Prozesssicherheit nachhaltig steigern können

**Marco Reichle, B.A.,**

Reichle GmbH Gravier- und Laserschweißzentrum, Bissingen/Teck

## Abstract

Die deutsche Gießereiindustrie leidet insbesondere in der Automobilindustrie seit Jahren unter hohem Kostendruck und sinkenden Renditen. Aufgrund dieser schwierigen Bedingungen ist es für die Gießereien von elementarer Notwendigkeit, Ausschusskosten zu reduzieren. Das aus der Industrie nicht mehr wegzudenkende, in der Gusswelt aber kaum bekannte Laserschweißverfahren kann hier deutliche Einsparpotentiale generieren. Gussfehler, die erst nach der mechanischen Bearbeitung entdeckt werden, können mithilfe des handgeführten Lasers aufgeschweißt und nachgearbeitet werden. Eine erneute mechanische Bearbeitung entfällt. Damit werden die ursprünglich als Ausschuss deklarierten Gussteile wieder als serienbaufertige Gutteile in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Vor allem an fertig bearbeiteten Gussteilen birgt das Verfahren, das bei der Reichle GmbH Gravier- und Laserschweißzentrum vor sieben Jahren entwickelt und getestet wurde, den großen Vorteil, dass ein bestehendes Schweißverbot aufgrund von geringster Wärmeeinbringung bei der Reparatur der Gussteilen umgangen werden kann – und das ohne optische und technische Einbußen.

The german foundry industry has been suffering from high cost pressures and falling yields for years, particularly in the automotive industry. Due to these difficult conditions, the reduction of reject costs is essential for the foundries. The process of laser welding, which is known in industry but not yet in the casting world, can generate significant potential for savings. Cast defects, which are only discovered after mechanical processing, can be welded and reworked using the hand-held laser. No further mechanical processing is required. In this way, the castings declared as reject can be returned to the economic cycle as serial-produced parts. The process, which was developed and tested seven years ago at the Reichle GmbH Gravier- und Laserschweißzentrum, has the great advantage that an existing welding prohibition can be bypassed due to the slightest heat input during the repair of the castings - without optical or technical degradation.

## Gliederung

1. Ausgangssituation der deutschen Gießereiindustrie
2. Vorstellung der Technologie Laserschweißen an einem Gussteil
  - 2.1. Einsatzbereich
  - 2.2. Technologie Laserschweißen
  - 2.3. Legierungen
  - 2.4. Bauteilspektrum und Branchen
3. Nacharbeitsprozess: Verzicht auf erneute mechanische Bearbeitung
4. Chancen und Risiken des Laserschweißens als Nacharbeitsprozess
5. Beispielhafte Darstellung des Einsparpotentials

### **1. Ausgangssituation der deutschen Gießereiindustrie**

Die deutsche Gießereiindustrie steht insgesamt unter schwierigen, volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Bedingungen und erholt sich langsam wieder auf das Niveau vor der Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/2009.

Während Gießereien im Anlagen- und Maschinenbau bzw. für baunahe Bereiche unter großen Überkapazitäten leiden, so herrscht insbesondere im Bereich der Automobilindustrie erheblicher Kostendruck, welcher sich mit einer sinkenden Rendite innerhalb ganz Europas bemerkbar macht. Zudem reduzierte sich die Anzahl an Gießereiunternehmen in den vergangenen Jahren deutlich – nicht zuletzt aufgrund von zahlreichen Insolvenzen und Unternehmensübernahmen. Zahlreiche Unternehmen dieser Branche halten dem Kostendruck nicht mehr stand und kommen um eine Insolvenz nicht umher.

Aufgrund dieser sehr schwierigen volks- und betriebswirtschaftlicher Bedingungen innerhalb der deutschen Gießereibranche ist es für ein erfolgreiches Wirtschaften elementar, die Kosten im Griff zu haben und Einsparpotentiale auszunutzen. Hier spielen auch die im Vergleich zu anderen Branchen erheblichen Ausschusskosten eine bedeutende Rolle; insbesondere auch dann, wenn kundenseitige Folgekosten Gießereien belastet werden aufgrund von Gussfehlern, die erst in nachfolgenden Wertschöpfungsstufen bei Abnehmern entdeckt werden. [1]

## 2. Vorstellung der Technologie Laserschweißen an einem Gussteil

### 2.1 Einsatzbereich

Das Laserschweißverfahren ist aus der heutigen Industrie nicht mehr wegzudenken. Während im Fahrzeugrohbau vollautomatisierte Laserschweißanlagen mit einem Leistungsbereich i.H.v. mehreren Kilowatt zum Einsatz kommen, werden insbesondere im Reparaturbereich von Werkzeugen, Formen und Gussteilen handgeführte (Mensch führt den Laserstrahl) Laserschweißanlagen im Leistungsbereich von 200-500 Watt eingesetzt.

Für die nähere Betrachtung wird im Folgenden ausschließlich der Einsatzbereich Guss verwendet.

Viele Gussfehler, die zur wirtschaftlichen Vernichtung eines Bauteils führen, werden erst nach der mechanischen Bearbeitung entdeckt. So handelt es sich insbesondere um Poren, Lunker, Rissigkeiten, Undichtigkeiten oder allgemeine Ungänzen, welche nicht der abnehmenseitigen Spezifikation entsprechen. Gerade in diesem Bereich kommen handgeführte Laserschweißanlagen zum Einsatz, um Fehlstellen auf einer Bearbeitungsfläche aufzufüllen und entsprechend nacharbeitsfähig zu machen. Damit können ursprünglich als Ausschuss deklarierte oder vom Abnehmer zurückgesandte Ausschussteile wirtschaftlich gerettet und wieder als Gutteil umgewandelt werden. Dabei sind bei einer fachmännischen Laserschweißung an fertig bearbeiteten Gussteilen weder optische noch technische Mängel nachweisbar. Selbstverständlich kann das Verfahren auch an Rohteilen zum Einsatz kommen und damit herkömmliche Schweißverfahren, welche oftmals ein Aufheizen des Gussteils benötigen, ersetzen.

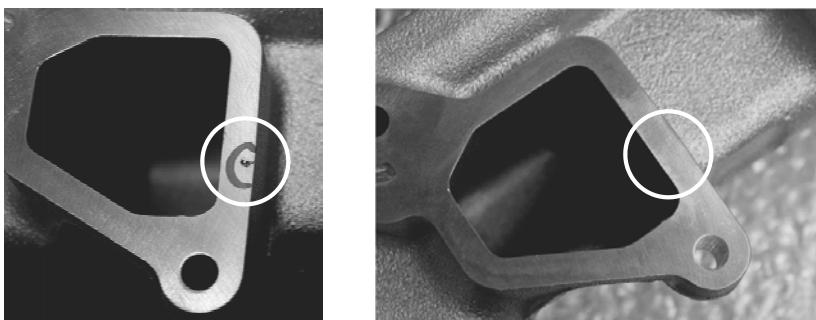


Bild 1: Typisches Bild einer Fehlstelle am fertig bearbeiteten Aluminium-Gussteil inkl.  
mit Laserschweißtechnologie reparierter Fehlstelle am gleichen Bauteil

## 2.2. Technologie Laserschweißen

Handgeführte Laserschweißanlagen sind in der Regel gepulste Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm. Die Pulsdauer variiert dabei zwischen 0,5 und 20 ms. Moderne Laserschweißanlagen weißen eine Leistungsenergie zwischen 200-500 Watt auf, die je nach Anwendungsfall, wirtschaftlich und technisch ausgewählt werden müssen.



Bild 2: Reparatur eines Presswerkzeugs mit einer handgeführten 500-Watt-Laserschweißanlage

Durch die Pulstechnik wird ein Laserstrahl mit variierendem Fokussdurchmesser auf das Gussteil abgeschossen, schmilzt sowohl das Grundgefüge als auch den von Hand zugeführten Schweißzusatzwerkstoff unter bis zu 2.500 °C auf. Im nächsten Schritt wird der Laserstrahl bei weitestgehend gleicher Pulsdauer abgeschalten, sodass die Schmelze sofort erstarrt. Dieser Prozess wiederholt sich unbegrenzt, bis eine Fehlstelle komplett aufgefüllt wurde. Durch die sehr kleine Pulsdauer und damit in Verbindung stehende geringe Wärmeeinbringung in das Bauteil, können selbst fertig bearbeitete Gussteile in Passungen, auf Dichtflächen, o.ä. repariert werden, ohne dass sich mechanische Kennwerte des Bauteils ändern oder die Gefahr eines Wärmeverzugs entsteht. Die Wärmeeinflusszone liegt je nach Anwendungsfall, Parametereinstellung und Legierung zwischen wenigen Hundertstel und zwei Zehntel Millimeter.

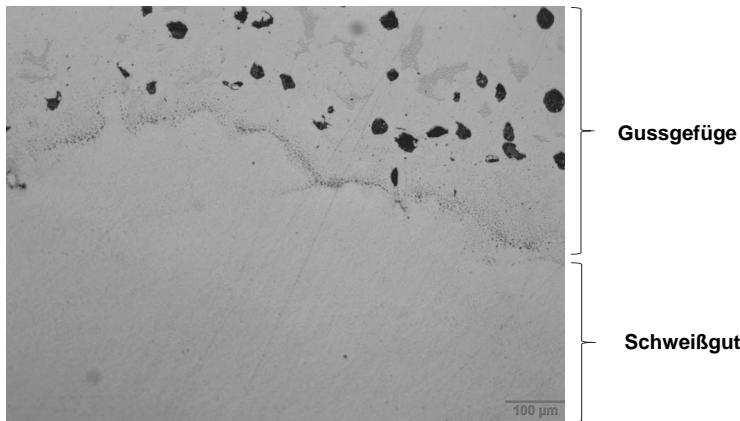


Bild 3: Schliffbild einer lasergeschweißten Fehlstelle im Eisenguss;  
Wärmeeinflusszone ca. 0,06 mm

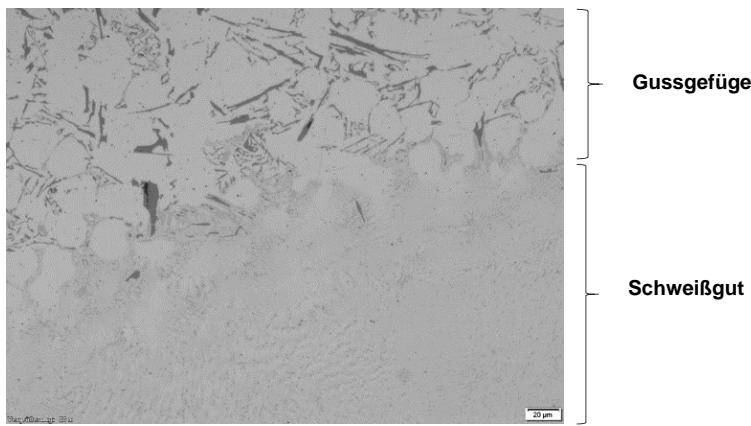


Bild 4: Schliffbild einer lasergeschweißten Fehlstelle im Aluminiumguss;  
Wärmeeinflusszone ca. 0,04 mm

## 2.3 Legierungen

Mittels Laserschweißverfahren können nahezu alle Materialien und Legierungen geschweißt werden. Das heißt insbesondere Aluminium, Magnesium, GJV, GJS und GJL jedoch auch zahlreich weitere Legierungen. Selbst Legierungen mit sehr hohem Kohlenstoffgehalt kön-

nen entgegen herkömmlicher Schweißverfahren fachmännisch ohne technische Einbußen geschweißt werden. Dabei ist kein Aufheizen des Bauteils notwendig.

## 2.4 Bauteilspektrum und Branchen

Das Laserschweißverfahren ist seit vielen Jahren in den Branchen Automotive, Luft- und Raumfahrt, Medizin- und Pharmatechnik, Bau, Maschinen- und Anlagenbau sowie im Marinabereich etabliert. Dabei werden nicht nur Themen wie Kostenreduzierung sondern auch insbesondere die Aspekte Lieferversorgung und frei werdende Kapazitäten zurate gezogen. Beispielhaft anhand der Automotiveindustrie können nachfolgende Bauteile mittels Laserschweißtechnik repariert werden: Zylinderkurbelgehäuse, Zylinderköpfe, Zylinderkopfhäuben, Getriebe-, Kupplungs- und Pumpengehäuse, Ladeluftkrümmer, Abgas führende Bauteile, Turboladergehäuse, Vorderachsauflnahmen, Strukturauteile, u.v.m.

## 3. Nacharbeitsprozess: Verzicht auf erneute mechanische Bearbeitung

Durch das Laserschweißverfahren wird in dem Bereich, wo mittels Schweißzusatzwerkstoff eine Fehlstelle auf einer Bearbeitungsfläche repariert wird, die Ursprungsgeometrie verändert. D.h. beim Laserschweißen entsteht ein Materialüberstand in Relation zur Bearbeitungsfläche in Höhe von mehreren Zehntel Millimetern. Damit das Gussteil wieder serieneinbaufertig als Gutteil verwendet werden kann, muss dieser Materialüberstand nachgearbeitet werden.

Um eine erneute mechanische Bearbeitung, welche oftmals den kostenintensivsten Anteil am Gesamtwert eines Gussteils ausmacht, zu umgehen, wird die Nacharbeit per manueller Handarbeit unter Nutzung unterschiedlicher Techniken durchgeführt. Dabei gilt immer zu berücksichtigen, dass Zeichnungs- und Oberflächenvorgaben in Bezug auf Maß, Oberflächengüte, etc. eingehalten werden. Filigrane Fähigkeiten der Fachkräfte sowie ein hohes Maß an Qualitätsbewusstsein sind entscheidende Voraussetzungen für die qualitativ hochwertige Instandsetzung von fertig bearbeiteten Gussteilen.



Bild 5: Manuelle Nacharbeit einer lasergeschweißten Fehlstelle an einem LKW-Zylinderkurbelgehäuse

#### 4. Chancen und Risiken des Laserschweißens als Nacharbeitsprozesses

Das Laserschweißverfahren gilt als am höchst entwickelten Schweißverfahren, mit dem zahlreiche Einsatzgebiete überhaupt erst möglich werden. Obwohl das Verfahren seit über 20 Jahren in der Industrie zum Einsatz kommt, genießt es nur einen sehr geringen Bekanntheitsgrad innerhalb der Gießereibranche und wird auch wissenschaftlich nur sehr rudimentär beleuchtet. Aufgrund dessen ist nahezu kaum Literatur zu diesem Verfahren erhältlich, was eine eigene Ausbildung und Entwicklung unabdingbar macht.

Im Folgenden werden stichpunktartig Vor- und Nachteile des Verfahrens aufgezeigt.

##### Chancen:

- Starke Reduzierung von Ausschusskosten über alle Wertschöpfungsstufen (Rohguss, mechanische Bearbeitung, Tier 1, OEM) hinweg möglich
- Steigerung der Nachhaltigkeit und der Ressourceneffizienz, indem bestehende Wertschöpfung nicht vernichtet bzw. wieder eingeschmolzen wird
- Aufrechterhaltung der Lieferfähigkeit durch deutlich geringere Ausschussquoten
- Keine Sonder- oder Zusatzschichten zur Ausschussnachproduktion notwendig

- Steigende Qualität von Nacharbeitsprozessen, indem bestehende Verfahren wie Kitten durch ein gefügeverbindendes Nacharbeitsverfahren ersetzt wird
- Steigende Kundenzufriedenheit durch geringere Ausschussquoten
- Keine Wertschöpfungsvernichtung
- Frei werdende Maschinenkapazitäten
- Mittelfristige Reduzierung der Lagerbestände
- U.v.m.

#### Risiken:

- Auch das Laserschweißverfahren unterliegt oftmals einem vorgegebenem Schweißverbot seitens des Endkunden, d.h. eine kundenseitige Freigabe sollte eingeholt werden
- Bei nicht fachmännischer Schweißung besteht die Gefahr vor schlechten Gefügeverbindungen
- Kleinere Poren oder Lagefehler innerhalb des Schweißguts können bei falscher Handhabung zu Undichtigkeiten oder nicht der Spezifikation entsprechenden Oberflächengüten führen
- Bei großflächigen Schweißungen auf Freiformflächen oder Passungen ist eine manuelle Nacharbeit von Hand schwierig

## **5. Beispielhafte Darstellung des Einsparpotentials**

Das Einsparpotential, welches durch die Instandsetzung von fertig bearbeiteten Gussteilen, generiert werden kann, muss grundsätzlich jedes Unternehmen für sich bewerten, jedoch sollen die beiden nachfolgenden Beispielrechnungen verdeutlichen, welche Möglichkeiten bestehen können.

Die unten aufgezeigten Beispiele stellen aus Kundenschutz vereinfachte und verfälschte aber weitestgehend realitätsnahe Kostensituationen dar.

**Beispiel 1:**

Bauteil: LKW-6-Zylinderkurbelgehäuse aus Eisenguss  
 Zustand: Fertig bearbeitet  
 Ausgangsbasis: 2 Fehlstelle (Größe je ca. 10x8x4 mm) auf einer mechanischen Bearbeitungsfläche (Top Deck) in Angrenzung an ein Wasserloch  
 Reparatur: Bauteil reinigen, Fehlstelle ausarbeiten, Schweißnahtvorbereitung durchführen, Fehlstelle mittels Lasertechnik auffüllen, manuelle Nacharbeit der Fehlstelle, Oberflächengüte wiederherstellen, Bauteil reinigen und verpacken

Der Gesamtbauteilwert liegt bei ca. 3.200 EUR. Für die Reparatur der oben beschriebenen Fehlstellen muss mit Kosten i.H.v. ca. 80 EUR pro Stück gerechnet werden. Bei angenommenen Transport- und Logistikkosten i.H.v. 30 EUR pro Stück bleibt eine Einsparung von > 3.000 EUR pro Stück. Erfahrungsgemäß fallen jährlich ca. 7.000 Stück als Ausschussteile an, die mittels Laserschweißtechnik repariert werden können. Die Bauteile wurden ursprünglich als Ausschussteile verschrottet. Dies verursachte Ausschusskosten i.H.v. ca. 20 Mio. EUR (Schrotterlös bereits abgezogen). Von den 20 Mio. EUR können rund 19 Mio. EUR reduziert werden, indem das Laserschweißverfahren eingesetzt und die reparierten Bauteile in der Serie verwendet werden können.

**Beispiel 2:**

Bauteil: PKW-6-Zylinderkopfhaube aus Aluminium  
 Zustand: Fertig bearbeitet  
 Ausgangsbasis: 2 Fehlstellen (Größe je ca. 3x2x2 mm) auf einer mechanischen Bearbeitungsfläche  
 Reparatur: Bauteil reinigen, Fehlstelle ausarbeiten, Schweißnahtvorbereitung durchführen, Fehlstelle mittels Lasertechnik auffüllen, manuelle Nacharbeit der Fehlstelle, Oberflächengüte wiederherstellen, Bauteil reinigen und verpacken

Der Gesamtbauteilwert liegt bei ca. 18 EUR pro Stück. Die mit Laserschweißtechnik reparaturfähige Ausschussquote liegt bei einer Gesamtproduktionsmenge von rund 500.000 Stk. pro Jahr bei 3%. Für die Reparatur der oben beschriebenen Fehlstellen muss mit Kosten i.H.v. ca. 8 EUR pro Stück gerechnet werden. Bei angenommenen Transport- und Logistikkosten i.H.v. 1 EUR pro Stück bleibt eine Einsparung von ca. 9 EUR pro Stück. Die Bauteile

wurden ursprünglich als Ausschussteile verschrottet. Dies verursachte Ausschusskosten i.H.v. ca. 230.000 EUR (Schrotterlös bereits abgezogen). Die Ausschusskosten von 230.000 EUR können um rund 105.000 EUR pro Jahr reduziert werden, indem das Laserschweißverfahren eingesetzt und die reparierten Bauteile in der Serie verwendet werden können. Die Ausschusskosten ergeben sich aus den Herstellkosten für das Rohteil, die mechanische Bearbeitung, Transportkosten und ggf. erweiterte Veredelung.

### Literaturangaben

- [1] IKB Deutsche Industriebank AG: Gießereiindustrie 2020: Trends und Herausforderungen. Düsseldorf, 23.04.2015, [http://www.foundry-planet.com/fileadmin/redakteur/pdf-dateien/Giessereiindustrie\\_2020.pdf](http://www.foundry-planet.com/fileadmin/redakteur/pdf-dateien/Giessereiindustrie_2020.pdf).

# Qualitätsmanagement für eine globale Motorenfertigung

## Quality Management for global component manufacturing

**Dr. Niels W. Rasmussen,**  
MAN Diesel & Turbo, Kopenhagen, Dänemark

### Kurzfassung

Mit einer über 100 Jahre hinausgehenden führenden Rolle in der Konstruktion und Fertigung von großen Zweitakt Dieselmotoren hat sich MAN Diesel & Turbo (MDT) in Kopenhagen vollständig in einen Anbieter eines Lizenz- und Servicegeschäfts gewandelt. Dieser Beitrag beschreibt Aspekte des Qualitätsmanagements und –Kontrolle von Schlüsselkomponenten des Motors vor und während der Herstellung der Motoren. Das Qualitätsmanagementsystem hat einen besonderen Fokus auf die Komponenten, die einen besonderen Einfluss auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Motors im Betrieb haben und/oder besondere Erfahrung bei der Fertigung erfordern.

Zu diesen Komponenten gehören die grundsätzlich gegossenen Zylinderrahmen, die Zylinderliner, die Hauptlagerschalen und die Kolbenringe.

### 1. Einführung

Die Zweitaktmotoren, die derzeit unter dem Namen MAN B&W gebaut und vertrieben werden, rangieren von 30 bis 98 cm Bohrung und von 3200 bis 82.440 kW. 2-Zylinder Marinemotoren werden in großen Schiffen eingebaut, wobei der vorherrschende Betriebsstoff Schweröl ist. Dieser wird in neuerer Zeit allerdings zunehmend von verschiedenen Gasqualitäten abgelöst.

Sicherheit, Zuverlässigkeit, Effizienz und Umweltverträglichkeit sind die treibenden Kräfte bei der Entwicklung und Konstruktion von Marinemotoren.

Die Besonderheit von MAN B&W Zweitaktmotoren besteht darin, dass die Fertigung über ein Netzwerk von lizenzierten Unternehmen in der ganzen Welt abgewickelt wird. Dieses Modell der lizenzierten Produktion hat sich über mehr als eine Dekade entwickelt und ist heute der Produktionsstandard bei MAN B&W.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die praktische Rolle des Qualitätsmanagements in dieser Umgebung, in der MAN B&W's Verantwortung für Auslegung und Konstruktion mit dem Knowhow der von MAN B&W unabhängigen externen Zulieferern Hand in Hand geht.

## **2. Der besondere Ansatz für das Qualitätsmanagement**

Das Qualitätsmanagement konzentriert sich insbesondere auf die Schlüsselkomponenten, die entweder im Hinblick auf Sicherheit und Zuverlässigkeit kritisch sind, durch komplexe Herausforderungen bei der Fertigung auffällig sind oder bei denen die geforderte Qualität in der Produktion schwer zu verifizieren ist.

Für diese Gruppe von Komponenten – genannt „controlled components – ergänzen spezifische Kontrolldokumentationen die in Zeichnungen und anderen generellen Dokumenten vorgegebenen Spezifikationen. Darüber hinaus ist für diese „controlled components“ eine Erstabnahme grundsätzlich vorgesehen. Das Ziel ist, dem Motorenbauer eine Reihe Gießereien zu qualifizieren, die durchaus an verschiedene Motorenbauer liefern können. Der Effekt ist eine vergrößerte Flexibilität sowohl für die Motorenbauer als auch für die Gießereien.

Die „controlled components“ werden in vier Kategorien aufgeteilt, die jeweils für bestimmte Erstabnahmeverfahren stehen, was eine Anpassung spezifischer Testverfahren, Protokolle und Dokumente für die individuelle Komponente erlaubt. Mit der Auswahl der relevanten Niveaus wird auch der Grad der delegierten Verantwortung für den Zulassungsprozess gegenüber dem Motorenbauer definiert.

Im ersten Level wird der Test komplett bei MDT durchgeführt, im zweiten Level werden Testergebnisse von MDT geprüft, während für den dritten Level der Motorenbauer für die gesamte Zulassung zuständig ist.

Das Verfahren zur Erstzulassung zielt darauf ab, zunächst die Qualifikationen und Ressourcen von möglichen Zulieferern für die Fertigung der gegebenen Komponente zu prüfen. Dagegen werden für das Qualitätsmanagement der täglichen Produktionen weitere Regeln und Vorgaben spezifiziert und mit dem Zulieferer abgestimmt.

Dieses gesamte Zulassungs- und Prüfsystem wird durch ein Team von Spezialisten gemanagt, die die Zulieferer unterstützen und erfolgreich durch die jeweiligen Zulassungsverfahren führen. Nach der Zulassung übernimmt das Team die weitere technisch Unterstützung und den follow-up während der Produktion.

### 3. Beispiele für Gusskomponenten

Die wesentlichen Elemente der Motorstruktur werden durch Gussteile dargestellt – genauso wie bei anderen, kleineren Verbrennungsmotoren. Durch die wesentlich größeren Dimensionen gibt es allerdings praktische Unterschiede. Was bei kleineren Motoren das Zylinderkurbelgehäuse ist, wird bei einem Großmotor durch die zu montierenden Komponenten Zylindergehäuse, Gehäuserahmen und Bedplate gebildet. Zylindergehäuse sind grundsätzlich Eisengussteile, während der Rest im Allgemeinen durch Schweißkonstruktionen dargestellt wird. Bei den größeren Motorentypen werden die Zylindergehäuse unter Umständen noch durch zwei getrennte Gussteile dargestellt (Bild 1 und Bild 2).

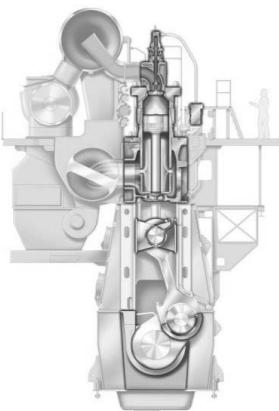


Bild 1: Gusskomponenten in einem MAN B&W Zweitaktmotor.



Bild 2: Zylindergehäuse in Gusseisen

Die Gusskomponenten werden je nach Beanspruchung aus den verschiedenen Gusseisenarten, also Grauguss, Gusseisen mit Kugelgraphit oder CGI, manchmal auch aus Stahlguss hergestellt.

Die Qualitätsspezifikationen für Gusskomponenten beziehen sich immer auf die im Gussteil erreichten mechanischen Kennwerte, ausdrücklich nicht auf getrennt gegossene Proben. In diesem Zusammenhang spielt die Gießprozesssimulation eine große Rolle: Sie ist das Standardwerkzeug zur Ermittlung und Dokumentation der zu erwartenden lokalen Eigenschaften der Gusskomponenten.

Die Simulationsergebnisse (z.B. Bild 3) haben sich als sehr effektive Kommunikationsgrundlage zwischen Motorenbauer, Gießerei und MDT etabliert. Das bezieht sich sowohl auf

die Kommunikation im Zusammenhang mit den Erstzulassungen als auch für das laufende Qualitätsmanagement während der Produktion. Beispielsweise werden für die Erstzulassung Proben aus den Gussteilbereichen geprüft, die in der Simulation die niedrigsten zu erwartenden Zugfestigkeiten erwarten lassen.

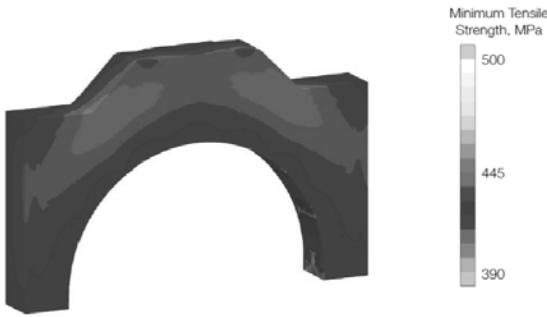


Bild 3: Zu erwartende berechnete Zugfestigkeiten in einer Lagerschale aus ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit

Ein weiterer Bereich der verbindlichen Nutzung von Gießprozeßsimulation ist Bestimmung der Grenzen für noch zugelassene Ungänzen im Guss: um die Vergeudung von Zeit, Kosten und Ressourcen zu vermeiden, müssen die zu erwartenden Fehler im Guss auf ihre mögliche kritische Wirkung in Bezug auf ein korrektes und sicheres Verhalten im Betrieb bewertet und begrenzt werden. Üblicherweise werden diese Begrenzungen auf empirischer Basis festgelegt.

Insbesondere einer diversen Gruppe von Zulieferern für Gusskomponenten – die z.B. bestimmte geforderte Zugfestigkeiten auf verschiedenen metallurgischen Wegen erreichen wollen – können die geforderten Spezifikationen auf diese Weise bestmöglich vermittelt werden.

#### 4. Unterstützung der Produktion

Da der genaue Herstellungsprozess in der Entscheidung der Gießerei liegt, ist die Rolle des „MDT Production Support“, die Kompetenzen und Ressourcen im Rahmen der Erstzulassung zu prüfen und Hilfestellung bei kritischen Herausforderungen der täglichen Produktion zu leisten.

Für Situationen mit bekannten Herausforderungen bei der Produktion gibt „MDT Production Support“ Empfehlungen. Diese enthalten üblicherweise Hinweise auf Fertigungsschritte, Ma-

teriale, Metallurgie und andere Features, die erfahrungsgemäß geeignet sind eine reibunglose Fertigung in der notwendigen Qualität sicherzustellen.

Im Falle dickwandiger Eisengussteile ist das Verständnis hinsichtlich der Entstehung und Vorhersage lokaler Eigenschaften der Gusskomponenten immer noch recht limitiert. Insbesondere um den beschriebenen Erstzulassungsprozess noch sicherer zu machen, sind weitere Fortschritte im Verständnis des Zusammenspiels von relevanten Prozessparametern und erreichten lokalen Gussteileigenschaften erforderlich.

Bei MDT wurde über Jahre ein erheblicher Aufwand getrieben, um die Ergebnisse aus der Gießprozesssimulation mit an Gussteilen gemessenen mechanischen Eigenschaften zu korrelieren und zu verifizieren.

In letzter Zeit wurde bei MDT auch an der zuverlässigen rechnerischen Vorhersage von Eigenspannungen in dickwandigen Eisengusskomponenten, sowohl Grauguss als auch Guss-eisen mit Kugelgraphit, geforscht. Dieses Projekt zielte auf die Entwicklung einer geeigneten Messmethode und dem Abgleich mit Ergebnissen aus der numerischer Simulation [1].

## 5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden praktische Lösungen für das Qualitätsmanagement bei einer Lizenzfertigung von Motorenkomponenten in niedriger Stückzahl von mehreren Zulieferern gezeigt. Dabei werden die unterschiedlichen Vorgehensweisen für verschiedene Komponenten im Hinblick auf Zulassung und Qualifizierung von Zulieferern beleuchtet.

[1] Noppenau, L. Residual Stress Measurements in Large Grey and Ductile Iron Castings. Proceedings of 72<sup>nd</sup> World Foundry Congress, 2016, Nagoya, Japan.



## Foundry 4.0: Smart casting process control and real time quality prediction

**The digitalization of foundry plays a key role in competitiveness introducing new integrated platform to Control the process and predict in real-time the Quality and the cost of the casting**

**Nicola Gramegna, M. Eng, EnginSoft SpA, Padova, Italy**

### Abstract

The Industry 4.0 is the industrial revolution based on Cyber-Physical-Systems (CPS) in the context of Factory of Future. The digital innovation is not an exclusivity of new and advanced technology and production processes. The traditional production processes and plants are evolving following this digitalization combining the long experience and the new fast methods to improve the production efficiency, to accelerate the fine-tuning and real-time adjustment of the process parameters oriented to the zero defect quality.

Manufacturing current trends show an improvement in demand for light products considering the material substitution for complex structural parts, the design and technology innovation as well as the evolution in smart production. Due to the high number of process variables involved and to the non-synchronisation of all process parameters in a unique and integrated process control unit, High Pressure Die Casting (HPDC) is one of the most “defect-generating” and “energy-consumption” processes in EU industry showing less flexibility to any changes in products and in process evolution. In both, sustainability issue imposes that machines/systems are able to efficiently and ecologically support the production with higher quality, faster delivery times, and shorter times between successive generations of products.

The FP7- MUSIC project (funded in the frame of the Call FoF-ICT-2011.7.1 *Smart Factories: Energy-aware, agile manufacturing and Customization*) is giving a new age to the traditional multi-stages production processes such as High Pressure Die Casting (HPDC). The use of sensors, the totally integrated systems, as well as the data mining and cognitive model are the key ingredient of the MUSIC project to be a reference in the Industry 4.0 context.

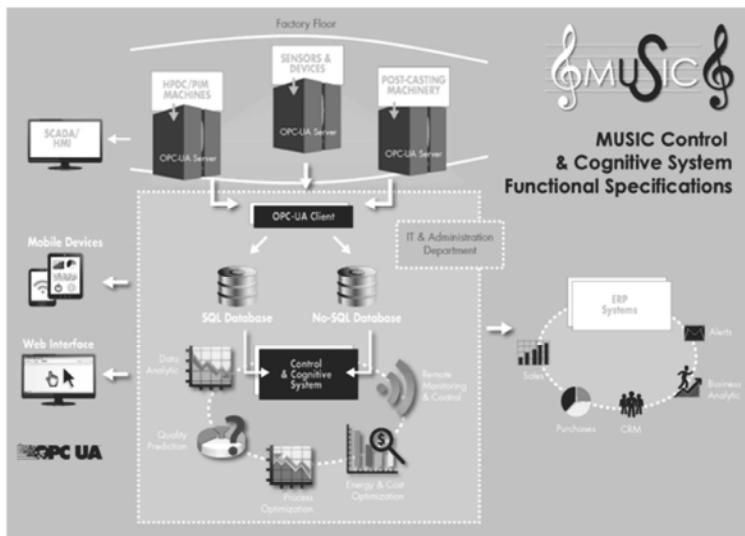
## Introduction

European Aluminium foundries are a group of about 2600 companies, which produced 3 million of tons of castings in 2011. Key players are Germany and Italy, with 60% of total production from Europe (0,931 and 0,844 Mio tons for Germany and Italy corresponding to a turnover of 5.092,00 and 4.051,00 Mio of euro) - source CAEF. The 50-60% of Al alloy castings are produced by HPDC process. High Pressure Die Casting (HPDC) of light alloys is one of the most representative large-scale production-line in manufacturing fields, which are strategic for the EU-industry largely dominated by SMEs.

The development and integration of a completely new ICT platform, based on innovative *Control and Cognitive system* linked to real time monitoring, allows an active control of quality, minimizing the presence of defects or over-cost by directly acting on the process machine variables optimisation or equipment boundary conditions. The Intelligent Manufacturing Approach (IMA) works at machine-mould level to optimise the production line starting from the management of manufacturing information. An Intelligent Sensor Network (ISN) monitors the real-time production acquiring the multi-layers data from different devices and an extended meta-model (the Cognitive model) correlates the input and sensors data with the quality indexes, energy consumption cost function. Data homogenization, centralization and synchronization are the key aspects of control system to collect information in a structured, modular and flexible database. Process simulation, data management and meta-model are key factors to generate an innovative Cognitive system to improve the manufacturing efficiency.

## The Intelligent Sensor Network to capture the process data

The *Control & Cognitive platform* (Fig. 1) predicts the quality, energy and cost of the injection process in real-time, covering the 100% of products, and suggests the appropriate re-actions to adjust the process set-up and/or mechanism. The client-server connection works in combination with the real time monitoring system (the Intelligent Sensor Network) to elaborate instantaneously the production data set with respect to quality/energy/cost prognosis.



**Fig. 1** – Introducing the *Control & Cognitive platform* with the client–server structure in the factory floor

The Database is collecting all process data, via OPC\_UA protocol, coming from all existing devices [2-3] and active sensors in the production line.

A fundamental innovative characteristic of *Control & Cognitive platform* is the predictive Quality model integrating multi-resolution and multi-variate process data.

The real-time visualization of elaborated data, including warning and safety messages and statistic production diagrams, can be customized for multiple users' interfaces as machine operator, production manager and plant director. The standardization Quality classification and investigation methods [4-5], as well as the traceability, are fundamental to train the Quality model guiding the minimization of relevant indexes affecting the scrap rate. The final *Control & Cognitive platform* has a smart web application to visualize, share and communicate the significant data and to support the decision making with proper reactions in real-time (retrofit) based on the captured signals from the process.

The multi-stages HPDC production line at RDS has been the place to implement the innovative intelligent sensor network (ISN) [5] and the Cognitive system [6] from the design to the validation. As test-product on which evaluate the new technology, a diecast Gear Box Housing has been individuated, as well as the priority list of defects/imperfections to be minimized/avoided: Lamination, Cold shots, Flash, Blister and Incomplete casting [3].

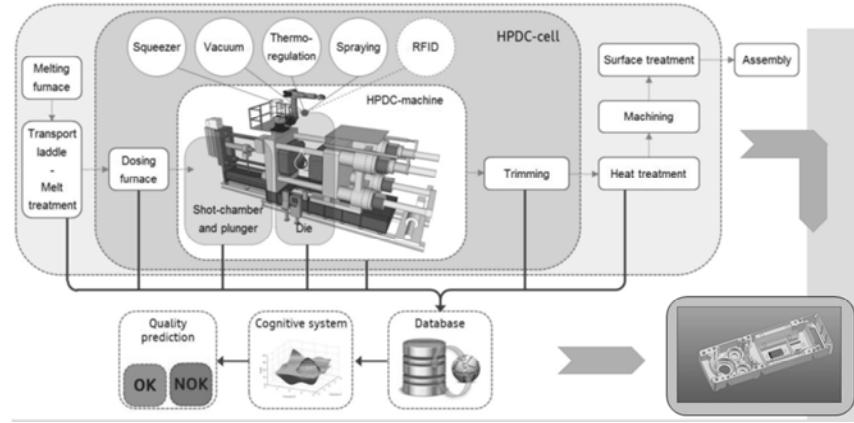


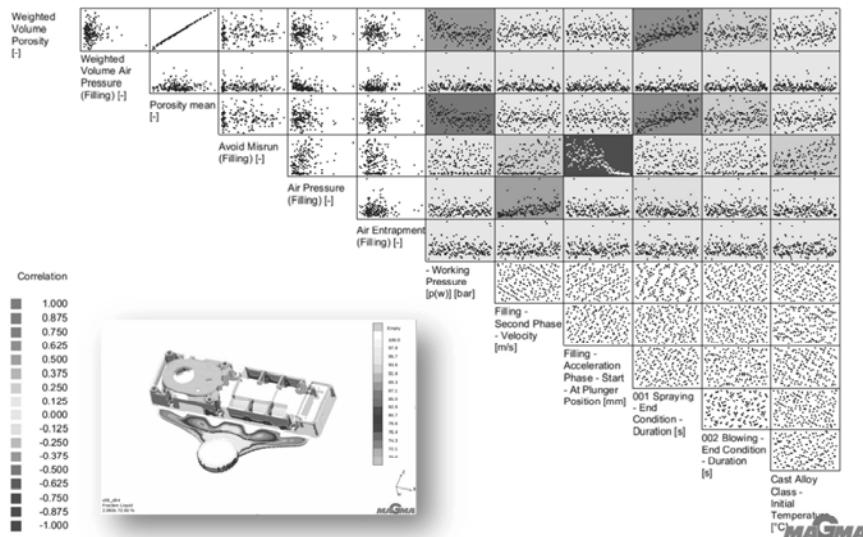
Fig. 2 - Correlation matrix based on 185 designs simulated by MAGMA5

### The training of the Quality predictive model

A new die has been designed and built (fitting the requirements of the Colosio HPDC machine, on which the production was scheduled), introducing various sensors [7] in positions sensitive to process parameters variations. The sensor acquisition system adopted allows connection with conventional HPDC machine, to monitor the injection curve as well as the achievement of data from sensors implemented in the die. The challenge is the positioning of proper and sufficient number of sensors where it's necessary to individuate the risk of defect generation. If the metal contact sensor or different sensor are invasive and complex to be applied, an external I.R. Thermo camera (the dual TTV system from MotulTech-Baraldi) can be applied to monitor the temperature evolution on the die surface before and after the lubrication phase, taking measurements from 10 different Region of Interest (ROI). The ROIs are often defined closed to the area of interest for quality prediction.

All process parameters possibly affecting the quality of Gear Box Housing have been taken into account, and used in the training stage of a meta-model, both virtual and real, correlating input process variables and data from sensors with quality indexes in the areas of interest.

Of course, the virtual design of experiment (DOE) adopted to train the virtual meta-model is at "low cost" in term of time and resources; it typically constitutes the first model to be applied in production.



**Fig. 2** - Correlation matrix based on 185 designs simulated by MAGMA5

The correlation matrix, based on 185 evaluated designs (Fig. 2), is one method to visualize the dependency of quality indexes from process parameters and virtual sensor measurements (e.g. temperature, pressure, velocity). As expected, defects such as misruns are strongly affected by the plunger position, when switching from first phase velocity to second fast velocity – the quantitative correlation is now available – but there are small opposite effect due to second phase velocity of the plunger and initial temperature of the alloy. Similar comments are possible for shrinkage porosities depending from overpressure and spray time, or blister correlated with second phase velocity. The model needs to be

trained with reference to a specific product and process, because the quantification of correlations are unique and not generalized.

Similar approach has been applied to train a model based on really produced and investigated castings. The same DOE has been performed, to validate the virtual meta-model generated by casting process simulator.

With this new approach, the sampling stages is used to train the model understanding the genesis of all possible defects. The traceability of the castings, during the training or during the production is a mandatory task.

### HPDC Process Optimization

The introduction of the *Control & Cognitive platform* in the factory floor needs a simple installation of LAN network connecting all devices of the production line.

The production starts normally, using the best process setup. The stability and repeatability of the best shot is monitored with real time comparison of reference curve previously selected and the instantaneous verification of thresholds satisfactions to quality prediction. The scraps or good castings are visualized in PC, Tablet (Fig. 3) or smart-phone with available web connection to the system. The example shown in Fig. 3 is the results of the optimization procedure applied during the production: the scraps were expected during the warm-up of the die and good quality achieved at thermal steady state; a 30 minutes break generated some scraps at re-start (e.g. casting number 157) and good production after 5 castings (e.g. casting number 162) has been recovered.

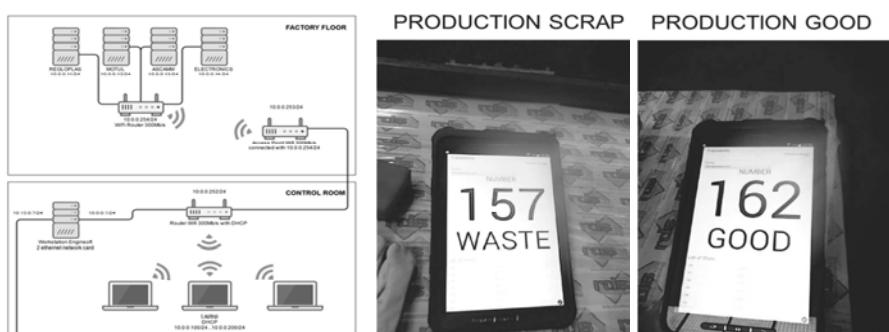


Fig. 3 – LAN network connection and real time prediction of Waste and Good castings

## The expected impacts

The MUSIC project introduces new ICT technologies at manufacturing plant with significant potential impacts: (i) strengthened global position of EU manufacturing industry; (ii) larger EU market for advanced technologies such as electronic devices, control systems, new assistive automation and robots; (iii) intelligent management of manufacturing information for customization and environmental friendliness.

Expected benefits are:

- 40% reduction in scrap rate for the involved HPDC foundry,
- -3% in no-quality costs for the involved automotive company,
- up to 40% decrease in the cost of quality control, to be applied only to specifically individuated products,
- 5-10% reduction in energy consumption, due to scrap reduction and increased production efficiency,
- better knowledge and control of the process, resulting in time to market reduction and minimization of trial & error approaches.

## Conclusions and future developments

The application of *Control and Cognitive system* has been demonstrated and validated at foundry. In the frame of HPDC production process, Operator and Process manager take advantage by adopting a centralized remote control system supporting process monitoring and quality prediction in real time. The decision is supported by cause-effect correlations, and proper reactions suggested by a continuously updated meta-model. Re-usability and flexibility of the *Control & Cognitive platform* also allow agile re-start in case of small batches production.

The “zero defect” target is always the first priority of the approach, to minimize the defects with real-time retrofit suggested by the tool. The scrap rate reduction is focused on those defect factors mainly contributing the overall quality requirements of the product. Being the energy consumption connected to the production rate, the cycle time optimization (more pieces per hour) and the improved management of energy-demanding devices (furnace, thermo units, etc) lead to cost reduction [8-12].

The extension of application to further multi-stages and multi-disciplinary production lines (e.g. sheet metal forming, forging, rolling, thermoforming, machining, welding, trimming, or the innovative additive manufacturing) is planned to exploit the same methodology in different industrial contexts.

## Acknowledgments

This work was developed inside **MUSIC** Project (**M**ulti-layers control & cognitive **S**ystem to drive metal and plastic production line for **I**njected **C**omponents), supported by European Union (FP7-2012-NMP-ICT-FoF, grant agreement n° 314145). The authors thank all Partners of MUSIC consortium ([www.music.eucoord.com](http://www.music.eucoord.com)).

1. F. BONOLLO, N. GRAMEGNA, G. TIMELLI: Journal of Metals, 67 (5) (2015), p 901.
2. F. BONOLLO, N. GRAMEGNA: The MUSIC guide to key-parameters in High Pressure Die casting, Assomet, Milano (2014).
3. E. GARIBOLDI, F. BONOLLO, P. PARONA: Handbook of defects in HPDC. AIM, Milano (2010).
4. CEN T/R 16749: Aluminium and aluminium alloys — Classification of Defects and Imperfections in High Pressure, Low Pressure and Gravity Die Cast Products, CEN, Brussels (2014).
5. U. GAUERMANN, A. MAZZAMUTO, N. GRAMEGNA: Proc. 6th Int. Cong. High Tech Die Casting, Venice (2016), AIM, Milan, paper n. 69.
6. N. GRAMEGNA, F. BONOLLO: Proc. 6th Int. Cong. High Tech Die Casting, Venice (2016), AIM, Milan, paper n. 68.
7. E. BATTAGLIA, F. BONOLLO, A. BROTTO, G. KRAL, A. MAZZAMUTO: Proc. 6th Int. Cong. High Tech Die Casting, Venice (2016), AIM, Milan, paper n. 66.
8. F. BONOLLO, N.GRAMEGNA : The MUSIC guide to the key-parameters in High Pressure Die Casting – Assomet servizi srl, Enginsoft SpA, ISBN 978-8887786-10-1, 2014
9. F. BONOLLO, N.GRAMEGNA : Smart Control and Cognitive System applied to the HPDC Foundry 4.0 – Assomet servizi srl, Enginsoft SpA, ISBN 978-8887786-11-8, 2016
10. F. BONOLLO, N.GRAMEGNA : HPDC Foundry Competitiveness based on smart control and cognitive system in Al-Alloy products – HTDC 22-23 June 2016, Venice (Italy)
11. C. RAONE, N. GRAMEGNA, F. ZULIANI: Intelligent management of lubrication phase in High pressure die casting – HTDC 22-23 June 2016, Venice (Italy)
12. B. KUJAT, N. GRAMEGNA, M. BENVENUTI: Innovative control and real-time quality prediction for the casting production of aluminium alloy structural components at AUDI AG – HTDC 22-23 June 2016, Venice (Italy)