

Bildquelle: Volkswagen AG

11. VDI-Tagung

Gießtechnik im Motorenbau 2021

Vielfalt der Antriebskonzepte und Chancen für die Gießereiindustrie

27. und 28. Oktober 2021, Magdeburg

VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

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

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

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

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

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuscriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092386-4

Inhalt

► Prozess – Gießverfahren

Weiterentwicklung von Elektromotoren-Gehäusen für Pkw-Antriebe	1
P. Bernsteiner, Nemak Europe GmbH, Linz, Österreich;	
R. Fernández Gutiérrez, Nemak Linz GmbH, Linz, Österreich;	
F. J. Feikus, Nemak Europe GmbH, Frankfurt;	
M. Łuszczak, Nemak Poland Sp. Z.o.o., Bielsko-Biała, Polen	
Zerstörungsfreie Gussstückprüfung (ZfP) mit Hilfe der Computertomografie	13
A. Harborth, Volume Graphics GmbH, Heidelberg	

► Prozess – Kerne

Evolution des Hot-Box-Verfahrens durch elektrisches Aushärten anorganisch gebundener Sandkerne – Potenziale für den Leichtmetall- und Eisenguss.	27
E. Riedel, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg;	
W. Bach, Soplain GmbH, Sülzetal	
Wasserstoff als Kraftstoff	35
H. Rottengruber, D. Wintergoller, IMS-OVGU, Magdeburg	

► Motorkomponenten

- Neues Thermomanagement – Herausforderung an die Gussteilgestaltung phasenwechselgekühlter Verbrennungsmotoren** 51
M. Krause, T. Arnold, U. Hofmann, J. Böhme, IAV GmbH, Stollberg
- Die Verbrennungskraftmaschine im elektrifizierten Antriebsstrang – Modularer Ansatz auf einheitlicher Plattform im Spannungsfeld zwischen Kosten und CO₂-Optimierung.** 73
W. Schöffmann, M. Howlett, P. Kapus, G. Teuschl, C. Sams, I. Barna, AVL List GmbH, Graz, Österreich
- Modulares Zylinderkopfkonzept für schnelllaufende Diesel- und Gas-Großmotoren mit Spitzendruckanforderung bis 330 bar** 101
K. Schmidleitner, G. J. Estebanez, AVL-List GmbH, Graz , Österreich;
S. W. Geib, Gienanth GmbH, Eisenberg (Pfalz)

► Hochleistungsmotoren

- Die Zylinderköpfe des neuen Boxer-Saugmotors von Porsche im Dünnwandguss** 115
G. Vogelezang, C. Pleuß, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach;
M. Rafetzeder, Nemak Europe GmbH, Frankfurt;
B. Stauder, H. Kirchmeir, Nemak Linz GmbH, Linz , Österreich



**BEST
MATCH**
for
**BEST
TALENTS**

INGENIEUR.de

B E S T  M A T C H

powered by 

So findet Sie Ihr Traumjob!

Ingenieure aller Fachrichtungen, Absolventen und wechselwillige Professionals aufgepasst:

Sagen Sie uns, was Sie können, wollen und lieben – dann bieten Ihnen die besten Unternehmen den passenden Job für Ihr Talent. Schnell, unkompliziert, ohne Aufwand.

DAS SIND IHRE VORTEILE:

Einfache Profilerstellung | Persönliche Beratung | Passgenaue Job-Angebote |

Keine aufwändige Job-Suche | Unternehmen bewerben sich bei Ihnen | Kostenfreie Nutzung |

Transparenz: alle wichtigen Informationen zum Traumjob |

Sicher: Ihr Arbeitgeber hat keine Einsicht in Ihr Profil

**JETZT ALS TALENT REGISTRIEREN:
BESTMATCH.INGENIEUR.DE**

Weiterentwicklung von Elektromotoren-Gehäusen für Pkw-Antriebe

Ing. **Paul Bernsteiner**, Nemak Europe GmbH, Linz, Österreich;
Dr. **Ricardo Fernández Gutiérrez**, Nemak Linz GmbH, Linz, Österreich;
Prof. Dr.-Ing. **Franz Josef Feikus**, Nemak Europe GmbH, Frankfurt;
Dr. **Michał Łuszczak**, Nemak Poland Sp. Z.o.o., Bielsko-Biała, Polen

Kurzfassung

Die in der derzeitigen Generation von batterie-elektrischen oder Hybridfahrzeugen verbauten E-Motorenkonzepte zeichnen sich durch einen hohen Grad an Modularität und einen geringen Grad an Integration aus. Das lässt sich damit erklären, dass man meist auf vorhandene Fahrzeugarchitekturen bzw. Karosseriekonzepte, die für den Einbau von klassischen Verbrennungsmotoren entwickelt wurden, zurückgreifen musste und mit vergleichsweise geringen Verkaufszahlen rechnen musste. Das führte zu mehrteiligen, gebauten Lösungen für die individuellen Gehäuseteile, die aus Gewichtsgründen aus Aluminium und meist im Druckgussverfahren hergestellt werden. E-Motor, Getriebe und Leistungselektronik sind in separaten Gehäusen untergebracht, die miteinander verschraubt sind.

Bei den E-Motorenkonzepten, die zurzeit entwickelt werden, haben sich die Randbedingungen bereits grundlegend verändert. Es werden eigenständige Fahrzeugplattformen entwickelt, die ausschließlich auf die Verwendung von E-Antrieben und deutlich höhere Stückzahlen ausgelegt sind. Die Anforderungen an Gewicht, Bauraum, spezifische Leistung, Wirkungsgrad und Kosten sind stark gestiegen. Ein weiteres Entwicklungsziel ist, die Anzahl von Dichtflächen und Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten zu verringern. Eine kompakte Bauform bietet zusätzlich den Vorteil von kurzen elektrischen Verbindungen und Kabellängen, die sich positiv auf den Einsatz von teurem und schwerem Kupfer auswirken. Diese Vorgaben fördern die Integration bei denen die Hauptkomponenten des E-Antriebes, E-Motor, Getriebe und Leistungselektronik, in einem gemeinsamen, idealerweise fluidgekühlten Gehäuse sitzen. Dem Thema "effiziente Kühlung" gilt dabei besondere Aufmerksamkeit. Die Gestaltung der Kühlkanäle im Bereich des Statorsitzes kann mittels einer Simulation der Wärmeströme unterstützt werden.

Nemak stellt gießtechnische Lösungen für alle in Frage kommenden Typen von E-Motorgehäusen, mit und ohne integrierte Öl- oder Wasserkühlung, eine Methode zur

Auslegung von Kühlkanalgeometrien und die Auswahlkriterien für geeignete, zunehmend auch nachhaltig produzierte Aluminium-Legierungen mit hoher Dehnung - zum Einschrumpfen des Stators - und mit guter Korrosionsbeständigkeit vor. Es wird auch dargelegt, wie die hohen Anforderungen an die Gussqualität in den verschiedenen Gießverfahren erreicht werden.

1. Einleitung

Die Einhaltung der zukünftigen Grenzen im CO₂-Ausstoß hat einen enormen Schub in der Entwicklung elektrifizierter Pkw-Antriebe zur Folge. Dabei ist eine breite Fahrzeugspanne von hybriden Antrieben über Plug-in-Hybriden bis zu reinen batterie-elektrischen Antrieben mit passend ausgelegten E-Maschinen abzudecken. Entsprechend vielfältige Varianten existieren in aktuellen und in der Konzeptphase befindlichen E-Maschinen hinsichtlich individueller Lastenhefte, Design, Leistung und Seriengröße.

2. Fertigungskonzepte E-Motoren/ Motorengehäuse

Die erste Motorengeneration in hybridisierten oder batterieelektrischen Fahrzeugen ist gekennzeichnet durch modular aufgebaute Gehäuseteile und einem geringen Integrationsgrad. Das lässt sich vor allem damit erklären, dass auf bestehende Fahrzeugarchitekturen bzw. Karosseriekonzepte und Komponenten zurückgegriffen wird, die ursprünglich für Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen entwickelt wurden.

Die zunächst noch sehr breit gefächerten technologischen Möglichkeiten in den elektrischen Antrieben und offene Zukunftsperspektive, welche Systeme sich bevorzugt als Pkw-Antrieb durchsetzen werden, führten zu Motoren Architekturen, bei denen Außengehäuse, Statorträger, Getriebeflansch und das Gehäuse für die Leistungselektronik als Einzelkomponenten ausgeführt sind, meist als Aluminium-Druckgussteile. Um eine aktive Fluid-Kühlung der E-Maschine zu ermöglichen wird das Gehäuse mehrteilig (Außengehäuse und innerer Statorträger) als gebaute Lösung ausgelegt. **Bild 1**.

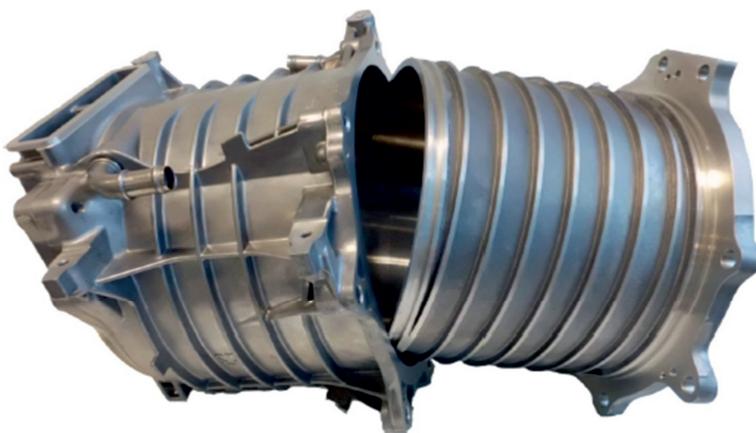


Bild 1: Assembliertes E-Maschinengehäuse mit separat gegossenem Innen-Statorträger sowie Außengehäuse (BMW i3); Fertigung im Druckguss.

Bei den E-Maschinen-Konzepten der neueren Generation haben sich die Rahmenbedingungen grundlegend geändert. Mittlerweile werden eigenständige Fahrzeugplattformen gezielt für E-Antriebe ausgelegt, die in deutlich größeren Stückzahlen zu produzieren sind. Die Anforderungen an geringes Gewicht, eng begrenzten Bauraum, hohe spezifische Leistung und Wirkungsgrad sowie geringe Gesamtkosten sind stark gestiegen, was den Wandel in der E-Motoren Architektur weiter antreibt.

Ein Optimierungsansatz besteht darin, die Bauteilintegration zu erhöhen. Das heißt mehrere Einzelkomponenten wie z.B. Außengehäuse, Getriebe und Leistungselektronik, die alle einzeln gegossen werden und mit diversen Fügetechnologien zusammenzubauen sind, werden dann in einem Gehäuse abgebildet, Bild 2.

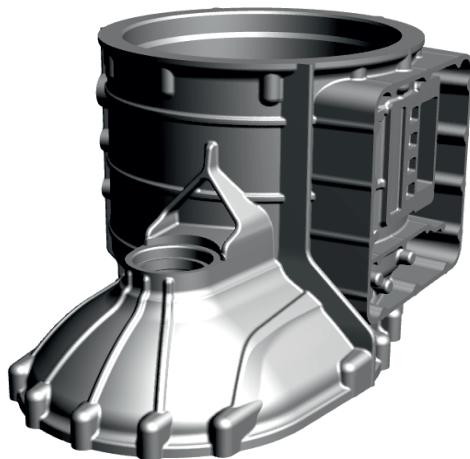


Bild 2: Bauteilintegrierte Lösung: Außengehäuse, Statorträger inkl. Kühlmantel, Inverter, Getriebeflansch sind in einem Gussteil integriert

Für die bauteilintegrierte Lösung ergeben sich fertigungstechnische Vorteile indem kritische Schnittstellen eliminiert und dadurch die Systemkosten gesenkt werden. Es ergibt sich darüber hinaus auch ein großes Potential zur Gewichtseinsparung und die Ausfallsicherheit wird im Fahrzeugeinsatz erhöht.

Die Funktionsintegration bietet den weiteren Ansatz zur Kosten- und Gewichtsreduktion sowie zur Verbesserung der Eigenschaften, Bild 3.



Bild 3: Funktionsintegriertes Gehäuse in der Medienführung; die Abbildung des Wassermantels erfolgt durch Verwendung verlorener Kerne (Kernpaketsandguss/Kokillenguss).

Dabei wird die Führung des Kühlmediums oder anderer Fluidkanäle durch die Verwendung verlorener Kerne direkt in einem Gussteil realisiert. Zur Optimierung der Kühlkanäle bietet sich ein vergrößerter Freiraum.

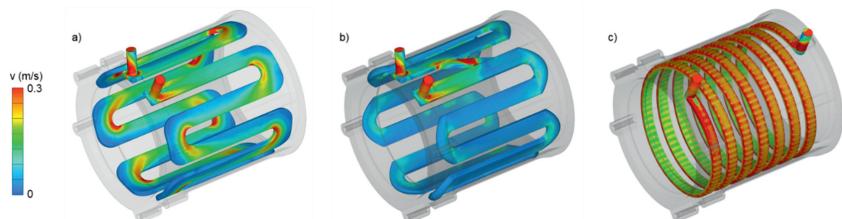
Kombinierte, hochkomplexe Gehäuse mit Bauteil- und Funktionsintegration sind nur im Kernpaketsand- (CPS) oder in Kokillengießverfahren darstellbar.

3. Kühlkonzepte

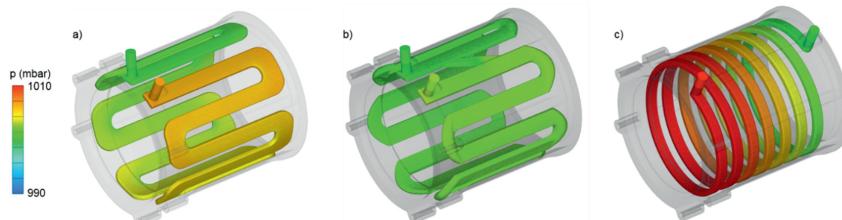
Für die E-Maschinen ist eine optimale Gehäuse-Auslegung und Gestaltung der Kühlkanäle von entscheidender Bedeutung für den späteren Betrieb. Gleichzeitig ist die Kanalauslegung auf eine fehlerfreie und kostengünstige Fertigung hin zu optimieren. Diese Aufgabe lässt sich bevorzugt durch den Einsatz von Simulationstools realisieren.

Komplexe Kühlkanalgeometrien (mäander- oder spiralförmig) stellen für die Produktion von integrierten E-Gehäusen eine Herausforderung dar [1,2].

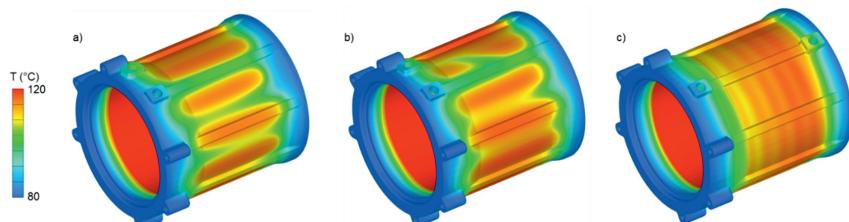
Mit Hilfe von CFD-Berechnungen wurden funktionelle Lösungen entwickelt, die insbesondere auch die Anforderungen einer optimalen Fertigungstechnik berücksichtigen. Bild 4 zeigt die Ergebnisse verschiedener CFD-Berechnungen, die für ein Demonstrator-Gehäuse der AVL List GmbH durchgeführt worden sind. Basierend auf der mäanderförmigen Referenzgeometrie (Variante a), deren Fertigung nur mit höchstkomplexen Werkzeugen realisierbar ist, wurden zwei alternative Kühlkanalgeometrien berechnet, die mit einem geringeren Aufwand bei gleichzeitig höherer Prozesssicherheit zu fertigen sind. In der Variante b, einer Mäanderform mit einem geringeren Strömungswiderstand, wurde eine Stützrippe eingefügt, die die Steifigkeit des Sandkerns erhöht. Die Strömungsberechnung zeigt deutlich, dass die Effizienz des Kühlkanals durch diese geometrische Anpassung nicht beeinträchtigt wird. In der Variante c wurde eine Spiralform berechnet. Zwar weist die Spiralform eine deutlich vergrößerte Kühlfläche auf und die Turbulenz des strömenden Kühlmediums wird erhöht, wodurch sich der Wärmeübergang verbessert. Nachteilig ist allerdings ein deutlicher Temperaturgradient von über 30 K in der Motorlängsachse. Ein grundlegender Vorteil des Einsatzes der CFD-Simulation liegt in der deutlich verkürzten Entwicklungszeit.



(I) Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums



(II) Druckverlust im Kühlmedium



(III) Temperaturverteilung im Außengehäuse

Bild 4: I-III: Vergleich Wassermantelausführung (a) Ausgangsdesign Mäanderkanalform,
 (b) funktions- und fertigungstechnisch optimierte Mäanderkanalform,
 (c) Spiral-Wassermantelkern

Neues Kühlkanaldesign zur Anwendung im Druckgießverfahren

Eine der derzeit am häufigsten verwendeten Lösungen bei der Kühlung des E-Motorgehäuses ist der spiralförmige Wassermantel. Der oben beschriebene Nachteil des T-Gradienten über die Längsachse war Anlass die Kühlkanalgeometrie zu optimieren, unter Einhaltung der Herstellbarkeit im Druckguss. Angeregt von Wärmetauschern aus der Elektronik oder

Hausfeuerung wurde ein Stift-Wassermantelkonzept entwickelt. Der Querschnitt eines entsprechenden Innengehäuses für den Elektromotor mit Stiftwassermantel ist in Bild 5 dargestellt.

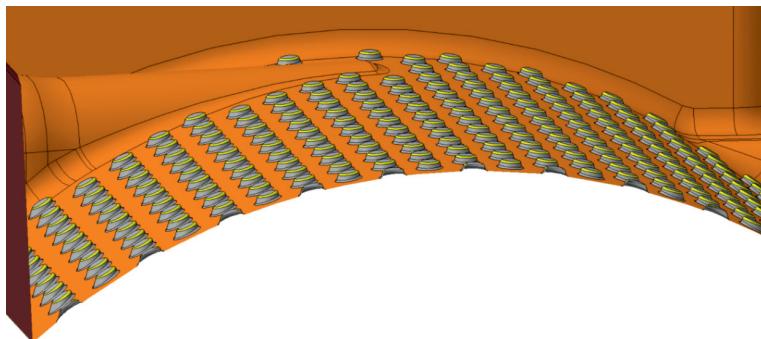


Bild 5: Querschnitt Innengehäuse mit Stiftwassermantel.

Die Oberfläche zum Kühlmedium ist für den Stiftwassermantel und den spiralförmigen Wassermantel dabei fast gleich. Der Hauptunterschied besteht im Volumen des Kühlmittels. Für das Stiftkonzept wird nur ein Viertel des Volumens des Spiralkanals benötigt, d.h. das Oberfläche/ Volumen-Verhältnis ist deutlich günstiger.

Um die Effizienz in der Kühlwirkung des Stiftwassermantels zu quantifizieren, wurde die Strömung des Kühlmediums und der Wärmeaustausch mit der CFD-Software Flow3D durchgeführt.

Die Ergebnisse der berechneten Temperaturverteilung für das Innengehäuse sind in Bild 6 dargestellt.

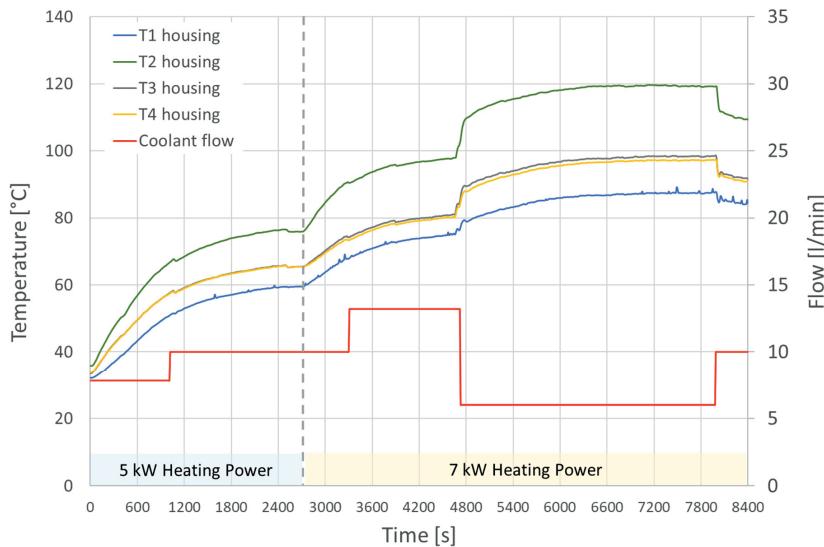


Bild 6: Temperaturverteilung Innengehäuse mit Stiftwassermantel bei 5 bzw. 7 kW Heizleistung des Motors.

Die Simulationsergebnisse wurden an eigens dafür entwickelten Prüfständen validiert. Der erste mit einem Plexiglas-Außengehäuse ermöglicht es den Kühlmittelstrom direkt aufzunehmen. Die Strömungssimulation und das transparente Modell zeigen eine gute Übereinstimmung. Ein zweiter Prüfstand wurde aufgebaut, um die Ergebnisse der Wärmeübertragung zu validieren. Es zeigt sich, dass der mit der Simulation vorhergesagte Druckverlust gut mit dem gemessenen korreliert. Ebenso korreliert die Temperaturverteilung mit der Messung am Prüfstand. Hervorzuheben ist, dass selbst bei einer höheren Wärmeverlustleistung von 7 kW beim Stiftwassermantel die Temperatur des Außengehäuses unter 90°C gehalten wird, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Druckabfall	51 mbar
Maximale Gehäusetemperatur	107 °C
Durchschnittliche Temperatur im Innengehäuse	90 °C
Durchschnittliche Flüssigkeitstemperatur	70 °C
Maximale Fluidtemperatur	84 °C

Werkstoffe für E-Motorengehäuse

An die E-Motorengehäuse werden unterschiedliche Anforderungen im Betrieb gestellt, die durch eine geeignete Wahl der Gusslegierung und Wärmebehandlung zu erfüllen sind.

Weiters dabei gilt es zu beachten, dass auch die Wahl des Gießverfahrens die Qualität und die mechanischen Eigenschaften der Gussteile steuert.

Die Anforderungen werden von folgenden Faktoren gesteuert:

- Einpressen des Stators in das Innengehäuse + Belastung im Betrieb → Legierungen mit hoher Festigkeit und Dehnung
- Dimensionsstabilität im Einsatz → geeignete Wahl von Gusswerkstoff mit Wärmebehandlung
- Verhinderung von Flächen- und Kontaktkorrosion insbesondere an außen liegenden Dichtflächen des Gehäuses → Einsatz korrosionsbeständiger Legierungen
- Abschirmung störender elektromagnetischer Felder → Elektromagnetische Verträglichkeit der eingesetzten Werkstoffe sicherstellen

Grundlegend war zu prüfen, ob verfügbare genormte Gusslegierungen über das geforderte Eigenschaftsprofil verfügen um im Bedarfsfall frühzeitig eine gezielte Werkstoffentwicklung zu initiieren. In der Gesamtanalyse waren die Metallkosten mit einzubeziehen. Hochpreisige Speziallegierungen sind bei dem außerordentlichen Kostendruck auf die E-Maschinen ein Ausschlusskriterium.

Um das Einschrumpfen des Stators in den Statorsitz realisieren zu können, bestehen Mindestanforderungen an Festigkeit und Duktilität. Grundsätzlich besteht hier ein Zielkonflikt mit den Metallkosten: höher tolerierbare Fe-Gehalte reduzieren den Metallpreis, senken aber gleichzeitig die Duktilität.

Für zweiteilige Druckgusslösungen besteht eine Minimalforderung für die 0,2%-Dehgrenze ($R_{p0,2}$) von 140 MPa und eine Bruchdehnung von 1 %. Diese wird von der Standard-Legierung

EN AC-Al Si9Cu3(Fe) erfüllt [3]. Höhere 0,2%-Dehngrenzwerte von über 180 MPa lassen sich in der Serienproduktion nur nach einer einstufigen T5-Wärmebehandlung sicher erreichen. Bei noch höheren Anforderungen an die Festigkeit und Dehnung wird eine zweistufige T6-Wärmebehandlung erforderlich und es kommen Legierungen zum Einsatz, die eine höhere Duktilität aufweisen, z.B. die EN AC-AlSi8Cu3, die dann im Kernpaket-Sand- und Kokillenguss eingesetzt wird, Bild 7.

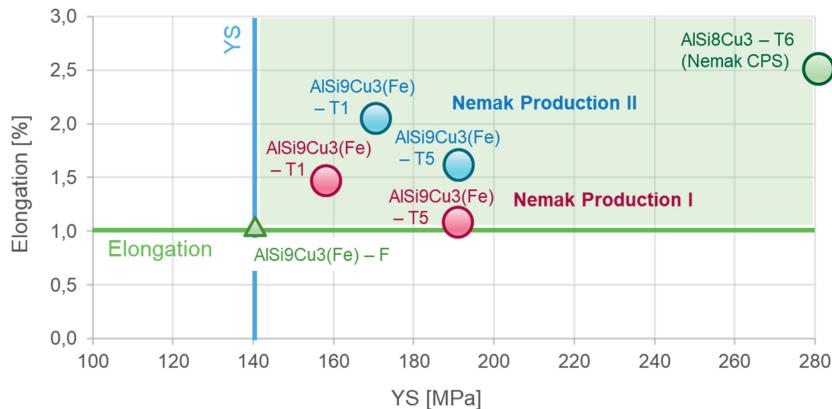


Bild 7: Erreichbare mechanische Kennwerte für AlSiCu-Gusslegierungen im Gusszustand (F) nach einstufiger (T5) oder zweistufiger Wärmebehandlung (T6)

Anzumerken ist, dass Komponenten im Gusszustand die kostengünstigste Lösung darstellen und eine einstufige T5-Wärmebehandlung kostengünstiger ist als eine zweistufige T6-Behandlung. Cu-haltige Al-Legierungen sind im Gusszustand nicht dimensionsstabil.

Ein zweites entscheidendes Kriterium in der Werkstoffauswahl ist die Forderung nach Korrosionsbeständigkeit. Diese wird besonders relevant an Dichtflächen in denen ein flächiger Korrosionsangriff zu einer Unterwanderung der Abdichtungen führen kann und dadurch ein hohes Ausfallrisiko der E-Maschine durch eindringendes Wasser entsteht. Die Korrosionsbeständigkeit der Gusslegierungen wird durch Kupfer beeinträchtigt. AlSiMg-Legierungen (z.B. AlSi7Mg0,3 oder AlSi10Mg) bieten hier die höchste Sicherheit gegen einen Korrosionsangriff, bei gleichzeitiger Erfüllung der Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften.

Die Forderung der elektromagnetischen Verträglichkeit wird von allen Aluminium-Gusslegierungen aufgrund des paramagnetischen Verhaltens problemlos erfüllt.

Literatur

- [1] A. Huber, M. Pfitzner, T. Nguyen-Xuan, F. Eckstein: Effiziente Strömungsführung im Wassermantel elektrischer Antriebsmaschinen. In: ATZ 8 (2013), S.478-485
- [2] O. Knaus, J. Schneider, B. Klarin: Simulation in der Entwicklung automotiver E-Maschinen. In: ATZ extra 23 (2018), Suppl. 2, S.32-37
- [3] EN 1706: Aluminium and aluminium alloys - Castings - Chemical composition and mechanical properties

Zerstörungsfreie Gussstückprüfung (ZfP) mit Hilfe der Computertomografie

Detektion und Bewertung von Porositäten mit industrieller CT unter Anwendung der BDG – Richtlinie P 203

Dipl.-Ing. (FH) **Andreas Harborth**, Volume Graphics GmbH, Heidelberg

Kurzfassung

Gussstücke weisen trotz ihrer bedeutenden technischen und wirtschaftlichen Vorteile oftmals den Nachteil auf, dass sie durch unterschiedliche Ursachen generierte Porositäten in Form von Gasporen und Erstarrungslunkern enthalten. Das Ziel der Gießer besteht darin, die Menge und Größe von Porositäten in Gussstücken so zu minimieren, dass diese die spätere Funktion der Bauteile nicht beeinträchtigen.

Der Einfluss von Porositäten auf die statische und dynamische Bauteilfestigkeit ist bedeutend und darf nicht unterschätzt werden. Einige Beispiele verdeutlichen hier die Zusammenhänge.

Die zerstörungsfreie Prüfmethode mittels Röntgen-CT zur dreidimensionalen Bestimmung und Beurteilung von Volumendefiziten in Gussstücken ist in der BDG - Richtlinie P 203, Stand Dezember 2019 ausführlich beschrieben.

Anhand eines Anwendungsbeispiels mit einem Druckgussbauteil aus dem Automotive Powertrain-Bereich wird die Vorgehensweise bei der zerstörungsfreien Prüfung mit Hilfe der industriellen CT gezeigt. Die Ergebnisse der Porositätsanalyse nach BDG - Richtlinie P 203 werden dargestellt und zusätzlich mit Porositätsdaten aus einer Formfüll- und Erstarrungssimulation verglichen.

Die statistische Erfassung und Auswertung von detektierten Porositäten sowie Trendanalysen für verschiedene Porositätsparameter bieten dem Gießer neue Möglichkeiten für den rechtzeitigen Eingriff in den Gießprozess, bevor Ausschuss entsteht.

Künstliche Intelligenz & Machine Learning Funktionen in CT-Systemen und CT-Software werden die Automatisierung der Auswertung von Volumendefiziten in Gussteilen zugunsten aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Parteien weiter voranbringen.

Abstract

In spite of their significant technical and economic advantages, castings often have the disadvantage that they contain porosities in the form of gas pores and solidification voids generated by various causes. The aim of the foundry is to minimize the amount and size of porosities in castings in such a way that they do not affect the later function of the components.

The influence of porosity on the static and dynamic component strength is significant and must not be ignored. A few examples illustrate the connections here.

The non-destructive testing method using X-ray CT for three-dimensional determination and assessment of volume deficits in castings is described in detail in BDG Reference Sheet P 203, as of December 2019.

Using an application example with a die-cast component from the automotive powertrain area, the procedure for non-destructive testing with the help of industrial CT is shown. The results of the porosity analysis according to BDG Reference Sheet P 203 are presented and also compared with porosity data from a mold filling and solidification simulation.

The statistical recording and evaluation of detected porosities as well as trend analyzes for various porosity parameters offer the caster new possibilities for timely intervention in the casting process before rejects occur.

Artificial intelligence & machine learning functions in CT systems and CT software will further advance the automation of the evaluation of volume deficits in cast parts for the benefit of all parties involved in the product development process.

1. Industrielle Computertomographie (iCT) für Gießereianwendungen

Leichtmetallgussstücke bieten bedeutende technische und wirtschaftliche Vorteile wie z.B. die Möglichkeit einer hohen Funktionsintegration, ein geringes spezifisches Gewicht und eine hohe Maßgenauigkeit. Insbesondere die mit dem Druckgießprozess hergestellten Gussstücke weisen jedoch oftmals den Nachteil auf, dass sie durch unterschiedliche Ursachen generierte Porositäten in Form von Gasporen und Erstarrungslunkern enthalten.

Das Ziel der Gießer besteht darin, die Menge und Größe von Schwindungsponositäten und Gasporositäten in Gussstücken so zu minimieren, dass diese die spätere Funktion der Bauteile nicht beeinträchtigen. Die seit Jahrzehnten etablierte 2D-Röntgentechnik ist hierbei nur bedingt geeignetes Werkzeug, um Gießprozessoptimierungen effektiv zu steuern. Denn die

Interpretation der Ergebnisse der 2D-Inspektionen ist stark abhängig vom Erfahrungsschatz des Anlagenbedieners und/oder des Gießereitechnologen.

Die iCT bietet neben der typischen visuellen Inspektion von Werkstücken viele weitere Funktionalitäten, welche bei konsequenter Nutzung zu einer sehr zügigen Amortisation der Investitionskosten führen können. Im nachfolgenden Bild sind die typischen Möglichkeiten einer CT-Anlage der einer Standard-2D-Röntgenanlage gegenübergestellt.

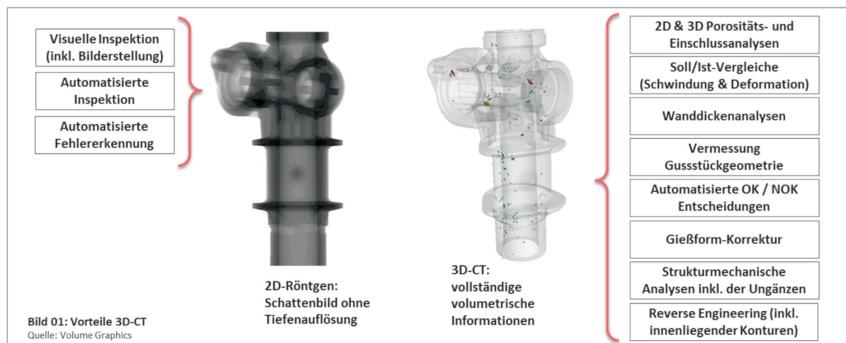


Bild 01: Vorteile 3D-CT
Quelle: Volume Graphics

Dem Gießer steht mit einer 3D-CT-Anlage ein sehr gut automatisierbares Prüfmittel für serienbegleitende Stichprobenprüfungen oder sogar 100%-Serienprüfungen zur Verfügung. Ungänzen jedweder Art in Gussstücken können zerstörungsfrei mit Hilfe von 2D-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 202 und 3D-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 schnell und reproduzierbar detektiert und ausgewertet werden. Zusätzlich können parallel zur Porositätsanalyse mit der CT z.B. auch eine Vermessung der Gussstückgeometrie oder eine Wanddickenanalyse vorgenommen werden.

2. Einfluss der Porosität auf statische und dynamische Festigkeiten von Gussstücken

Die Festigkeitseigenschaften eines Gussstücks sind abhängig von den Werkstoffeigenschaften der Gusslegierung, der Kerbempfindlichkeit und von den örtlichen Betriebsbeanspruchungen, bei aushärtbaren Gusslegierungen auch vom Wärmebehandlungszustand.

Zusätzlich zu diesen hauptsächlich von der Gusslegierung bestimmten Eigenschaften kommt der nicht zu unterschätzende Einfluss von Fremdkörpern, z.B. in Form von harten Ein-

schlüssen, von Rissen im Gussstückgefüge und von Volumendefiziten in Form von Gasporen und Erstarrungslunkern auf die statischen und dynamischen Festigkeiten von Gussstücken. Denn Ungänzen innerhalb von Gussstücken wirken wie innere Kerben und beeinflussen hochsignifikant und in ungünstiger Weise sowohl die statischen als auch dynamischen Festigkeitseigenschaften.

Aufgrund der großen Volumenänderung von flüssig nach fest bei der Erstarrung von Leichtmetallgusslegierungen (Schwindung) und der in der Produktion verwendeten Gießverfahren ist die Porosität hier der bestimmende Faktor. Volumenporosität, Art der Porenverteilung und Porenmorphologie beeinflussen deutlich die dynamischen Festigkeitseigenschaften wie Schwingfestigkeit und Bruchlastspielzahl.

Als Beispiele für den ungünstigen Einfluss von Form (Porenmorphologie) und Lage von Porositäten innerhalb eines Gussstücks werden hier zwei Porositätseigenschaften näher betrachtet: Die Zerkleinerung von Poren (Sphärizität ψ) und die Porenlage (Randabstand d_a).

Die nachstehenden Diagramme und Bilder zeigen hier deutlich den Einfluss der Sphärizität und des Randabstands von Poren auf die Festigkeitseigenschaften einer Rundstabzugprobe aus der Gusslegierung AlSi7Mg0.3 im Gusszustand F (ohne Wärmebehandlung) [1], [2].

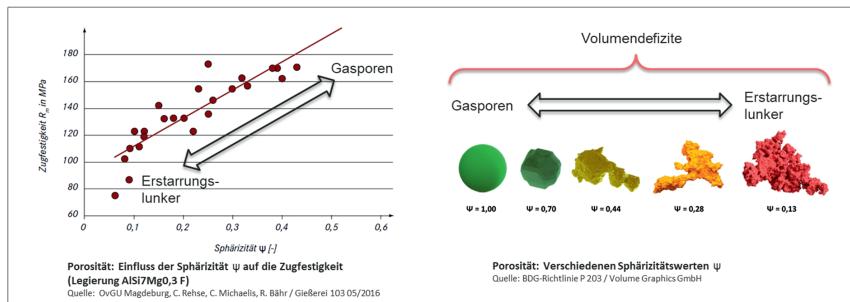


Bild 02: Einfluss der Porenmorphologie / Sphärizität ψ [1], [2]

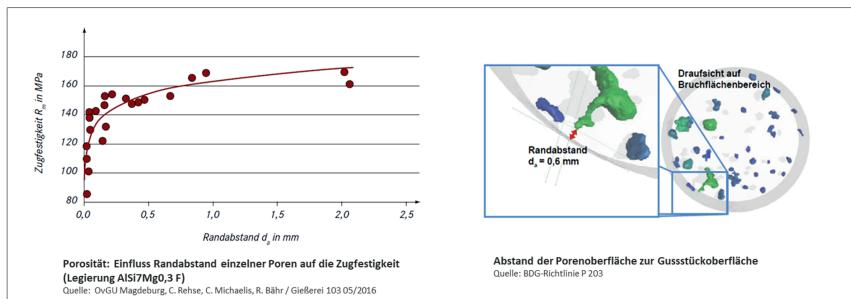


Bild 03: Einfluss der Porenlage / Randabstand d_a [1], [2]

Mit Hilfe der iCT können aufgrund der dreidimensionalen Röntgenprüfung die Porositätseigenschaften Sphärität und Randabstand von Poren sowie viele weitere Eigenschaften von Poren mit einem sehr großen Informationsgehalt schnell und reproduzierbar innerhalb eines Gussstücks detektiert, ausgewertet und sowohl für automatisierte OK/NOK-Entscheidungen in der Serie als auch für statische und dynamische Festigkeitsuntersuchungen herangezogen werden.

Die Prüfmethode mittels Röntgen-CT zur dreidimensionalen Bestimmung und Beurteilung von Volumendefiziten in Gussstücken aus Aluminium-, Magnesium- und Zinkgusslegierungen ist in der BDG - Richtlinie P 203, Stand Dezember 2019 ausführlich beschrieben.

3. BDG – P 203 Anwendungsbeispiel / Spezifikation Porosität

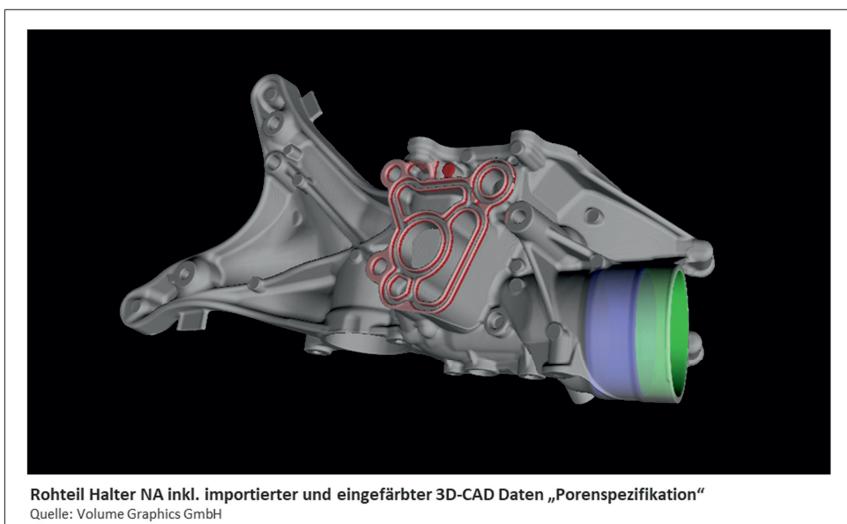
Anhand eines Anwendungsbeispiels mit dem Druckgusswerkstück „Halter NA“ aus dem Automotive-Bereich wird gezeigt, wie die Prüfmethode zur dreidimensionalen Bestimmung und Beurteilung von Volumendefiziten gemäß BDG – Richtline P 203 in der Praxis angewendet werden kann.

Bevor die eigentliche CT-Porositätsanalyse in der Gießerei durchgeführt werden kann, bedarf es jedoch vorbereitender Tätigkeiten durch den Konstrukteur des Gussstücks, d.h. es muss eine Spezifikation für die maximal zulässigen Porositäten im Gussstück erstellt werden.

Die Anforderungen an die maximale Gesamtporosität eines Gussstücks sowie ggf. lokal davon abweichende Anforderungen für funktionale und/oder festigkeitsrelevante Gussstückbereiche werden im 3D-CAD und/oder in der 2D-Zeichnung durch entsprechende Einträge spezifiziert.

Ideal ist es, wenn der Konstrukteur die Porositätsspezifikation durch die zusätzliche Erstellung von 3D-CAD-Volumendaten in dem Fertigteilmodell (fertig bearbeitetes Gussstück) unterstützt und die Porositätsschlüssel nach BDG – P 203 über entsprechende Einträge im 2D/3D-CAD vorgibt.

Diese CAD-Volumendaten zur Porositätsspezifikation können dann zusammen mit dem 3D-CAD-Datensatz des Gussstücks von Beginn des Produktentstehungsprozesses an für Anfragen des Kunden an den Lieferanten verwendet werden. Weiterhin können diese CAD-Volumendaten später über eine Importfunktion auf einfache Weise für die CT-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 verwendet werden.



Rohteil Halter NA inkl. importierter und eingefärbter 3D-CAD Daten „Porospezifikation“
Quelle: Volume Graphics GmbH

Bild 04: Rohteil inkl. importierter und eingefärbter 3D-CAD Daten „Porositätsspezifikation“

Die Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 beschreiben die Porositätsparameter wie z.B. die maximal zulässige Größe von Poren, den Mindestabstand von Poren zueinander oder zur Gussstückoberfläche, die maximale Gesamtvolumenporosität etc. für jede durch den Konstrukteur definierte Prüfregion im Gussstück.

Gleichzeitig kann mit einem Porositätsschlüssel auch festgelegt werden, welche Form oder Größe von Porositäten für die zu untersuchende Prüfregion nicht weiter analysiert werden müssen, z.B. könnten alle Poren mit einem Durchmesser ≤ 0.5 mm von der Porositätsanalyse

ausgeschlossen werden, da ggf. diese Porengröße in der zu untersuchenden Region für die erforderliche Funktion des Gussstückes unkritisch ist.

Eine näher spezifizierte Gussstückregion wird im Bereich der iCT-Anwendungen Prüfregion oder auch oft „Region-von-Interesse“, in Englisch „Region-of-Interest“, kurz „ROI“ genannt.

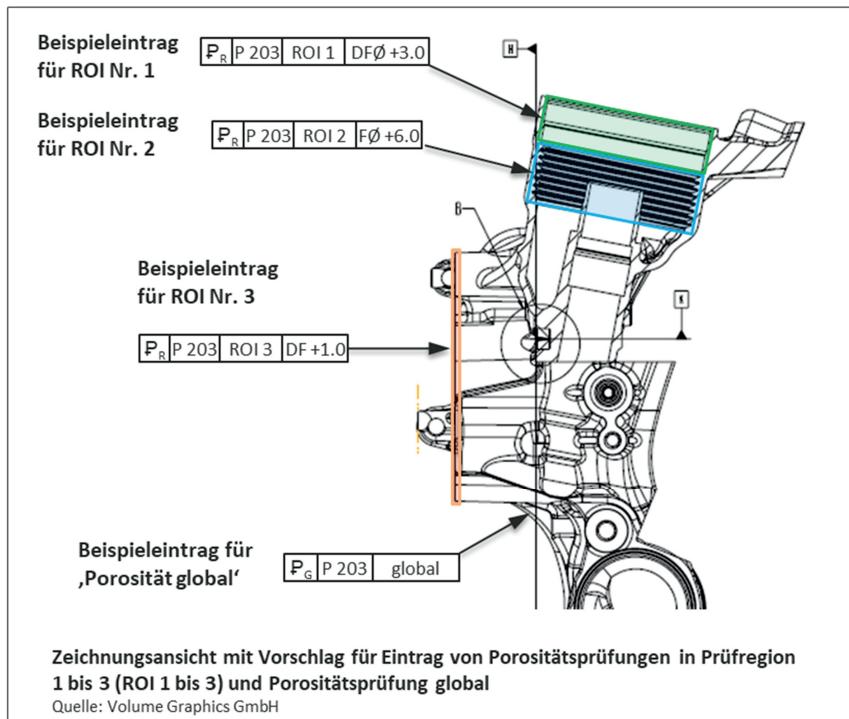


Bild 05: 2D Zeichnungsansicht mit Vorschlag für Eintrag von Prüfregionen 1 bis 3

Sowohl die Definition von Porositätsschlüsseln nach BDG – P 203 für das gesamte Gussstück sowie auch für gesondert zu berücksichtigende Prüfregionen hierin, als auch die genaue Zuordnung dieser Porositätsschlüssel zu den Prüfregionen über Angaben in 2D-CAD in Form einer Tabelle (siehe Bild 06) oder die direkte Zuordnung zu einem als Prüfregion gekennzeichneten 3D-CAD-Volumendatensatzes, ermöglichen transparente Prüfvorschriften für den Kunden (Abnehmer der Gussstücke) und den Lieferanten (Gießerei).

BDG - P 203		Halter NA					
Teilbereich (ROI)	Anzahl (ROI)	Name	Symbol	Funktion + ROI-Tiefe	Porositätsschlüssel		
Global	1	Gussstück global	P _G	---	P _G 0.15 / Øaq 4 / ψ 0.4 / da 0.5 / UØp 0.6		
ROI 1	1	Dichtfläche Ø69.5	P _R	DFØ +3.0	P _{ROI} 0.15 / Øp 0.5 / Gap 4 / Z 4 / UØp 0.3		
ROI 2	1	Gewinde S68x3	P _R	FØ +6.0	P _{ROI} 0.15 / Øp 2 / Gap 2 / Z 10 / UØp 0.5		
ROI 3	1	Dichtfläche	P _R	DF +1.0	P _{ROI} 0.15 / Øaq 0.5 / Gap 4 / Z 4 / UØp 0.3		
ROI 4.1 bis 4.6	6	Gewinde M8	P _R	FØ +3.0	P _{ROI} 0.5 / Øp 4 / Gap 2 / Z 4 / UØp 0.6		
ROI ...							

Tabelle der Porositätsschlüssel nach BDG - P 203 für Beispiel Halter NA
Quelle: Volume Graphics GmbH

Bild 06: Tabelle der Porositätsschlüssel nach BDG – P 203 für Beispiel Halter NA

4. BDG – P 203 Anwendungsbeispiel / Porositätsanalyse

Wenn eine Porositätsspezifikation mit Porositätsschlüsseln nach BDG – Richtlinie P 203 für ein zu untersuchendes Gussstück seitens des Kunden (Gussstückabnehmer) vorliegt, kann der Lieferant (Gießer) einen Prüfplan erstellen, eine CT-Porositätsanalyse inkl. der Eingabe der Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 in der CT-Software in kurzer Zeit konfigurieren und dann automatisch mit einer beliebigen Anzahl von Gussstücken die Porositätsanalyse mit identischen Einstellungen wiederholt durchführen.

Zu jedem gescannten Gussstück werden für die einzelnen Prüfregionen in einer 3D-Ansicht die Ergebnisse der Analyse mit informativen Ergebnismarkern angezeigt. Abweichungen von der Porositätsspezifikation werden im Ergebnismarker rot markiert. Liegen keine Abweichungen vor, sind die Ergebnisse grün unterlegt.

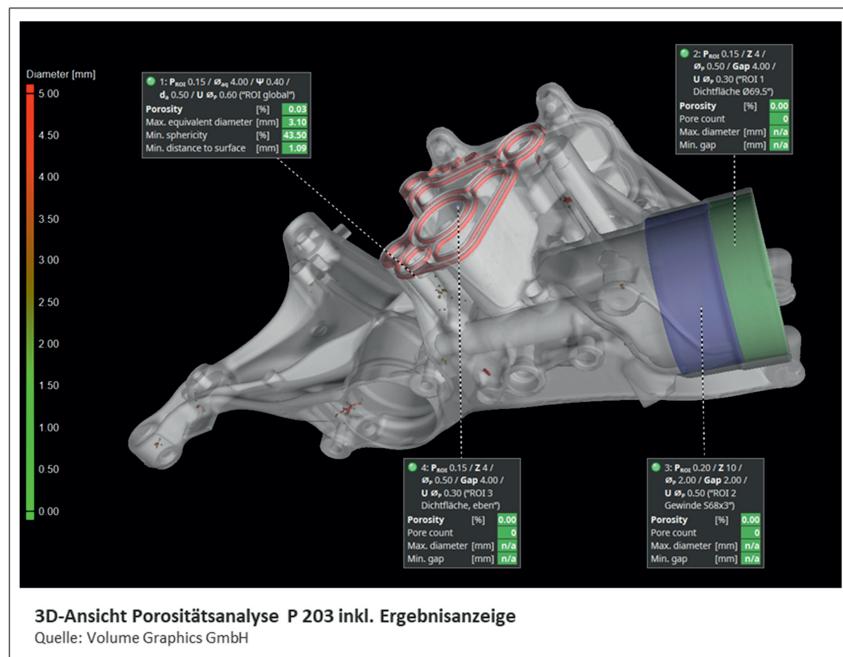


Bild 07: 3D-Ansicht Porositätsanalyse P 203 inkl. Ergebnisanzeige

Zu jeder Porositätsanalyse kann manuell oder automatisch ein Prüfbericht inkl. Listung aller verwendeten Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203, inkl. dem automatisch ermitteltem Q-Faktor (Aussage über die Bildqualität des CT-Scans) und inkl. zuvor festgelegter 2D/3D Gussstückansichten erstellt werden.

Die Ergebnisse der CT-Porositätsanalyse können zusätzlich verwendet werden für automatisierte OK/NOK-Entscheidungen, für eine statistische Erfassung und Auswertung einzelner Porositätsparameter, für strukturmechanische Untersuchungen (statische und dynamische Festigkeiten), für Zerspanungssimulationen und für Vergleiche mit Ergebnissen aus Gießsimulationen.

5. Statistische Erfassung und Auswertung von Porositäten

Die mit einer 3D-CT-Porositätsanalyse ermittelten Porositätsdaten können inkl. der zugehörigen Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 gussstückbezogen für eine statistische Erfassung aus der CT-Software heraus in ein Statistikprogramm zur weiteren Auswertung exportiert werden. Dies ermöglicht sodann z.B. die Auswertung fertigungsrelevanter Prüfmerkmale (besondere Merkmale), die Führung von diversen Gussstückstatistiken inkl. Rückverfolgbarkeit, die Abbildung von Trendverläufen inkl. Nutzung von Eingriffsgrenzen zur Alarmausgabe und die Durchführung von Analysen zur Prozessfähigkeit Cp/CpK zu einzelnen Prüfmerkmalen etc.

6. Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der CT-Porositätsanalyse aus dem BDG – P 203 Anwendungsbeispiel in Kapitel 4 werden nun als Beispiel für eine in einer Gießerei durchaus typische, weiterführende Untersuchung mit Ergebnissen aus einer Formfüll- und Erstarrungssimulation verwendet.

Für das Beispiel des Gussstücks Halter NA wird einmal angenommen, dass der Gießer im Serienanlauf die gewünschte Prozessfähigkeit zu dem Prüfmerkmal Volumenporosität „global“ $P_G \leq 0.15\%$ aufgrund von zu viel Restlufteinschluss im Druckgießformhohlraum (Kavität) noch nicht abschließend bestätigen konnte.

Über die 3D-CT-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 konnte der Gießer aus den Ergebnissen jedoch ableiten, dass es sich trotz Optimierung der Gießprozesse, hier insbesondere der 1. Druckgießphase (Vorfüllphase „Metall bis Gießlaufanschnitt“) und der Verwendung einer passiv arbeitenden Druckentlüftung über Entlüftungsblöcke (auch im Gießerei-Jargon „Waschbretter“ genannt) primär um Einschluss von Restluft handelt: Trotz der größeren Anzahl von Poren in den Gussstücken wurden nur verhältnismäßig wenige Poren mit einer Sphärität $\psi \leq 0.4$, also nur wenige Porositäten mit einer stärkeren Zerklüftung, gefunden.

Hintergrund: Beim Druckgießverfahren können Porositäten mit nur einer geringen Sphärität mit hoher Wahrscheinlichkeit als Schwindungsdefizite (Schwindungslunker) eingestuft werden. Im vorliegenden fiktiven Fall wurden auch die vorhandenen Porositäten mit geringer Sphärität und tolerierbaren Abmessungen (Äquivalenzdurchmesser $\varnothing_{eq} \leq 4$) wiederholt nur in gießlaufanschnittfernen Materialanhäufungen an immer wieder gleichen Positionen detektiert. Mit diesen Erkenntnissen aus den CT-Porositätsanalysen konnte der Gießer die Druckgießformentlüftung über eine Formfüll- und Erstarrungssimulation entsprechend

optimieren. Die simulierten Optimierungen wurden dann in der Druckgießform in Form von Entlüftungsblöcken mit vergrößerten Entlüftungsquerschnitten umgesetzt.

Das neue Produktionslos mit der überarbeiteten Druckgießform wurde wiederum mit CT-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 geprüft und statistisch ausgewertet. Der Vergleich der Porositäten in den Bildern „CT-Scan (iO-Rohteil)“ mit „Simulation optimierte Entlüftung“ zeigt den Erfolg der durchgeführten Maßnahmen. Zugleich konnte die Prozessfähigkeit für das Prüfmerkmal Volumenporosität „global“ bestätigt werden.

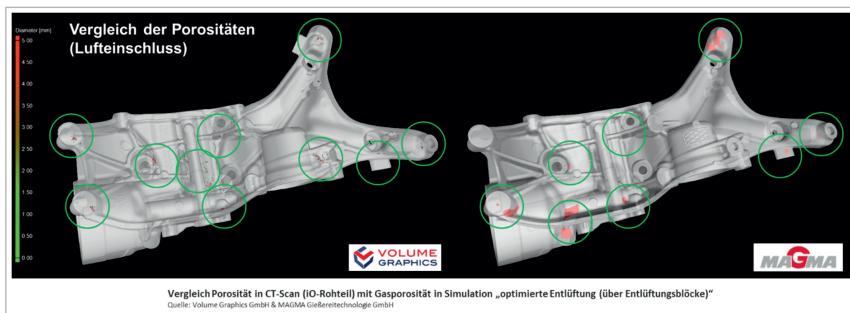


Bild 08: Vergleich Porosität eines CT-gescannten iO-Rohteils mit Porosität gemäß Simulation

Ein zusätzlicher Vergleich der Schwindungsporositäten (Erstarrungslunker) in den Bildern „CT-Scan (iO-Rohteil)“ und „Simulation Wahrscheinlichkeit für Schwindungsporosität“ zeigt eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der über die CT detektierten Lage der Schwindungsporositäten im Gussstück. Zugleich zeigen die Bilder auch, dass die Optimierungsmaßnahmen in der Druckgießform tendenziell auch einen positiven Einfluss in Form einer reduzierten Menge und Größe von Erstarrungslunker haben.

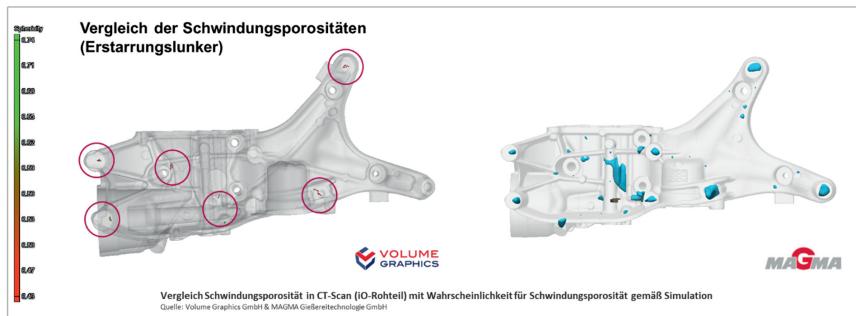


Bild 09: Vergleich Schwindungsporosität eines CT-gescannten iO-Rohteils mit der Auftretenswahrscheinlichkeit für Schwindungsporosität gemäß Simulation

Die Möglichkeit der 3D-Charakterisierung von Porositäten mittels iCT und Porositätsanalyse nach BDG – Richtlinie P 203 ermöglicht dem Gießer eine genauere Eingrenzung der Ursachen für ggf. vorliegende gießtechnische Probleme und empfiehlt sich daher als eine praktikable Ausgangsbasis für Prozessoptimierungen.

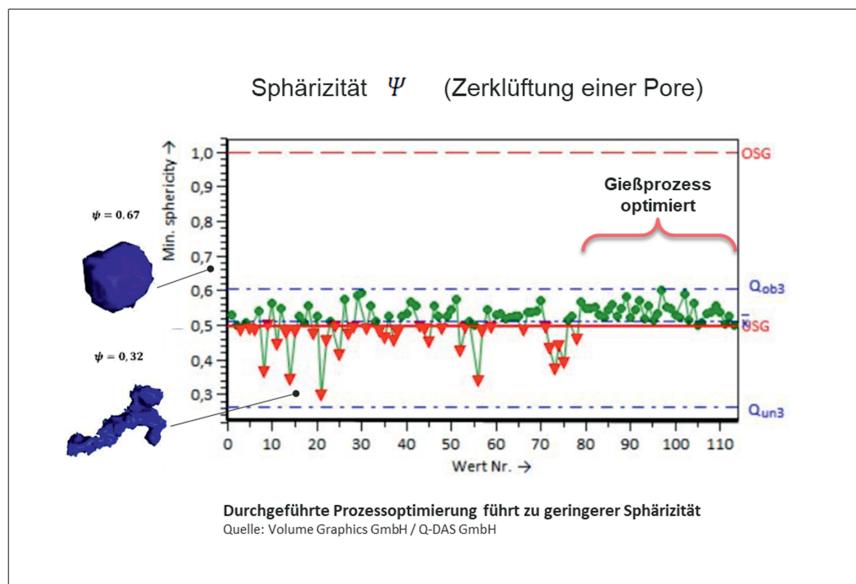


Bild 10: Durchgeführte Prozessoptimierung führt zu geringerer Sphärizität

7. Zusammenfassung

In Leichtmetallgießereien ist der Trend zu einer zunehmenden Automatisierung in Produktion und Qualitätssicherung erkennbar. Die industrielle 3D-Computertomografie kann dies sowohl in der Produktentwicklung und Produktion als auch in der Qualitätssicherung optimal unterstützen. In den kommenden Jahren wird die dreidimensional arbeitende iCT die etablierte 2D-Röntgentechnologie in den Leichtmetallgießereien immer mehr ergänzen oder sogar substituieren.

Industrielle 3D-CT-Inspektionen ermöglichen, neben der automatisierten Vermessung von Gussstückgeometrien, insbesondere eine schnelle, zerstörungsfreie und sehr gut automatisierbare Porositätsprüfung. Sie bietet eine genaue und reproduzierbare Lokalisierung und Quantifizierung von Porositäten und in Verbindung mit der Porositätsanalyse und Porositätsbeurteilung nach BDG – Richtlinie P 203 die dreidimensionale Erfassung und Beschreibung von Volumendefiziten.

Die Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 vereinfachen die Definition von Porositätsparametern, sind integrierbar in 2D- und 3D-CAD und ermöglichen transparente Prüfvorschriften für den Gussabnehmer (Kunde) und dem Gießer (Lieferant). Das Anwendungsbeispiel mit dem Druckgusswerkstück Halter NA, inklusive der Erläuterung der Ergebnisse aus der Porositätsanalyse nach BDG – Richtlinie P 203 und die Vergleiche mit Ergebnissen aus einer Formfüll- und Erstarrungssimulation, zeigen die sehr großen Potenziale der iCT für die Verbesserung der Produktivität in Leichtmetallgießereien.

Zusätzlich bietet die Erfassung und Beschreibung der realen 3D-Porenmorphologie in Gussstücken mit Hilfe der iCT und der BDG – Richtlinie P 203 über nur einige wenige Porositätsparameter die Möglichkeit auch erste qualitative Untersuchungen der Porositäten hinsichtlich des Einflusses auf die statischen und dynamischen Festigkeiten vorzunehmen.

Die statistische Auswertung von detektierten Porositäten bietet hier neue Möglichkeiten, z.B. können Trendanalysen erstellt und für Gießprozessoptimierungen herangezogen werden, bevor Ausschuss produziert wird. Der Anstoß von automatischen oder halbautomatischen Gießprozessoptimierungen ist denkbar.

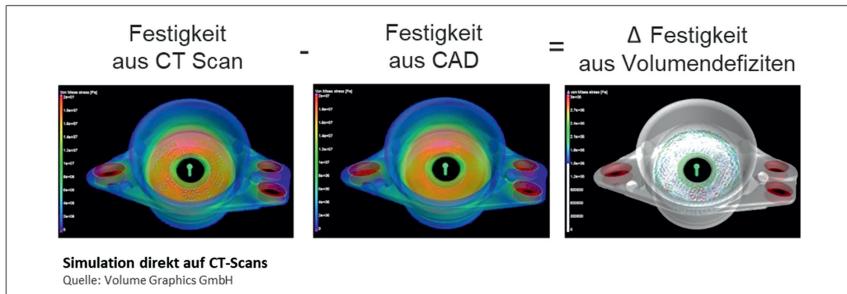


Bild 11: Simulation direkt auf CT-Scans

Künstliche Intelligenz & Machine Learning Funktionen in CT-Systemen und CT-Software werden die Automatisierung der Auswertung von Volumendefiziten in Gussteilen zugunsten aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Parteien weiter voranbringen. In Verbindung mit den Werkstoffeigenschaften von Gusslegierungen können aus einer 3D-Porositätsanalyse, zusammen mit den quantitativen Analyseergebnissen, auch qualitative Bewertungen abgeleitet werden.

Insgesamt eine sehr interessante Perspektive für die industrielle CT in Leichtmetallgießereien.

Glück auf!

- [1] Bähr, R., Rehse, C., Stroppe, H., (2016): OvGU Magdeburg / Computertomografisch ermittelte Porosität und ihre Wirkung auf die Festigkeitseigenschaften von Al-Gusslegierungen, Gießerei-Zeitung 103 05/2016
- [2] BDG – Richtlinie P 203, Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e.V., Düsseldorf, www.bdguss.de, www.guss.de

Evolution des Hot-Box-Verfahrens durch elektrisches Aushärten anorganisch gebundener Sandkerne Potenziale für den Leichtmetall- und Eisenguss

Evolution of the hot box process through electrical curing of inorganically bonded sand cores Potentials for light metal and iron casting

Dr.-Ing. **Eric Riedel**, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg;
Dipl.-Ing. **Wolfram Bach**, Soplain GmbH, Sülzetal

Kurzfassung

Die Ansprüche an verlorene Kerne steigen, sowohl für den Leichtmetall- wie auch für den Eisenguss. Während sich anorganische Binder im Leichtmetallguss zunehmender Beliebtheit erfreuen, werden auch die Eisengießer – bedingt durch immer strenger werdende Vorgaben – über kurz oder lang nicht umhinkommen, sich zur Reduzierung der Schadstoffemissionen dem Thema Anorganik anzunehmen. Mit dem noch jungen ACS-Verfahren trägt die Soplain GmbH den modernen Anforderungen an zunehmend komplexer werdende Kerne, einer nachhaltigeren Fertigung sowie den nicht nachlassenden Bestrebungen zur digitalen Erfassung aller wichtiger Prozessabläufe Rechnung. Das patentierte Verfahrensprinzip ermöglicht eine gegenüber dem Hot-Box-Verfahren effizientere, ganzheitliche Erwärmung der Kerne und erlaubt die Echtzeit-Erfassung aller relevanten Prozessdaten. Durch die Möglichkeit der Installation der ACS-Technologie auf bestehenden Kernschießanlagen mit SPS-Steuerung – Cold-Box- wie Hot-Box-Anlagen – kann das Verfahren zudem einen wertvollen Beitrag bei der Umstellung von Organik auf Anorganik leisten, die Eisengießer bei dieser Entwicklung unterstützen und damit gesamtheitlich einen wertvollen Beitrag zu einer nachhaltigeren Ausrichtung der Gießereibranche leisten.

Abstract

The demands on lost cores are increasing, both for light metal and iron casting. While inorganic binders are becoming increasingly popular in light metal casting, sooner than later iron foundries will also have to address the opportunities of inorganics in order to reduce pollutant emissions, due to increasingly stringent specifications. With the still young ACS process, Soplain GmbH is meeting the modern requirements of increasingly complex cores, more sustainable

production and the ongoing efforts to digitally record all important process sequences. The patented process principle enables more efficient, comprehensive heating of the cores compared to the hot-box process and allows real-time recording of all relevant process data. Due to the possibility of installing the ACS technology on existing core shooters with PLC control - cold box as well as hot box systems - the process can also make a valuable contribution to the changeover from organic to inorganic, support iron foundries in this development and thus make a valuable overall contribution to a more sustainable orientation of the foundry industry.

1. Einleitung

Trotz umfangreicher Veränderungen und Entwicklungen zum klassischen Verbrennungsmotor alternativer Antriebskonzepte bleibt die Kernfertigung zur Realisierung komplexer Geometrien in vielen Bereichen der automobilen Gussteelfertigung essenzieller Bestandteil. Insbesondere im Leichtmetallguss mit Fokus auf Aluminiumgussteile steigt hierbei die Bedeutung anorganischer Bindersysteme [1], da u.a. auf politischer Ebene erlassene Vorschriften wie die TA Luft, deren Neufassung für Herbst 2021 vorgesehen ist [2], die Umstellung von organischen auf anorganische Bindersystemen für viele Betriebe erforderlich macht. Eine Vorschrift, die insbesondere die Eisengießer und somit die Binderhersteller betrifft und zunehmend dazu zwingt, sich mit dem Thema Anorganik im Eisenguss zu beschäftigen, um auf diese Weise die entsprechenden Umweltvorgaben perspektivisch einhalten zu können.

Während die Verarbeitung organisch gebundener Sandkerne üblicherweise im Cold-Box-Verfahren und ihre Aushärtung durch eine Aminbegasung erzielt wird [3], erfolgt die Fertigung anorganisch gebundener Kerne mittels Kernschießanlage (KSA) zumeist im Hot-Box-Verfahren [4]. Mittels temperierter Kernwerkzeuge wird die erforderliche Wärme auf die geschossenen Kerne übertragen, wodurch diese im Rahmen einer thermisch bedingten Kondensationsreaktion aushärten. Während die geringe Wärmeleitfähigkeit des meist für die Kernfertigung eingesetzten Quarzsandes zu langen Taktzeiten führt, daher den Einsatz sehr hoher Kernkasten- und Spüllufttemperaturen erforderlich macht und insbesondere bei großvolumigen Kernen die damit einhergehende Schalenbildung und Restfeuchtigkeit qualitative Herausforderung darstellen, erlaubt das Hot-Box-Verfahren in seiner derzeitigen Form kaum Rückschlüsse auf die Qualität der geschossenen Kerne und ist nur mit erheblichem Aufwand digital erfassbar. Darüber hinaus werden in Zukunft die geometrischen Anforderungen an die Kerne steigen. Eine Entwicklung, welche die Bedeutung der additiven Fertigung auf diesem Gebiet weiter fördert [5, 6], aber auch Chancen für das Kernschießen und der anschließenden Aushärtung im Hot-Box-Verfahren birgt; jedoch nur, wenn sich das Hot-Box-Verfahren selbst weiterentwickelt, fertigungstechnische Antworten auf die zunehmende Komplexität zukünftig geforderter

Kerne aufzeigt und die bisherigen verfahrensbedingten Nachteile beheben kann. Mit dem patentierten ACS-Verfahren hat die Soplain GmbH eine Technologie entwickelt, die diese zukunftsorientierten Ansprüche an das Hot-Box-Verfahren erfüllt und somit die Bedeutung des Kernschießens für die Fertigung anorganisch gebundener Sandkerne langfristig stärken kann.

2. Technologische Grundlage des ACS-Verfahrens

Das ACS-Verfahren ist neben dem etablierten Cold- und Hot-Box-Verfahren ein neuartiger technologischer Ansatz zur Kernaushärtung, der sich die elektrische Leitfähigkeit aller am Markt verfügbaren anorganischen Binder zunutze macht. Die elektrische Leitfähigkeit der anorganischen Bindersystem resultiert aus ihrem Wassergehalt, durch dessen thermisch bedingte Abspaltung die Aushärtung der Kerne erfolgt. Die Entwicklung spezieller elektrisch leitfähiger Werkstoffe für die Kernkästen erlaubt bei Anlegen einer elektrischen Spannung einen homogenen Stromfluss durch Kernkasten und geschossenen Kern. Gemäß dem physikalischen Ersten Joule'schen Gesetz [7] erwärmen sich der Kern – genauer gesagt die für den Zusammenhalt der Kerne verantwortlichen Binderbrücken – und der Kernkasten dabei infolge ihres eigenen elektrischen Widerstandes (konduktiv); und das homogen über den gesamten Kerndurchmesser und unabhängig von der Kerngeometrie. Grundsätzlich sind dem ACS-Verfahren durch die Wandstärken der zu fertigenden Kerne keine Grenzen gesetzt. Vielmehr erlaubt das Verfahren durch eine bedarfsgerechte Kernkastengestaltung und die entsprechende Steuerung eine den verschiedenen Geometriebereichen der Kerne individuell zugeschnittene Aushärtung. Beim ACS-Verfahren wird die für die Aushärtung erforderliche Wärme somit primär im Kern selbst erzeugt und ist nicht mehr von der Werkzeugtemperatur sowie der geringen Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Quarzsandes abhängig. Da sich die Kernkästen aufgrund ihres eigenen elektrischen Widerstandes ebenfalls erwärmen, stellt sich im Serienbetrieb eine hybride Aushärtung aus Hot-Box- und ACS-Verfahren ein, bei der die Erwärmung des Kerns selbst jedoch im Mittelpunkt steht.

Neben den ACS-Kernkästen erfordert der Einsatz des Verfahrens die nach VW-Standard entwickelte ACS-Steuerung, die problemlos in bestehende Kernschießanlagen mit vorhandener SPS-Steuerung – egal ob Cold-Box- oder Hot-Box-Anlage – integriert werden kann (auch für vergleichsweise alte Anlagen ist somit ein Upgrade auf ein modernes Verfahren möglich). Sie steuert den kernindividuellen Erwärmungsprozess und erlaubt die Aufzeichnung aller relevanten Prozessdaten in Echtzeit.

3. ACS-Werkzeuge und prozessuale Eckdaten

Die eigentlich notwendige Aushärtetemperatur der meisten anorganischen Bindersysteme liegt in einem Temperaturbereich zwischen 100 und 120 °C. Während im Hot-Box-Verfahren zur Beschleunigung des Wärmetransports ins Kernzentrum, insbesondere für dickwandige Kerne, Temperaturen zwischen 180 und 250 °C aufgerufen werden, reicht dem ACS-Verfahren aufgrund der verfahrenseigenen homogenen Erwärmung der Kerne der Einsatz der binderspezifischen Aushärtetemperaturen, die mittels der ACS-Steuerung präzise angefahren werden können; es sind keine Überkompensationen erforderlich. Das Spülen ist für das ACS-Verfahren weiterhin notwendig, dient jedoch nicht mehr primär dem Wärme-, sondern lediglich dem Feuchtigkeitstransport und kann daher auch mit energieeffizienteren Temperaturen erfolgen als bislang. Für die Fertigung der ACS-spezifischen Kernkästen ist vor allem die neueste Entwicklung eines speziellen Epoxidharzes vorgesehen, das sich für die Kernkasten-Fertigung vergießen lässt und somit auch die Reparatur der Werkzeuge erlaubt. Ganzheitlich betrachtet vereinfacht das ACS-Verfahren die Fertigung der Kernkästen. Da sich diese ebenfalls durch ihren eigenen elektrischen Widerstand homogen erwärmen, entfällt die Notwendigkeit komplizierter, aufwendig und teuer zu fertigender Heizvorrichtungen innerhalb der Werkzeuge. Bei Produktionsbeginn kann die Erwärmung der Kernkästen auf Betriebstemperatur aufgrund des technologisch-physischen ACS-Verfahrensatzes innerhalb von 5 bis 10 Minuten erfolgen.

4. Potenziale für eine individualisierte Kernfertigung in der Serie

Das ACS-Verfahren gestattet gegenüber dem klassischen Hot-Box-Verfahren neue Möglichkeiten in Hinblick auf eine individuelle, bedarfsgerechte Aushärtung unterschiedlicher Bereiche ein und desselben Kerns. Der erste Schritt bei einer kernindividuellen Prozessauslegung des ACS-Verfahrens ist die Untersuchung der für den Kern vorgesehenen Sand-Binder-Mischung. Hierbei werden einzig und allein die temperaturabhängigen elektrischen Kennwerte der Sand-Binder-Probe erfasst. Es finden keine (!) Modifizierungen der Binderrezeptur statt. Im zweiten Schritt kann mittels numerischer Simulation eine Potenzialanalyse hinsichtlich voraussichtlicher Taktzeit(-einsparung), Erwärmungs- und Aushärtungsverhalten sowie des erforderlichen Energiebedarfs erfolgen. Im dritten Schritt werden für eine optimale Erwärmung des Kerns die elektrischen Eigenschaften des für den Kernkasten ausgewählten Materials an die Eigenschaften der Sand-Binder-Mischung angepasst. Erfolgt im vierten Schritt der eigentliche Werkzeugbau, ermöglicht die an die jeweilige Kerngeometrie angepasste Positionierung der für den Stromfluss erforderlichen und einzeln ansteuerbaren Elektroden hierbei eine wandstärkenabhängige Aushärtung jedes einzelnen Kerns. Auf diese Weise kann bspw. die Erwärmung

geringerer Wandstärkenbereiche bereits beendet werden, während die Erwärmung dickerer Kernbereiche noch andauert (bei gewünschter gleich langer Erwärmungszeit werden die Bereiche mit unterschiedlicher Leistung versorgt). In gleicher Weise können innerhalb von Familienkernkästen unterschiedliche Kerne individuell angesteuert und ihrer Geometrie entsprechend erwärmt und ausgehärtet werden.

5. Digitale Qualitätserfassung

Zuvor wurde bereits angedeutet, dass sich die elektrischen Kennwerte der Sand-Binder-Mischung temperaturabhängig verändern. Ergänzt wird dies durch geometrie- und prozessindividuelle Verläufe der elektrischen Kennwerte, die mit Hilfe der ACS-Steuerung in Echtzeit digital erfasst werden. Jedwede Abweichung vom idealen, durch den Verlauf der elektrischen Kennwerte nachvollziehbaren Aushärtungsverlauf über die definierten Toleranzgrenzen hinaus wird registriert. Ursachen können hierbei u.a. das Auftreten von Fehlern während der Kernkastenfüllung, Inhomogenitäten des Sand-Binder-Gemisches oder Werkzeugfehler sein. Derart auffällige Kerne können unmittelbar aus dem Prozess ausgeschleust und Ursachenanalysen durchgeführt werden. Zudem ermöglichen die in Echtzeit erfassten Daten Maßnahmen für das Predictive Maintenance und somit die Früherkennung tendenzieller Abweichungen. Auf diese Weise können erforderliche Maßnahmen ergriffen werden, bevor Ausschuss überhaupt erst entsteht.

6. Numerische Simulation

Im Zuge ständig fortwährender Weiterentwicklungen der ACS-Technologie lag einer der Schwerpunkte auf der Möglichkeit der numerischen Simulation des neuen Verfahrens. Zum einen, um den industriellen Ansprüchen auf diesem Gebiet Rechnung zu tragen; zum anderen, um Transparenz und Vertrauen in das neue Verfahren zu schaffen. Zusammen mit der Otto-von-Guericke-Universität konnte unter Verwendung der in der Gießereiindustrie etablierten Simulationssoftware FLOW-3D (v12.0) von Flow Science Inc. zunächst eine 1-Fluid-Basissimulation erstellt werden, die den Trocknungsprozess ohne Berücksichtigung des Spülens berechnet [8, 9]. Seitdem wurde am Beispiel einer branchenrelevanten Geometrie nun auch die Möglichkeit von 2-Fluid-Simulationen des ACS-Verfahrens – also auch unter Berücksichtigung des Spülens – erfolgreich erprobt, sodass nun auch eine volumfängliche Berechnung der Kertrocknung mit dem ACS-Verfahren möglich ist.

7. Chancen für die Anorganik im Eisenguss

Einen wichtigen Aspekt der ACS-Technologie stellt sein prozesstechnologisches Potenzial für den Einsatz der Anorganik im Eisenguss dar. Während der Anteil der Anorganik im Bereich der Leichtmetall-Gussteilfertigung ungehindert zunimmt, liegen die Hürden für die Verwendung anorganischer Binder und eine damit einhergehende massive Reduzierung der von den Gießereien verursachten Emissionen im Eisenguss deutlich höher. Der Druck auf die Eisengießereien wird durch immer strengere Vorgaben jedoch in den kommenden Jahren aller Voraussicht nach weiter zunehmen. Binderhersteller und Gießereien haben mit einzelnen veröffentlichten Projekten bereits gezeigt, dass und wie die Einführung der Anorganik im Eisenguss gelingen kann [10, 11, 12]. Nichtsdestotrotz ist der Einsatz der Anorganik im Eisenguss mit einer Vielzahl von Herausforderungen verknüpft, die nur im Zusammenschluss aller verantwortlichen Protagonisten umfassend gelöst werden können [12].

Hierbei stehen die Binderhersteller mit Ihrer grundlagenschaffenden Expertise an erster Stelle. Bekanntermaßen liegen beim Vergießen von Eisenschmelzen gegenüber Aluminium nahezu doppelt so hohe Schmelzetemperaturen und bis zu dreimal höhere Schmelzedichten vor, die in deutlich höheren thermischen und mechanischen Belastungen der Kerne resultieren. Die daraus resultierenden Herausforderungen an das Binderschlichtesystem, die Feuchte- und thermische Stabilität, die Vermeidung thermischer Deformationen sowie die Entkernbarkeit (Verglasung) [12] können nur durch das chemische Knowhow der Binderhersteller gemeistert werden.

Die ACS-Technologie kann hierbei in Hinblick auf die Sensibilität gegenüber der (Luft-)Feuchtigkeit prozesseitig unterstützen: Der Toleranzbereich für Schalenbildung und Restfeuchtigkeit der Kerne, wie sie bekanntermaßen beim Hot-Box-Prozess auftreten (vor allem bei Kernen mit hohen Wandstärken), ist im Eisenguss praktisch nicht vorhanden. Selbst bei absehbarer weiterer Verbesserung der chemischen Komponenten sind möglichst trockene Kerne erforderlich, die mit dem ACS-Verfahren realisiert werden können. Das der ACS-Technologie zugrundeliegende Verfahrensprinzip und die daraus resultierende vollständige Trocknung der Kerne kann eine Erhöhung der durchschnittlichen Kernfestigkeit während der Schlichttrocknung im Trocknungs Ofen begünstigen.

Und noch an anderer Stelle kann die ACS-Technologie einen wertvollen Beitrag leisten: Zum einen sehen sich die Eisengießer bei der Umstellung von der organischen auf die anorganische Kernfertigung mit Taktzeiteinbußen konfrontiert, die alle nachgelagerten kernabhängigen gießtechnologischen Prozesse beeinträchtigen. Die mit dem ACS-Verfahren gegenüber dem klassischen Hot-Box-Verfahren einhergehende Beschleunigung der Erwärmung und Aushärtung der anorganisch gebundenen Kerne kann hierbei zu einer Angleichung zwischen den

bisherigen und den mit der Anorganik evtl. neuauftretenden Taktzeiten beitragen. Zum anderen stehen viele Eisengießereien vor einem enormen Investitionsvolumen für die anlagenseitige Umstellung auf das anorganische Bindersystem. Durch die Möglichkeit der Umrüstung bereits vorhandener Cold-Box-Anlagen auf die Anorganik kann die ACS-Technologie dazu beitragen, die Umstellungskosten für die Gießereien drastisch zu reduzieren. Ein Effekt, der umso mehr zu Buche schlägt, je mehr KSA umgerüstet werden müssen.

Während die Themen der Grünsandverträglichkeit der anorganisch gebundenen Altsande und des bentonitgebundenen Formsandes sowie die evtl. anfallende, aber dringend erforderliche Trennung zwischen organischen und anorganischen Altsanden größtenteils in der Verantwortung der Gießereien selbst liegt, zeigt sich, dass ein für die Eisengießer ökonomisch tragbarer Übergang von der Organik auf die Anorganik nur durch den konkreten Zusammenschluss von Binderherstellern, Eisengießern sowie Anlagen- und Technologieentwicklern möglich ist.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das ACS-Verfahren positioniert sich als industrietaugliche Technologie für eine effizientere Aushärtung anorganisch gebundener Sandkerne und erfüllt dabei die Ansprüche an eine digitale Produktion im Sinne der Industrie 4.0. Das direkt mit dem Verfahrensprinzip einhergehende digitale Echtzeitmonitoring der Aushärtung selbst und des Gesamtprozesses ermöglichen maximale Prozesstransparenz, verbesserte/s Qualitätssicherung und -Management sowie Lösungen des Predictive Maintenance. Die mit dem ACS-Verfahren einhergehenden Möglichkeiten zur kernindividuellen und bedarfsgerechten Prozessauslegung werden den steigenden Ansprüchen an zunehmend komplexer werdende Kerne gerecht. Die numerische Berechnung des ACS-Verfahrens mittels der in der Gießerei-Industrie fest etablierten Software FLOW-3D ermöglicht u.a. gezielte Prozessauslegungen und Potenzialanalysen und erfüllt damit einen weiteren Standard für die industrielle Anwendung des Verfahrens.

Für die Eisengießer verfügt das hier vorgestellte Verfahren über ein hohes Potenzial für eine erfolgreiche Umstellung auf die Anorganik, da zum einen vorhandene über eine SPS-Steuerung verfügende Cold-Box-Bestandsanlagen mit Hilfe des ACS-Verfahrens für den Einsatz anorganischer Bindemittel umgerüstet werden können und zum anderen die Taktzeit-Einbußen im Vergleich zu einer Umstellung auf das konventionelle Hot-Box-Verfahren aller Voraussicht nach deutlich geringer ausfallen. Die letzte Komponente sind Sie: Kommen Sie auf uns zu und suchen Sie das Gespräch. Wir freuen uns auf den Austausch, tolle Ideen und gemeinsame Aktivitäten.

Literatur

- [1] Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH (2016): Anorganische Kernbinder-Technologie: Von Deutsch-land in die Welt, Düsseldorf.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021): Strengere Begrenzungen für den Schadstoffausstoß von Industrieanlagen, Pressemitteilung Nr. 141/21 | Luftreinhaltung, 23.06.2021
- [3] Holtzer, M., Kmita, A. (2020): Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology - Sustainable Development: S. 185 ff., Cham (CHE): Springer International Publishing.
- [4] Appelt, C. (2017): Materialeigenschaften und Prozessanforderungen bei der anorganischen Kernfertigung, Giesserei, 104, S. 50-53, Düsseldorf.
- [5] Günther, D., Ramakrishnan, R. (2015): Rapid Prototyping von Sandformen mit anorganischen Bindersystemen (2. Phase), Abschlussbericht, Friedberg / Garching.
- [6] Ramakrishnan, R. (2015): 3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem, Dissertation, Technische Universität München.
- [7] Stroppe, H. (2018): Physik für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften, Leipzig: Carl Hanser Verlag
- [8] Riedel, E. (2020): Simulation of Joule heating-based Core Drying, USA: Flow Science, Inc.
- [9] Riedel, E. (2020): Evolution des Hot-Box-Prozesses – Überblick und numerische Simulation, Giesserei Special, 107, S. 10-17, Düsseldorf.
- [10] Sasse, S., Knechten, J., Brotzki, J., Wallenhorst, C., Gerhards, A. (2011): Entwicklung eines anorganischen Bindersystems für die GJL-Bremsscheibenfertigung, Giesserei, 98, S. 36-40, Düsseldorf.
- [11] Kleinert, B. (2018): Grundsatzversuche zur Realisierbarkeit von Anorganik im Eisen-guss mit Ausblick auf die Verwendung bentonitgebundener Formstoffe, Giesserei, 105, S. 62-66, Düsseldorf.
- [12] Mück, F., Appelt, C. (2018): Anorganische Bindemittelsysteme für das Eisengießen - Aktueller Entwicklungsstand und Ausblick, Giesserei, 105, S. 42-47, Düsseldorf.

Wasserstoff als Kraftstoff

Hydrogen as an Engine Fuel

Prof. Dr.-Ing. **Hermann Rottengruber**, M.Sc. **Dmitrij Wintergoller**,
IMS-OVGU, Magdeburg

Kurzfassung

Die Reduzierung bzw. Vermeidung von CO₂-Emissionen und anderer Schadstoffe im Verkehrssektor ist ein zentrales Thema unserer Gesellschaft und der Umweltpolitik. Um die Einhaltung der Emissionsziele [2] zu gewährleisten, spielen alternative Kraftstoffe eine immer wichtigere Rolle bei der Reduzierung von Abgasemissionen. Eine Möglichkeit, die Emissionen aus dem Verkehrssektor schnell, nachhaltig und kostengünstig zu minimieren, ist ein moderner Verbrennungsmotor, der mit Wasserstoff (H₂) betrieben wird. Wasserstoff, als kohlenstofffreier Kraftstoff, stellt dabei eine sinnvolle Alternative zu herkömmlichen Kraftstoffen dar und kann als Schlüsselement zur Bewältigung der Herausforderungen der Energiewende genutzt werden. Dementsprechend kann mit Wasserstoff die Voraussetzung für die „Zero Emission“-Vision und eine nachhaltige Dekarbonisierung des Verkehrssektors erzielt werden. Die Einblasung des Wasserstoffes in den Verbrennungsmotor ist übereinstimmend mit dem des konventionellen Kraftstoffes. Dabei wird zwischen zwei grundlegenden Verfahren unterschieden. Entweder wird der Kraftstoff in das Saugrohr durch eine Mehrpunkteinspritzung (engl. Multi-Point-Injection MPI) oder direkt in den Brennraum (engl. Direct-Injection DI) eingebracht. Das Verhalten von Wasserstoff als Kraftstoff im Verbrennungsmotor ist dabei im Vergleich zu den konventionellen Kraftstoffen weitaus komplizierter. Aufgrund der leichten Entzündlichkeit von Wasserstoff, werden höhere Anforderungen an das Zündsystem und die Brennraumgestaltung gelegt. Bei der MPI, der äußeren Gemischbildung, können sogenannte Rückzündungen als Verbrennungsanomalien, die durch lokale Hotspot-Bildungen entstehen, eintreten. Diese Rückzündungen müssen verhindert werden. Dabei wirken sich die Rückzündungen durch eine Entzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches zurück in den Ansaugkanal aus. Zusätzlich verdrängt der eingebrachte Wasserstoff aufgrund seiner geringeren Dichte die im Ansaugkrümmer angesaugte Luft. Infolgedessen wird der Liefergrad des Verbrennungsmotors verringert. Darüber hinaus lassen sich mit direkt in den Brennraum eingebrachtem Wasserstoff Leistungsvorteile im Vergleich zu einer ottomotorischen

Verbrennung erzielen. Die spezifische Leistung wird bei einer stöchiometrischen Verbrennung mit kryogenen (tiefkalten) Wasserstoff und einer äußeren Gemischbildung um etwa 15 % und bei der Wasserstoffdirekteinblasung bis zu 17 % erhöht [3, 4]. Dabei wird im Gegensatz zur MPI bei der inneren Gemischbildung, der H₂-Direkteinblasung, der Füllungsverlust vermieden. Um das gesamte Wirkungsgradpotenzial auszuschöpfen, ist es daher vorteilhaft, Wasserstoff direkt in den Brennraum des Motors einzublasen. Dabei ergeben sich Vorteile im Wirkungsgrad bei Fahrzeugen mit hohen Leistungsanforderungen im Vergleich zu einem Antrieb mit Brennstoffzellen oder dem konventionellen Verbrennungsmotor [5].

Abstract

The reduction or complete elimination of CO₂ emissions and other pollutants in the transport sector is a central issue for both industry and environmental policy. To ensure compliance with legislation for emissions [1], alternative fuels are playing an increasingly important role in reducing exhaust emissions. One possible method to rapidly, sustainably and cost-efficiently decimate emissions in the transport sector is a modern internal combustion engine that runs on hydrogen (H₂). Hydrogen, as a carbon-free fuel, represents a meaningful alternative to conventional fuels and can be used as a key element in overcoming the challenges of the energy transition. Furthermore, hydrogen can be expected to make a remarkable contribution to the ideology of zero emission and the sustainable decarbonization of the transport sector. The injection of hydrogen into the combustion engine is the same as with the conventional fuel. A distinction is made between two basic processes. The fuel can be injected either through Multi-Point-Injection (MPI) into the intake, manifold or directly into the combustion chamber (DI: Direct-Injection). The behaviour of hydrogen as a fuel in the combustion engine is far more complicated than that of conventional fuels. Due to the high ignitability of hydrogen, higher demands are placed on the ignition system and the combustion chamber design. In MPI with external mixture formation, backfires can occur as combustion anomalies caused by local hotspot formation. These backfires must be prevented. Backfiring is characterized by the ignition of the fuel-air mixture back into the intake duct. Furthermore, due to its lower density, the injected hydrogen displaces the air in the intake manifold. This is caused by the strong expansion of the hydrogen, after it has been injected into the intake manifold. As a result, the volumetric efficiency of the combustion engine is reduced.

Furthermore, performance advantages can be achieved with hydrogen in comparison to petrol engine combustion. The specific power is increased by 15 % with stoichiometric combustion using cryogenic hydrogen and external mixture formation, and by 17 % with direct injection of hydrogen [2, 3]. In contrast to MPI, the filling loss is avoided with H₂ direct injection and internal

mixture formation. To exploit the full efficiency potential, it is therefore advantageous to inject hydrogen directly into the engine combustion chamber. These results in decisive advantages in efficiency for vehicles with high performance requirements compared to driving with fuel cells or with the conventional combustion engine [4].

1. Wasserstoff als Kraftstoff

Werden die Stoffeigenschaften von Wasserstoff mit den herkömmlichen Kraftstoffen verglichen, ergeben sich einige Vor- und Nachteile für den Betrieb eines Wasserstoffverbrennungsmotors. Im Allgemeinen ist Wasserstoff das chemische Element mit der geringsten Dichte. Diese beträgt bei Umgebungsdruck im flüssigen Zustand $70,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und im gasförmigen Zustand $0,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [3, 6]. Im Vergleich dazu beträgt die Dichte von flüssigem Diesel bei Umgebungsdruck $820 - 845 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [6].

Bei einem Wasserstoffmotor mit Saugrohreinblasung expandiert der Wasserstoff, nach Einblasung, auf das Druckniveau des Saugrohrs. Die mit der Expansion verbundene Volumenausdehnung des Gases bewirkt eine Verdrängung der Frischluft und wirkt sich somit negativ auf die Füllung des Zylinders aus.

Um diesen Effekt der Füllungsverluste zu vermeiden, ist es sinnvoll, den Kraftstoff direkt in den Brennraum einzublasen. Dadurch expandiert der Kraftstoff im Zylinder und bewirkt eine Steigerung der Ladung des Zylinders. Infolgedessen steigen ebenfalls das Drehmoment und die Motorleistung.

Die laminare Flammengeschwindigkeit von Wasserstoff beträgt ca. $230 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ [6]. Wird die laminaren Flammengeschwindigkeiten von H_2 mit herkömmlichen Kraftstoffen verglichen, liegen diese bei einer Geschwindigkeit von ca. $40 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ [6] und sind somit deutlich geringer. Diese Stoffeigenschaft von H_2 führt zu einer sehr schnellen Verbrennung und somit zu einer kurzen Brenndauer. Durch die extrem kurze Brenndauer, wird die Energieumwandlung bei einem nahezu idealen Gleichraumprozess und im Zuge dessen mit einem hohen Prozesswirkungsgrad ermöglicht. Die kurze Brenndauer fördert zusätzlich die Stabilität der Verbrennung, besonders bei einer Abmagerung des Kraftstoff-Luft-Gemisches [3]. Neben dem hohen Prozesswirkungsgrad, hat eine hohe Flammengeschwindigkeit zur Folge, dass höhere Drücke und höhere Temperaturen im Brennraum entstehen. Dies führt zu Nachteilen in den Geräuschemissionen, den Stickoxidbildung und den Wandwärmeverlusten [3]. Mit einer schnellen Verbrennung geht ebenfalls die Zündwilligkeit des Wasserstoffes einher. Dadurch

entstehen weite Zündgrenzen von $0,13 < \lambda < 10$ [3, 6]. Diese ermöglichen einen qualitativ geregelten Betrieb im gesamten Motorkennfeld.

Ein weiterer entscheidender Vorteil bei der Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff, neben den weiten Zündgrenzen, ist dessen Kohlestofffreiheit. Durch das Fehlen von C-Atomen läuft die Verbrennung von H₂ theoretisch ohne Bildung von CO₂, CO und HC ab. In der realen Verbrennung hingegen entstehen geringe Mengen kohlenstoffhaltiger Abgasemissionen. Diese werden dadurch verursacht, dass das Schmiermittel in den Brennraum eintritt und an der Verbrennung teilnimmt. Diese kohlenstoffhaltigen Abgasemissionen liegen, aufgrund der geringen Mengen, an der Nachweisgrenze konventioneller aktuell verwendeter CO₂-Messsysteme und sind dementsprechend unkritisch zu betrachten [7]. Die einzigen relevanten Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Wasserstoff sind die Stickoxide. Besonders hohe Stickoxidemissionen entstehen bei leichten Luftüberschuss, sehr hohen Verbrennungstemperaturen sowie hohen Verweildauern in der sogenannten Post-Flame Zone des Brennraums. Um einen emissionsarmen Betrieb eines Wasserstoffmotors zu gewährleisten, ist es demnach sinnvoll einen Betrieb mit einem Kraftstoff-Luft-Verhältnis von $\lambda > 2,2$ zu wählen [3]. In diesem Bereich liegt die Verbrennungstemperatur aufgrund des höheren Luftüberschusses im überstöchiometrischen Betrieb unter der NO_x-Bildungsschwelle von ca. 2200 K [3].

Ein Grundlegendes Problem bei Wasserstoff Verbrennungsmotoren ist die Anfälligkeit hinsichtlich Verbrennungsanomalien. Die bekannteste Verbrennungsanomalie ist das Klopfen. Ob ein Kraftstoff anfällig gegenüber Klopfen ist, wird über die sogenannte Methanzahl beschrieben. Methan weist per Definition eine Methanzahl (MZ) von 100 auf und ist dementsprechend Klopfest. Wasserstoff hingegen wird mit der Methanzahl 0 beschrieben. Grund hierfür liegt in der äußerst geringen minimalen Zündenergie von 0,017 mJ [3].

Aufgrund der sehr geringen Zündenergie von H₂, steigt dementsprechend auch die Gefahr von Rück- bzw. Glühzündungen. Rückzündungen können bei Motoren mit äußerer Gemischbildung auftreten. Dabei entzündet sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch während geöffneter Einlassventile an heißen Oberflächen (Hotspots), wodurch eine Rückzündung in das Saugrohr entstehen kann. Die Rückzündung kann durch eine Direkteinblasung von Wasserstoff verhindert werden. Lediglich die Verbrennungsanomalie der Glühzündung bleibt weiterhin bestehen. Bei einer Glühzündung entzündet sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch an Hotspots im Brennraum. Dies geschieht unabhängig von dem planmäßig eingestellten Zündzeitpunkt. Die Glühzündung wird hierbei in klopfende und nichtklopfende Glühzündung unterschieden. Bei der klopfenden Glühzündung entzündet sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch nach und bei der nichtklopfenden Glühzündung vor dem regulären Zündzeitpunkt. Die Folge

von einer Glühzündung sind ein schneller Druckanstieg und hohe Temperaturen. Dies kann zu einer mechanischen Beschädigung und Überhitzung des Motors führen. Daher muss bei der Brennraumauslegung auf mögliche Hotspots als Zündquellen geachtet werden und demzufolge vermieden werden.

Neben der geringen Zündenergie, besitzt Wasserstoff eine, im Gegensatz zum Dieselkraftstoff, hohe Selbstzündungstemperatur von 585 °C (Diesel: 250 °C). Daher kann ein stabiler selbstgezündeter Wasserstoffmotor nur durch ein hohes Verdichtungsverhältnis und teilweise zusätzlicher Vorwärmung der Ansaugluft erreicht werden [3].

Der thermische Wirkungsgrad η_{th} ist von dem Verdichtungsverhältnis ε und dem Isentropenexponenten κ abhängig.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (1)$$

$$\text{mit } \kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (2)$$

Dabei ist der Isentropenexponent eine temperatur- und druckabhängige Größe. Diese beschreibt das dimensionslose Verhältnis der Wärmekapazitäten von Gasen bei konstantem Druck (isobar, c_p) und bei konstantem Volumen (isochor, c_v). Der Isentropenexponent beträgt bei Umgebungsbedingungen bei einem Wasserstoff-Luft-Gemisch $\kappa \approx 1,4$. Dementsprechend ist er höher als bei einem Benzin-Luft-Gemisch. Dieser beträgt bei Umgebungsbedingungen und einem stöchiometrischen Betrieb einen Isentropenexponent von $\kappa \approx 1,35$. Ein höherer Isentropenexponent führt zu einem höheren thermodynamischen Wirkungsgrad, siehe Bild 1. Folglich weist Wasserstoff aufgrund seines Isentropenexponenten Vorteile im thermodynamischen Wirkungsgrad auf.

Zu beachten ist, dass bei einem Magerbetrieb Luftüberschuss im Brennraum herrscht. Überschüssige Luft kann, ohne dass sie an der Verbrennung teilnimmt, Wärme aufnehmen. Dadurch wird die Prozesstemperatur reduziert. Durch die Abnahme der Verbrennungstemperatur steigt der Isentropenexponent κ an. Schlussfolgernd wird im Magerbetrieb der thermodynamische Wirkungsgrad erhöht.

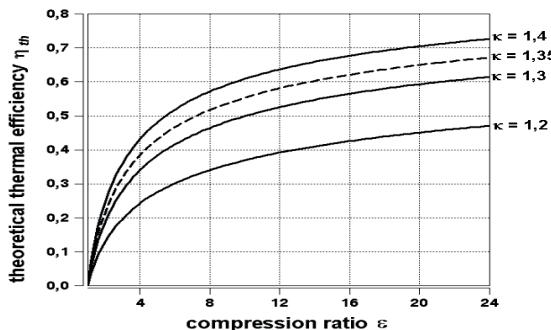


Bild 1: Thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis und dem Isentropenexponenten

2. Motorkonzepte

Wie zuvor erwähnt, kann Wasserstoff als Kraftstoff, wie bei konventionellen Kraftstoffen, sowohl durch das Saugrohr als auch direkt in den Brennraum eingeblasen werden. Je nach Einblasvariante werden Vorteile in der spezifischen Leistung erzielt. Bei einem H₂-PFI Motor mit äußerer Gemischbildung wird die spezifische Leistung um 18 % verringert, siehe Bild 2. Wird hingegen Wasserstoff in einem kryogenen (tiefkalten) Zustand in das Saugrohr eingeblasen, erhöht sich die spezifische Leistung um 15 % [3]. Bei einer inneren Gemischbildung mittels H₂-DI Einblasung ist die spezifische Leistung um 17 % höher als bei einer konventionellen Otto-Einspritzung. Neben der Saugrohreinblasung und der Direkteinblasung von H₂, kann ein Wasserstoffverbrennungsmotor ebenfalls mit einem Turbolader ausgestattet werden. Dadurch werden noch höhere Leistungsspitzen erreicht. Dabei kann die spezifische Leistung auf über 100 % Steigerung (Bild 2) erhöht werden. Ähnlich wie beim Otto- oder Diesel-Verfahren können verschiedene Aufladesysteme verwendet werden. Neben den verschiedenen Aufladekonzepten, kann mit einem VTG Turbolader im gesamten Drehzahlbereich signifikante Vorteile erzielt werden [8]. Wie in Kapitel 1 erwähnt, wird eine DI-Einblasung aufgrund von geringeren Verbrennungsanomalien und einem höheren Wirkungsgrad [9] bevorzugt.

	Gasoline PFI	H ₂ -PFI	H ₂ -DI	Charged H ₂ -DI
Conditions:				
$\lambda = 1$				
$V_H = 1000 \text{ ccm}$				
$\eta = \text{const.}$				
$\eta_{volum} = \text{const.} = 1$				
$T = \text{const.}$				
Fuel Volume [mL]	17	296	420	420
Air Volume [mL]	983	704	1000	1000
Mixture Calorific Value [MJ/m ³]	3.9	3.2	4.5	up to 7.8 @ $\lambda = 1.8$
Power output [%] (compared to gasoline n/a)	100	82	117	up to 200

Bild 2: Leistungssteigerung verschiedener Motorkonzepte

Bei einem stöchiometrischen Betrieb des Motors mit einer Wasserstoffsaugrohreinblasung mit Fremdzündung, kann es wie bereits erwähnt zu Rückzündungen kommen. Wird der Wasserstoff direkt in den Brennraum eingeblasen, entsteht bei einer stöchiometrischen Verbrennung, aufgrund der höheren Temperaturen und Drücken im Brennraum, eine noch höhere Klopfgefahr. Wird ein Turbolader ergänzt werden noch höhere Temperaturen im Brennraum erzeugt. Um den hohen Temperaturen entgegen zu wirken, kann das Kraftstoff-Luft-Verhältnis abgemagert werden. Bei einem Magerbetrieb mit $\lambda \approx 2$ und einer Saugrohreinblasung wird ein geringerer effektiver Mitteldruck erreicht. Dahingegen kann durch eine Direkteinblasung mit Fremdzündung ein höherer effektiver Mitteldruck erreicht werden. Wird zusätzlich noch Aufgeladen, dann kann der effektive Mitteldruck und somit die Leistung weiterhin erhöht werden. Mit einer Abgasrückführung kann zusätzlich die Brennraumtemperatur reduziert werden.

Neben der fremdgezündeten Direkteinblasung mit Hilfe einer Zündkerze, kann die Zündung auch mittels Selbstzündung eingeleitet werden. Die Zündung wird hierbei durch die Kompression und der damit folgenden Erhöhung der Inneren Energie realisiert. Diese Variante der Zündung trägt einige Vor- und Nachteile gegenüber der Fremdzündung mit sich. Generell ist ein selbstgezündeter Wasserstoffverbrennungsmotor mit kurzen Brenndauern und kurzen Zündverzögerungen möglich. Dabei kann ein höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen Zündkonzepten erreicht werden. Grund hierfür ist die Verringerung der Kompressionsverlusten. Ebenfalls kann eine hohe Leistungsdichte unter klopfefreien Bedingungen realisiert werden. Zu den Nachteilen gehört eine hohe thermische Belastung, die durch die kurze Verbrennungsdauer zu höheren Spitzentemperaturen führt. Des Weiteren

entstehen bei einer Selbstzündung sehr starke zyklische Schwankungen, die durch das unterschiedliche zeitliche zünden des Kraftstoff-Luft-Gemisches entstehen.

Ein weiterer Nachteil sind die hohen NO_x-Emissionen. Grund hierfür ist zum einen die höhere Spitzentemperatur und zum anderen die Verteilung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum. Bei der Selbstzündung wird der Kraftstoff kurz vor dem oberen Totpunkt (Pkw 5° bis 15 °KW, Nkw 6° bis 12 °KW v. OT [10]) eingeblasen. Somit entsteht ein inhomogenes Gemisch aufgrund nicht vorhandener Zeit für die Durchmischung mit der Luft. Es entsteht zwar global ein mageres Kraftstoff-Luft-Verhältnis, lokal hingegen wird ein fettes Gemisch gebildet. Die Folge ist, dass mit einer Diffusionsflamme in der „Post-Flame Zone“ die NO_x-Emissionen ansteigen. Die Voraussetzung für eine Einblasung kurz vor OT sind hohe Einblasdrücke von ca. 300 bar, die momentan in der Forschung und Entwicklung von Wasserstoffinjektoren sind. Bei der Direkteinblasung mit Fremdzündung wird der Kraftstoff früher in den Brennraum eingeblasen. Dadurch werden geringere Einblasdrücke benötigt und ein homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch kann sich bilden. Das globale und lokale Lambda ist dementsprechend mager und es entstehen weniger NO_x-Emissionen. Außerdem kann durch eine Anpassung des Einblasbeginns je nach Last die NO_x-Emissionen weiterhin gesenkt werden, siehe Bild 3 [3]. Schlussfolgernd stellt aktuell ein Magerbetrieb mit Fremdzündung das Optimum dar.

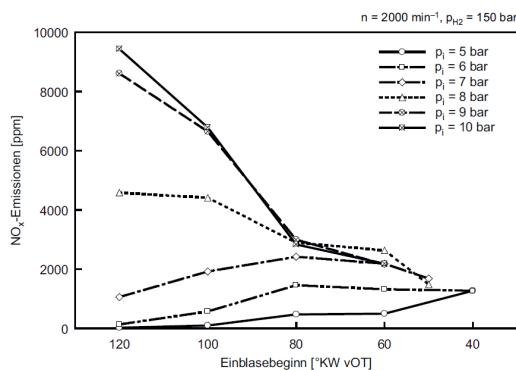


Bild 3: Anpassung des Einblasbeginns auf das NO_x-Emissionsverhaltens bei einer H₂-Direkteinblasung [3]

3. Bauteilanforderungen

Bei den Bauteilanforderungen von Wasserstoffmotoren müssen die Kraftstoffberührenden Komponenten für die spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff angepasst werden. Die spezifischen Eigenschaften sind unter anderem die Wasserstoffversprödung, die geringe Schmierfähigkeit und das hohe Diffusionsvermögen. Dabei kann Wasserstoff in der atomaren Form in das Materialgefüge eindringen und durch die meisten Metalle diffundieren. Ebenfalls dissoziert Wasserstoff an der Materialoberfläche und führt zu Verformungen im Material, die durch lokale Spannungen eine Materialversprödung verursachen. Geeignete Werkstoffe für einen Wasserstoffverbrennungsmotor bzw. für die Kraftstoffberührenden Komponenten sind austenitische Stähle, Aluminiumlegierungen, Nickellegierungen, bestimmte Kunststoffe oder Keramiken [11]. Aufgrund der geringen Schmierfähigkeit werden ebenfalls geeignete Werkstoffe und Konstruktionen für die Wasserstoffinjektoren und Ventile benötigt. Dementsprechend müssen die Bauteilanforderungen von PFI- oder DI-Wasserstoffinjektoren, als auch von den Ventilen auf Eigenschmierung angepasst werden. Bei den Ventilen kann aufgrund der fehlenden Schmierung, den höheren chemischen und thermischen Belastungen gepanzerte Ventilsitze verwendet werden. Neben den gepanzerten Ventilsitzen kann eine modifizierte Ventilschaftführung genutzt werden, um eine Wasserstoffdiffusion durch die Schmierung der Ventilführung zu minimieren. Des Weiteren kann durch eine Anpassung des Ventilschaftes die Wärmebelastung am Ventilkopf reduziert werden. Besonders am Auslassventil ist eine hohe thermische Belastung vorzufinden. Für hohe Temperaturansprüche werden die Ventile hohl gebohrt und mit Natrium gefüllt. Das im Ventilschaft befindliche Natrium transportiert die Wärme vom Ventilkopf in Richtung Ventilführung. Dadurch wird die Temperatur am Ventilkopf signifikant reduziert und die Ventilmaterialien können über ihre normal zulässige Temperaturgrenzen hinaus betrieben werden, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** [1]. Ergänzend müssen die Ventilsteuzeiten an den Betrieb mit Wasserstoff als Kraftstoff angepasst werden, um einen optimalen Ladungswechsel und somit eine optimale Füllung zu realisieren.

Neben den Ventilen muss ebenfalls die Zündkerze angepasst werden. Dabei wird eine Zündkerze mit einer niederen Wärmewert Kennzahl („Kalte Kerze“) benötigt. Grund hierfür ist die kleine wärmeaufnehmende Fläche. Diese nimmt durch die kleine Isolatorfußfläche wenig Wärme auf. Zusätzlich findet eine schnelle Wärmeableitung aufgrund eines kurzen Wärmeleitungsweges statt. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist der hohe Widerstand gegen Glühzündung und Heißkorrosion. Darüber hinaus kann bei der Anpassung der Zündkerze mittels einer Sperrdiode verhindert werden, dass im System eine Restladung verbleibt. Eine Restladung kann dabei zu einer Frühzündung führen. Weitere Anforderungen, um gegen die

höheren Temperaturen im Brennraum entgegenzuwirken, sind zum einen gekühlte Kolbenringe und zum anderen eine verbesserte Öl-Kühlung.

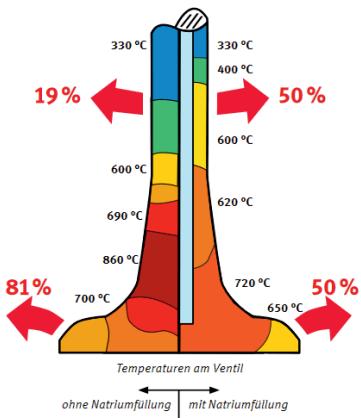


Bild 4: Bauteiltemperaturen am Ventil mit/ohne Natriumfüllung [1]

Dadurch kann die Wärmeabfuhr mit Hilfe von Öl als Wärmeträger optimiert werden. Neben den gekühlten Kolbenringen, müssen diese ebenso auf die fehlende Schmierung durch das Fehlen von Kohlenstoff im Abgas und im Brennstoff angepasst werden. Infolgedessen kann die Balligkeit und der Zuschliff an den Kolbenringen und am Kolben selbst (Kolbenfresser) reduziert oder sogar verhindert werden. Eine weitere Bauteilanforderung für Wasserstoffverbrennungsmotoren ist ein H₂-Druckminderer. Grund hierfür ist, dass Wasserstoff eine sehr geringe Energiedichte unter Normalbedingungen aufweist. Folglich wird Wasserstoff auf 300 – 700 bar komprimiert, um die Energiedichte und somit die Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen. Anschließend wird der komprimierte Wasserstoff zwischen Drucktank und Einbllassystem auf den Einblasdruck des Injektors mittels eines H₂-Druckminderers geregelt. Im Hinblick auf einen aufgeladenen Wasserstoffverbrennungsmotor, muss dieser ebenfalls an den Wasserstoffbetrieb angepasst werden. Dabei nutzt der Abgasturbolader die Abgasenthalpie, um mit Hilfe der Turbine und mittels Verdichter den Ladedruck und dementsprechend den Wirkungsgrad zu erhöhen. Der Abgasenthalpiestrom ist abhängig vom Massenstrom, dem Druck und der Temperatur im Abgas. Aufgrund der geringeren Dichte und der schnellen Verbrennung von Wasserstoff ist der Massenstrom und die Temperatur im Abgas dementsprechend gering. Folglich wird eine

geringere Abgasenthalpie bei einer Wasserstoffverbrennung gegenüber konventionellen Kraftstoffen erzielt, siehe Bild 5.

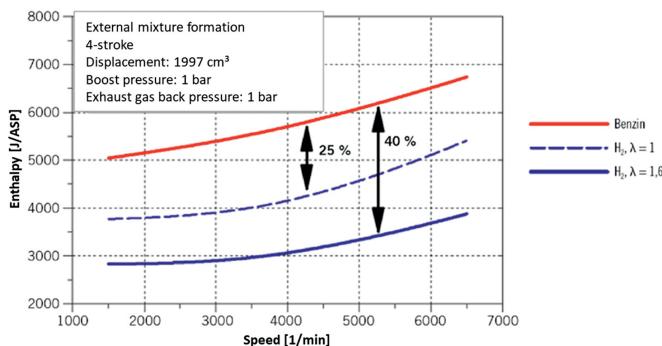


Bild 5: Vergleich der Abgasenthalpie von einer Benzin-, stöchiometrischen und mageren H₂-Verbrennung [12]

4. Emissionsreduzierung / Dekarbonisierung

Für einen nahezu emissionsfreien Wasserstoffverbrennungsmotor muss ebenfalls die gesamte energetische Wirkungskette betrachtet werden. Somit wird in der „Well-to-Wheel“ Analysemethode auch die Gewinnung und Bereitstellung der Antriebsenergie analysiert. Wasserstoff als Kraftstoff wird in sechs Arten der Herstellung unterteilt. Diese gliedern sich in sechs Farben („Colors of H₂“). Die Bekanntesten Arten der Herstellung ist der graue, blauer und der grüne Wasserstoff. Bei dem grauen Wasserstoff wird dieser aus fossilen Brennstoffen wie Kohle oder Erdgas unter Freisetzung von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid gewonnen. Das bekannteste Verfahren ist die Dampf-Methan-Reformierung. Blauer Wasserstoff wird wie der graue Wasserstoff hergestellt. Einziger Unterschied ist, dass die bei der Herstellung entstandenen CO₂-Emissionen zur Wiederverwendung in eine unterirdische oder unterseeische Speicherung abgetrennt werden. Lediglich bei der Herstellung des grünen Wasserstoffs entstehen keine CO₂-Emissionen. Voraussetzung für die Erzeugung von grünem Wasserstoff ist die Bereitstellung von regenerativen Energiequellen. Folglich wird mit Hilfe einer Elektrolyse, aus grünem Strom und Wasser, Wasserstoff hergestellt. In Bild 6 ist eine Schematische Darstellung der genannten Wasserstoff-Arten aufgezeigt.

Im Verbrennungsmotor entstehen bei der Verbrennung von Wasserstoff theoretisch keine kohlestoffhaltigen Emissionen. Einzig relevante Emissionen sind die Stickoxid-Emissionen die

aufgrund der höheren Brennraumtemperaturen entstehen. Im realen Motorbetrieb hingegen entsteht durch die Verbrennung von Schmierölen zusätzlich Partikel und kohlenstoffhaltige Emissionen. Kohlenstoff-Emissionen können dabei auf verschiedenen Wegen im Verbrennungsmotor erzeugt werden.

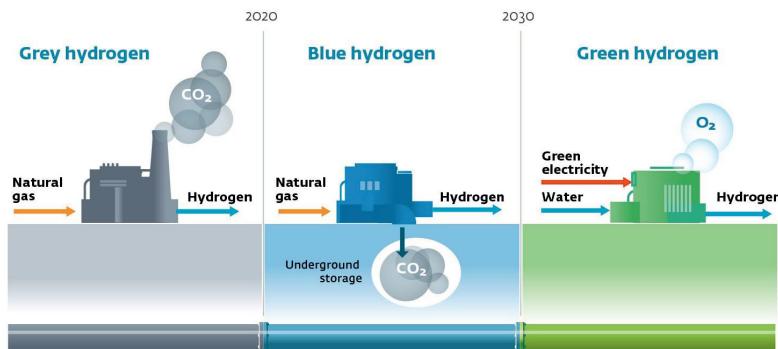


Bild 6: Herstellung und Emissionen von grauen, blauen und grünem Wasserstoff [13]

Einen wesentlichen Anteil der Emissionen werden durch die sogenannten „Blow-by-Gase“ erzeugt. Diese treten während des Betriebes des Verbrennungsmotors auf und entstehen durch das Eindringen von Verbrennungsgasen in das Kurbelgehäuse. Die Verbrennungsgase entweichen aus der Brennkammer aufgrund von Undichtigkeiten am Kolben und an den Kolbenringen in den Kurbelraum. Im Kurbelraum vermischt sich das Blow-by-Gas mit dem vorbefindlichen Ölnebel. Mit einer geschlossenen Kurbelgehäuseentlüftung wird das Blow-by-Gas aus dem Ölnebel gefiltert und anschließend in die Ansaugluft zurückgeführt. Die Herausforderung der Kurbelgehäuseentlüftung ist, die Filterung von mikroskopisch kleinen Öltropfen aus der Mischung vom Blow-by-Gas und Ölnebel. Demzufolge gelangen geringe Mengen von den Mikro-Öltropfen in die Ansaugluft und erzeugen anschließend bei der Verbrennung kohlenstoffhaltige Emissionen. Durch eine Verbesserung der Kurbelgehäuseentlüftung kann mit Hilfe einer besseren Filterung der Mikro-Öltropfen die kohlenstoffhaltigen Emissionen reduziert werden. Zusätzlich kann Öl aus der Ventilschaftabdichtung über den Zylinderkopf in den Brennraum eintreten. Die Folge daraus sind ebenfalls höhere kohlenstoffhaltige Emissionen. Eine weitere Entstehungsquelle von kohlenstoffhaltigen Emissionen ist der Ölfilm an der Zylinderwand. Der Ölfilm verbrennt teilweise und stößt dementsprechend CO₂-Emissionen aus. Bei bivalenten Fahrzeugen

(Benzin und H₂) ist neben dem konventionellen Kraftstoff eine weitere Emissionsquelle die Benzintankentlüftung. Dabei wird der im Tank verdampfte Benzin über ein Aktivkohlefilter in den Ansaugkanal transportiert. Durch das Einbringen von konventionellem Kraftstoff in den Ansaugkanal, muss bei einem bivalenten Verbrennungsmotor mit Benzin die Lambdaregelung trotz dessen funktionieren und auf einen stöchiometrischen Betrieb regeln. Bedeutsamer ist die Benzintankentlüftung als Emissionsquelle bei bivalent ausgelegten Fahrzeugen, wenn bei bestimmten Betriebspunkten ausschließlich Wasserstoff zum Betrieb verwendet wird. Bei diesen Punkten entstehen aufgrund der Benzintankentlüftung trotz Wasserstoffbetrieb CO₂-Emissionen. Wird ein Wasserstoffmotor verwendet, entfällt die Emissionsquelle der Benzintankentlüftung.

Um den Motor nahezu Emissionsfrei zu betreiben, kann aschearmes Schmieröl (engl.: low-ash-oil) verwendet werden. Dadurch kann die Erzeugung von kohlestoffhaltigen Emissionen und Partikel Emissionen reduziert werden. Optional kann ebenfalls ein motornaher Oxidationskatalysator für eine sichere Erfüllung der Grenzwerte (EU7 und SULEV) eingesetzt werden. Des Weiteren kann ein SCR-Katalysator (engl.: selective catalytic reduction) zur Reduzierung der Stickoxid-Emissionen verwendet werden. Für die Reaktionen im SCR-Katalysator wird Ammoniak (NH₃) benötigt. Dieses wird meist durch die Einbringung von AdBlue (CH₄N₂O) erzeugt. Anschließend wird zusätzlich noch ein Ammoniak-Sperr-Katalysator (ASC) benötigt, damit überschüssiges giftiges NH₃ nicht in die Umwelt gelangen kann. In der Forschung wird derzeit am sogenannten H₂-NSCR-Verfahren gearbeitet, welches ohne Ammoniak auskommt, denn hier sorgt eine direkte Einbringung von Wasserstoff vor dem Katalysator für die Atmosphäre in welcher die katalytische Reduktion von Stickoxiden im Abgas stattfinden kann. In Bild 7 sind die NO_x-Rohemissionen in Abhängigkeit des Verbrennungsluftverhältnisses λ angezeigt. Zusätzlich sind die beiden genannten Abgasnachbehandlungsverfahren SCR und NSCR symbolisch abgebildet.

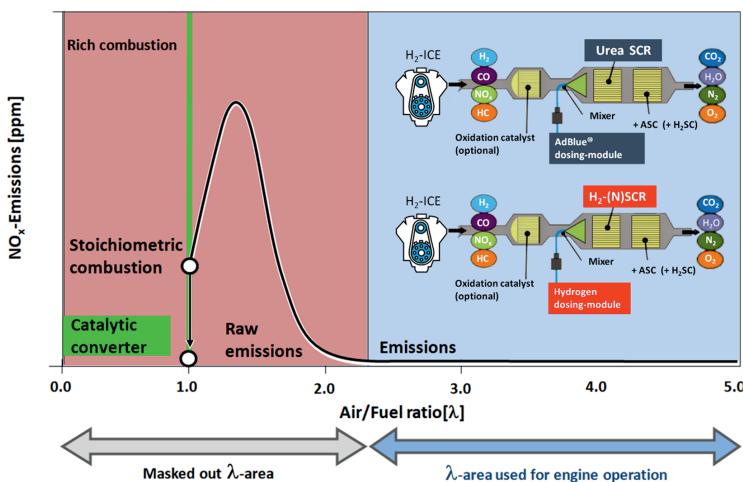


Bild 7: NO_x-Rohemissionen in Abhängigkeit vom Kraftstoff-Luft-Verhältnis und die Abgasnachbehandlungsvarianten

References

- [1] MS Motorservice International GmbH, "Ventile - Perfektion im Detail," https://www.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/Ventile-Perfektion-im-Detail_52839.pdf, July 19, 2021.
- [2] "VERORDNUNG (EU) 2019/631 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011," in: *Amtsblatt der Europäischen Union*.
- [3] Klell, "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik," Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-20446-4, 2018.
- [4] Eichlseder, H., "Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors: 11. Tagung ; 20. und 21. September 2007," VKM-THD Mitteilungen, 89, Buch, Techn. Univ, Graz, ISBN 9783902465849, 2007.
- [5] Zeitschrift für Zukunftsforschung, R., "Editorial," *Zeitschrift für Zukunftsforschung* 2014(2), 2014.
- [6] van Basshuysen, R., "Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung," Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-12214-0, 2017.
- [7] Rottengruber, H., "Untersuchung der Stickoxidbildung an einem Wasserstoff-Dieselmotor," Energietechnik, Hieronymus, München, ISBN 978-3897910478, 1999.
- [8] S. Zeilinga, K. Klepatz, Prof. Dr. H. Rottengruber, and D. T. Koch (eds.), "Studie zu Aufladekonzepten für Wasserstoffverbrennungsmotoren," vol. 23, Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2018.
- [9] Klepatz, K., Rottengruber, H., Zeilinga, S., Koch, D. et al., "Loss Analysis of a Direct-Injection Hydrogen Combustion Engine," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, SEP. 17, 2018, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2018.
- [10] Reif, K. (ed.), "Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik," Bosch Fachinformation Automobil, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-12635-3, 2017.
- [11] San Marchi, C. and Somerday, B.P., "Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials," SANDIA REPORT, https://www.sandia.gov/matlsTechRef/chapters/SAND2012_7321.pdf, June 30, 2021.
- [12] Hepp, C., "Modification and Calibration of a Turbocharged SI Engine for Bifuel Hydrogen/Gasoline Operation," Diplomarbeit, Graz, 2009.

- [13] Schutte, R., "Gasunie in a transitioning energy market: The Netherlands -Frontrunners for clean energy supply in Europe," Berlin,
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Veranstaltungen/PtG-Dialogforum_III/Praesentationen/8_Rene_Schutte_N.V._Nederlandse_Gasunie.pdf.

Neues Thermomanagement – Herausforderung an die Gussteilgestaltung phasenwechselgekühlter Verbrennungsmotoren

Advanced Thermal Management – The challenge for casted components for phase-change cooled internal combustion engines

M. Krause, T. Arnold, U. Hofmann, Dr. J. Böhme, IAV GmbH, Stollberg

Kurzfassung

Mit Inkrafttreten der Verordnung (EU) 2017/1151 wurde die Einhaltung der in (EG) 715/2007 definierten Grenzwerte für Schadstoffe zum 01.01.2021 für alle innerhalb der Europäischen Union neu zugelassenen PKW und leichten Nutzfahrzeuge unter RDE-Prüfbedingungen relevant. Der Realverbrauch aller Energieträger (aller Kraftstoffarten und elektrischer Energie) eines Fahrzeuges müssen ab 01.01.2021 erfasst und dokumentiert werden. Sie bilden nach einer Monitoring- Phase ab dem Jahr 2030 die Grundlage für die Emissionszertifizierung eines Fahrzeugs. Demzufolge kommt der Wirkungsgradsteigerung der Verbrennungskraftmaschine (VKM), als Bestandteil hybrider Antriebsstränge, eine große Bedeutung zur Senkung des Realverbrauches zu.

Die RDE-Prüfbedingungen können den kompletten Kennfeldbereich der VKM umfassen, wodurch ein Motorbetrieb mit stöchiometrischen Verbrennungsluftverhältnis ($\lambda = 1$) im gesamten Motorkennfeld erforderlich ist, um eine vollständige Konvertierung am 3-Wege-Katalysator sicherzustellen und den spezifischen Kraftstoffverbrauch auch im Bereich der Nennleistung zu senken. Im Bereich hoher spezifischer Leistung muss zudem der thermische Bauteilschutz (u.a. Zylinderkopf und Abgasturbolader (ATL)) neu und demnach ohne die Kühlwirkung der Kraftstoffanreicherung abgesichert werden.

IAV hat dafür ein neues gesamtheitliches Thermomanagement- System entwickelt, welches auf dem Phasenwechsel des Kühlmediums beruht – dem sog. Phase Change Cooling (PCC). In diesem Beitrag wird dieses Thermomanagement- System in den Rahmen alternativer verbrauchssenkender Maßnahmen eingeordnet. Weiterhin wird das PCC- System vorgestellt und

die Auswirkungen auf das Gussteildesign, im Speziellen auf die Gestaltung der Kühlmantelkerne im Zylinderkopf, beschrieben und erläutert.

Zusammenfassend wird ein Überblick über aktuelle Entwicklungsprojekte, technischen Stand sowie die Weiterentwicklungspotentiale von PCC gegeben.

Abstract

With the new Regulation (EU) 2017/1151, compliance with the limit values for pollutants defined in (EC) 715/2007 will be relevant for all newly registered cars and light commercial vehicles under the RDE test conditions on 01.01.2021 within the European Union. The real consumption of all energy sources (all types of fuel and electrical energy) of a vehicle must be recorded and documented from 01.01.2021. After a monitoring phase from the year 2030 onwards, they form the basis for the emission certification of a vehicle. Consequently, the increase in efficiency of the internal combustion engine (ICE), as a component of hybrid drive trains, is of great importance for reducing real consumption.

The RDE test conditions can cover the complete engine map, which requires engine operation with stoichiometric air/fuel ratio ($\lambda = 1$) in the entire engine map to ensure complete conversion on the three-way catalyst and reduce the specific fuel consumption also in the range of the engine power rating. In the area of high specific engine power, the thermal component protection (including cylinder head and turbocharger) must also be new and therefore without the cooling effect of fuel enrichment.

IAV has developed a new, holistic thermal management system based on phase change of the cooling medium - Phase Change Cooling (PCC).

In this article, this thermal management system is placed within the framework of alternative measures to reduce consumption. Furthermore, the PCC system is presented and the effects on the casting design, in particular on the design of the cooling jacket cores in the cylinder head, are described and explained.

In summary, an overview of current development projects, technical status and the further development potential of PCC system is given.

1. Einleitung

Die Erfüllung der Klimaziele 2050 und die damit verbundene CO₂-Reduzierung ist die entscheidende Triebfeder heutiger Antriebsstrangentwicklung. Es wurden bereits umfängliche Szenarien für die zukünftige Zusammensetzung von Fahrzeugflotten simuliert und die nötigen Anteile der unterschiedlichen Fahrzeugantriebe aufgezeigt [1], um die eingeforderten (Etappen-) Ziele sicherzustellen. Aufgrund vielfältiger marktspezifischer Voraussetzungen und volatilen politischen aber auch gesellschaftlichen Rahmenbedingungen ist jedoch eine sichere Prognose über die Zusammensetzung der Flottenantriebssysteme aktuell nur eingeschränkt möglich. Aktuelle Kundenumfragen [2], Publikationen [3] und Studien [4], [5] zeigen eine Technologieoffenheit auf bzw. einen notwendigen Mix bezüglich der Antriebsarten für batterieelektrische-(BEV), hybridelektrische- (HEV) und Plug-in-Hybride (PHEV) Fahrzeuge, sowie gegenüber den Energieträgern H₂, e-Fuels, CNG/LPG und übergangsweise den konventionellen Kraftstoffen, je nach Kundenanforderung, Anwendungsgebiet und Region.

Die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen und fiskalischen Maßnahmen [6] begünstigen die Antriebsart des BEV (entscheidendes Faktum ist die lokale Emissionsfreiheit), was mit dem Hintergrund eines schnellen und signifikanten Markteintrittes und der damit verbundenen CO₂-Reduktion in der Fahrzeugflotte auch notwendig ist, um die vorgegebenen CO₂-Emissionsziele ($V_{fleet} = 95 \text{ g CO}_2/\text{km}$) für die jeweilige herstellerspezifische Flotte sicherzustellen bzw. fällige Strafzahlungen zu vermeiden. Zugleich existieren aktuell noch diverse technische Herausforderungen (z.B. Reichweite, effiziente Kühlung/ Heizung bei allen Umgebungsbedingungen, Rohstoffeffizienz) sowie eine eingeschränkte Kundenakzeptanz (u.a. Anschaffungspreis, Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten in urbanen Wohngebieten, Alltagstauglichkeit im außerstädtischen Bereich, einheitliche Abrechnung, Mobilität in Schwellenländern). Zusätzlich ist zukünftig eine CO₂-Bemessung weg von der Tank-to-Wheel hin zur Well-to-Well oder vollständig zur Gradel-to-Grave-Betrachtung angebracht, um nicht ausschließlich die Betriebsemissionen, sondern auch die realen Produktemissionen miteinzuschließen, wodurch folgerichtig alle vorhandenen Antriebsarten wieder neu zu bewerten sind.

Die Bewertung hinsichtlich der Produktlebensemissionen in Abhängigkeit von der Kilometerfahrleistung und regulatorischen Eingriffen ist ebenfalls vielfältig durchgeführt worden siehe [7], [8], [9]. Im Ergebnis kommt man zur technisch fundierten Ableitung, dass ein im Wirkungsgrad optimierter Verbrennungsmotor in einem hybriden Antriebsstrang eine sinnvolle Ergänzung zum BEV in einem Übergangszeitraum hin zur CO₂-freien Mobilität in 2050 darstellt. Im Anwendungsgebiet der Nutzfahrzeuge (speziell Fernverkehr) wird der Verbrennungsmotor

noch wesentlich länger eine tragende Säule im Antriebsmix darstellen, auch durch die zukünftige Verwendung alternativer bzw. synthetischer Kraftstoffe (z.B. H₂ oder eFuels) [10]. Als wesentliches Markteintrittskriterium im Fernverkehr ist hier Reichweite zu nennen.

IAV geht davon aus, dass noch mindestens eine neue Generation von Verbrennungsmotoren mit deutlich verbessertem Wirkungsgrad entwickelt werden wird.

2. Welche Technologien und Entwicklungsrichtungen werden aktuell für die zukünftigen Verbrennungsmotor-Konzepte vorangetrieben?

Im Nachfolgenden wird auf die Entwicklungen eingegangen, welche einen unmittelbaren Zusammenhang bzw. eine Wechselwirkung zum System der Phasenwechselkühlung aufweisen.

2.1. Optimierung Wirkungsgrad

Die effiziente Kombination von Verbrennungsmotor, E-Maschine (EM) und Akkumulator zum hybriden Antriebsstrang ermöglicht neben der gewichts- und kostengünstigen Abstufung der genannten Antriebsstrangkomponenten auch die Optimierung von deren Betriebsbereichen. Hohes Low-End-Torque und Betriebspunkte mit niedrigen Lasten können allein durch die EM abgedeckt werden, wodurch das Wirkungsgradoptimum des Verbrennungsmotors bei seiner Konzeption zu höheren Lasten verschoben und folglich die Reichweite des Gesamtsystems effizient sichergestellt werden kann. Eine kompromissbehaftete Auslegung einzelner Antriebsstrangkomponenten ist demnach nicht mehr notwendig. Jedoch kommt bei der hybriden Anwendung der VKM dem Thermomanagement und somit der gezielten Temperierung des Verbrennungsmotors eine erhöhte Bedeutung zu.

2.2. Optimierung Brennverfahren - Vorkammerzündung

Um den Wirkungsgrad von Ottomotoren weiter zu steigern, wird u.a. die passive und aktive Vorkammerzündung bei IAV intensiv weiterentwickelt. Durch die signifikant erhöhte Zündenergie können Verbrennungsmotoren mit hohen Verdünnungsraten sicher betrieben werden. Dies führt in niedrigen bis mittleren Kennfeldbereichen zu spürbaren Wirkungsgradvorteilen. Der deutlich geringere Zündverzug durch die Vorkammerzündung sowie das schnellere Durchbrennen des Gemisches reduziert die Klopfneigung, wodurch bei der Motorauslegung eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses umgesetzt werden kann. Einem gestiegenen Kühlleistungsbedarf des Motors und der Präzessionskühlung der Vorkammerkomponenten kann mit dem Einsatz der Phasenwechselkühlung vorteilhaft Rechnung getragen werden.

2.3. Reibungsreduzierung

Neben den klassischen Ansätzen zur Reibungsreduzierung wie der Optimierung des Kurbel-, sowie des Ventil- und Steuertriebes, der Optimierung des Verbrennungsmotors für den Einsatz niedrigviskoser Motorenöle kommt der Reduzierung der Antriebsleistung von peripheren Verbrauchern eine hohe Bedeutung zu. Das PCC-System kann auch hier einen signifikanten Beitrag leisten, da die Antriebsleistung der Kühlmittelpumpe deutlich reduziert werden kann. Darauf wird im Beitrag später noch detailliert eingegangen.

2.4. Thermomanagement

Das Thermomanagement des Verbrennungsmotors hat einen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Emissionen des Antriebstranges. Als aktueller Stand der Technik gilt ein Thermomanagement mittels flüssigkeitsbasierter Konvektionskühlung. Auch wenn in den letzten Jahren viel Entwicklungsarbeit in Thermomanagementmodulen (variable Kühlkreise und bedarfsgerechter Volumenstrom) investiert wurde, so können diese die physikalischen Grenzen der Konvektionskühlung, d.h. maximaler Energieeintrag, nicht überschreiten. Um den Bau- teilschutz in modernen Verbrennungsmotoren mit hohen spezifischen Leistungen abzusichern, erfolgt die Auslegung der Kühlung/ Temperierung immer nach der maximal abzuführenden Wärmemenge bei Vollast. Da dem Wärmeübergangskoeffizienten (HTC) bei der Konvektionskühlung definierte Grenzen gesetzt sind (übliche Werte sind HTC bis 5.000 W/m² K), muss das Kühlsystem mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit und einem hohen Volumenstrom beaufschlagt werden, um die geforderte Wärmemenge in diesem Maximalpunkt abführen zu können. In den Schwach- und Teillastbereichen überkühlt diese Auslegung den Verbrennungsmotor, auch wenn der Kühlmittelvolumenstrom durch Reduzierung der Kühlmittelpumpenleistung (Drehzahlabhängigkeit zur Motordrehzahl, teilweises Abdecken des Pumpenrades oder der Einsatz elektrischer Kühlmittelpumpen) reduziert wird. Ein komplettes Abschalten der Motorkühlung ist nur in einem geringen Maße möglich (z.B. nach Motorstart), da aufgrund der inhomogenen Wärmeverteilung, speziell im Zylinderkopf mit intergrierten Abgaskrümmer, potenzielle Hotspots sicher vermieden werden müssen.

Der begrenzte maximale Energieeintrag des flüssigen Kühlmediums (Wasser-Glykol-Gemisch), bedingt zudem ein entsprechendes Kühlmittelvolumen im Kühlkreislauf (KKL) vorzuhalten, was dazu führt, dass ein Konvektionskühlungssystem relativ träge auf wechselnde Betriebszustände reagiert. In einem 4 Zyl. PKW- Ottomotor ($V_h = 2,0\text{l}$) sind ca. 8,0 l Kühlmittel im Umlauf.

Alle anderen Funktionssysteme des Verbrennungsmotors wurden in den letzten Jahren auf Variabilität und schnelle Regelung optimiert (vollvariabler Ventiltrieb, elektrische Wastegate-

Steller, kennfeldgeregelte Ölpumpen, Nockenwellensteller etc.). IAV hat sich seit einigen Jahren der Optimierung der Motorkühlung angenommen und dieses Funktionssystem von einem trühen Konvektionskühlsystem zu einem performanten, variabel und schnell regelbaren Phasenwechsel- Kühlsystem weiterentwickelt.

Neben den technischen Aspekten für die Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors spielt ein weiterer Gedanke eine wichtige Rolle. Auch im PKW- Umfeld wird der Verbrennungsmotor als Hybridanwendung noch längere Zeit (ca. 10-15 Jahre) eine tragende Rolle in der individuellen Mobilität spielen, letztendlich aber doch eine Übergangstechnologie darstellen. Die Investitionsmittel der Fahrzeughersteller werden schwerpunktmäßig in andere Technologien fließen, weshalb es sinnvoll erscheint, bestehende Technologien und damit verbundene Fertigungs- und Montageinfrastrukturen auch für zukünftige Verbrennungsmotoren zu nutzen.

An dieser Stelle können die Gussteillieferanten einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung des Verbrennungsmotors leisten. Im Nachfolgenden wird das Thermomanagement- System von IAV mittels Phasenwechselkühlung vorgestellt. Es wird deutlich werden, dass neben der Systemauslegung und Entwicklung der Systemkomponenten speziell die Realisierung der Kühlkerngeometrien in den Bauteilen Zylinderkopf und Kurbelgehäuse eine essentielle Bedeutung zukommt und damit zusätzliche Funktionalitäten in diese Bauteile integriert werden. Letztendlich werden die Gussteile damit funktionell aufgewertet und technisch höher positioniert.

Die gezeigten Ausführungsbeispiele in diesem Beitrag fokussieren auf die Umsetzung der Phasenwechselkühlung in einem 4 Zyl. PKW- Ottomotor ($V_h = 2,0\text{l}$). Die Phasenwechselkühlung ist jedoch ebenfalls in anderen Verbrennungsmotoren z.B. bei Nfz- Dieselmotoren oder für Einzelkomponenten (z.B. Abgaskräümmer und Abgasturboladermodule) zielführend einsetzbar, weshalb die dargestellten Ausführungen natürlich übertragbar sind. Bei IAV laufen aktuell verschiedene Kundenprojekte im Bereich der Nfz- und PKW- Motoren, sowohl bei Otto- und Dieselanwendungen als auch zu Komponentenentwicklungen.

3. Welche Gründe favorisieren das neue Thermomanagement durch Phasenwechselkühlung für eine neue Verbrennungsmotoren- Generation?

Die Phasenwechselkühlung als Gesamtsystem bietet mehrere Vorteile beim Einsatz in einem konventionellen, aber besonders in einem hybriden Powertrain:

- Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors durch bedarfs-gerechte Temperierung und schnelle Regelung der Kühlung
- Erhöhung der spezifischen Leistung des Verbrennungsmotors bei Einhaltung des stöchiometrischen Verbrennungsluftverhältnis ($\lambda = 1$) im gesamten Kennfeld

- Schnellere Erwärmung des Verbrennungsmotors und reduzierter Wärmeverlust im hybriden Start- Stopp- Betrieb
- Verringelter Bauraumbedarf/ Package der Kühlkreislaufkomponenten im Fahrzeug

3.1. Grundlagen der Phasenwechselkühlung

Das nachfolgende Bild 1 zeigt schematisch den allgemeinen Verlauf des Wärmestroms über der Aufheizkurve und die einzelnen Bereiche eines Kühlmediums.

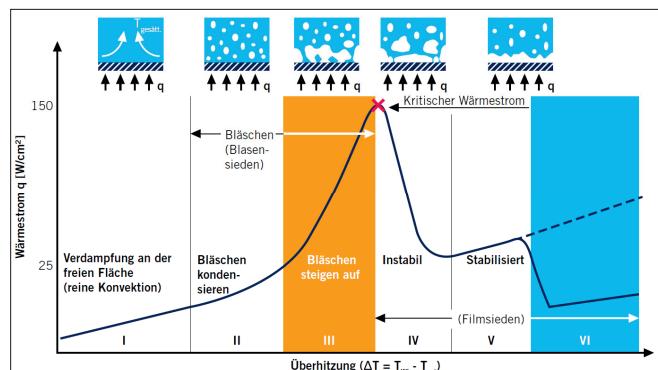


Bild 1: Wärmestrom Kühlmittel – reine Konvektion vs. Sieden (© IAV)

Alle Kühlsysteme aktueller Serienmotoren arbeiten im Bereich I (reine Konvektion) und lassen in Betriebspunkten hoher thermischer Last das Blasensieden (Bereich II) teilweise zu. Es muss jedoch durch die geometrische Auslegung sichergestellt sein, dass die entstehenden Gasblasen von der Kühlmittelströmung gezielt abgeführt werden. Einen konstanten Kühlmittelmas- sestrom vorausgesetzt, kann das Kühlmedium im Phasenübergang flüssig zu gasförmig (Be- reich III) im Gegensatz dazu ca. das 50-fache der Wärmemenge aufnehmen. Diese Wär- meaufnahme verläuft isotherm entlang des Kühlsystems und innerhalb des Kühlmittelkerns vom Eintritt in das Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) bis zum Austritt aus dem Zylinderkopf (ZK). Dabei ändert sich hauptsächlich der Dampfgehalt des Kühlmediums, wobei die Medientem- peratur über den Systemdruck geregelt wird.

Folgende Vorteile leiten sich daraus für den Einsatz im Verbrennungsmotor ab:

- Das Kühlmittelvolumen kann deutlich reduziert werden (von 8,0l auf 3,0l¹⁾)
- Die abführbare Wärmemenge im Kühlsystem stellt keinen limitierenden Faktor für die Auslegung des Verbrennungsmotors mehr da. Bei entsprechender Systemauslegung ist die Kühlleistung im Überschuss vorhanden. Der Bauteilschutz bzw. Klopfschutz bei Hoch- und Volllast kann ohne weitere Maßnahmen weitestgehend über die Motor-/Bauteilkühlung (ZK und IAGK) abgesichert werden. Die Grundverdichtung des Verbrennungsmotors kann angehoben werden, um den thermischen Wirkungsgrad zu steigern. Eine Kühlung durch Kraftstoffanreicherung kann entfallen, wodurch die CO₂-Emissionen reduziert werden.
- Der isotherme Prozess des Phasenwechsels entlang des Kühlsystems realisiert eine nahezu konstante Kühlmittelttemperatur innerhalb des Kühlsystems, was sich ebenfalls in den Bauteiltemperaturen widerspiegelt (siehe Bild 2).

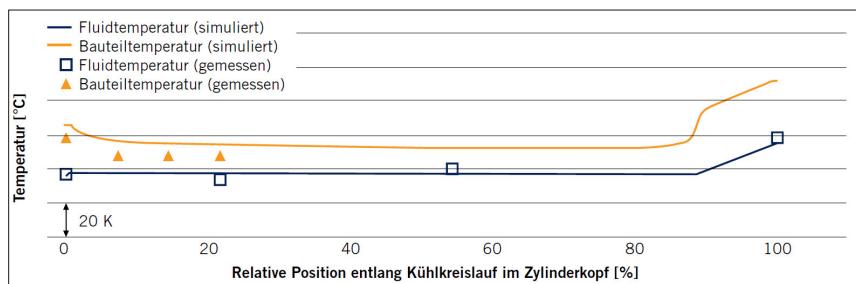


Bild 2: Vergleich Kühlmittel- und Bauteiltemperatur von Berechnung und Messung (© IAV)

- Aufgrund der sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten folgt die Bauteiltemperatur mit geringen und konstanten Offset ($\Delta T < 10\text{K}$) der Kühlmittelttemperatur (siehe Bild 3). Die Bauteilbelastungen durch thermische Spannungen infolge lokaler unterschiedlicher Temperaturen sinkt, was sich positiv auf die HCF und LCF Sicherheiten auswirkt.

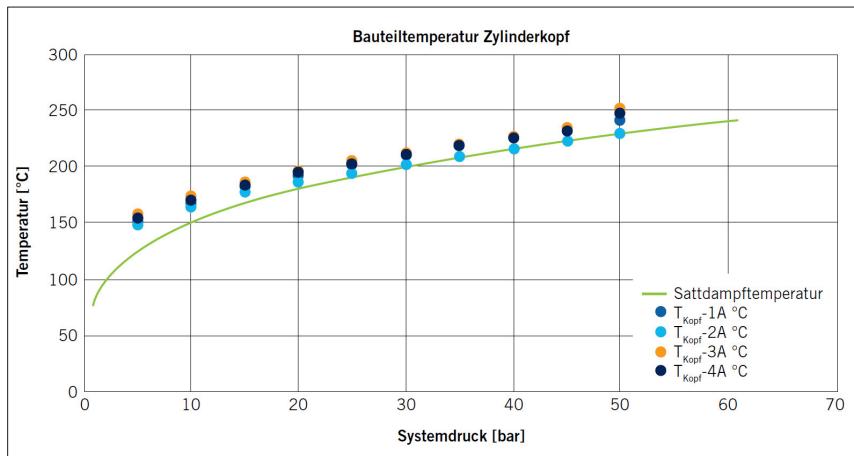


Bild 3: Wandtemperatur von vier unterschiedlichen Zylinderkopfpositionen inkl.

Sattdampftemperatur vs. Systemdruck (© IAV)

- Im PCC-System wird die Kühlmitteltemperatur über den Systemdruck geregelt. Diese Druckregelung in Verbindung mit dem kleinen Volumenstrom ermöglicht bei Bedarf eine sehr schnelle, praktisch verzögerungsfreie, Temperaturabsenkung im Kühlsystem. Der signifikant kleinere Volumenstrom sorgt in der Teillast ebenfalls für einen schnellen Temperaturanstieg im System. Die Druckregelung ist zudem unabhängig von der Motordrehzahl, bzw. der Motorlast. Das PCC- System stellt somit einen neuen, unabhängigen und performanten Freiheitsgrad für die Applikation des Verbrennungsmotors dar.
- Der geringere Kühlmittelpumpenstrom erlaubt die Verwendung von deutlich kleineren Kühlmittelpumpen, womit die periphere Verlustleistung des Verbrennungsmotors weiter reduziert wird. Je nach Auslegung des PCC- Systems genügt eine elektrische Kühlmittelpumpe mit einer installierten Antriebsleistung von $P_{elekt} = 50\text{ W}^{1)}$ aus.
- Einen weiteren essentiellen Vorteil zeigt sich in der Rückkühlung des Kühlmediums. Beim PCC-System wird der Kühler durch einen Kondensator ersetzt. Aufgrund des höheren Temperaturgefälles und der höheren Wärmeübergangskoeffizienten im Kondensator kann deutlich mehr Wärme bei konstanter Fläche abgeführt werden bzw. kann die Fläche zur benötigten Rückkühlung reduziert werden. In aktuellen IAV Projekten

wird eine Reduzierung der Kühlfläche um bis zu 40% bezogen auf die aktuelle Serienkonfiguration erreicht. Die Querschnitte aller kühlmittelführenden Leitungen können ebenfalls deutlich reduziert werden, was weitere Packagevorteile mitsichbringt. Dieser Aspekt ist speziell für die Fahrzeugentwickler interessant.

- Das Thermomanagement mittels PCC-System wurde von IAV als geschlossenes System ausgelegt und benötigt ein anderes Kühlmedium als konventionelle Kühlsysteme im Verbrennungsmotor, da die höheren Kühlmitteltemperaturen zu einer thermischen Zersetzung des Ethylen-Glykol Anteils im Kühlmittel führen würde. IAV nutzt aktuell ein Wasser- Ethanol- Gemisch (Verhältnis 60:40), welches die nötige Einfriersicherheit bietet und im eingesetzten Druck- und Temperaturbereich ausreichend Sicherheit gegen thermische Zersetzung bietet.

4. Einordnung der PCC- Technologie zu alternativen Kühlkonzepten ohne Kraftstoffanreicherung

4.1. Wassereinspritzung

Aktuell wird die Wassereinspritzung partiell in Hochleistungsmotoren [11] mit relativ kleiner Produktionsstückzahl eingesetzt. Mittels integriertem Injektor im Saugrohr wird Wasser in Form von Sprühnebel in die Ansaugluft eingebracht. Die Verdampfung des Wassers im Saugrohr/ Einlasskanal kann die Temperatur der Ansaugluft um ca. $\Delta T < 25\text{K}$ absenken. Dadurch sinkt u.a. die Verdichtungs- und Verbrennungsendtemperatur, die Klopfneigung und die thermische Bauteilbelastung. Alternativ kann die Wassereinspritzung auch direkt in den Brennraum erfolgen (i.d.R. eine Frage des Bauraums im Zylinderkopf). Konsequent auf Wassereinspritzung ausgelegte Verbrennungsmotoren können in ihrer Grundverdichtung erhöht werden, was die Effizienz erhöht. Den aufgeführten thermodynamischen Vorteilen der Wassereinspritzung stehen allerdings auch Systemnachteile entgegen. Alle derzeit in (Klein-)Serienanwendung ausgeführten Systeme sind sog. offenen Systeme, was ein regelmäßiges Nachfüllen von aufbereitetem Wasser erfordert. Ein entsprechender Tank ($V_{\text{Tank}} > 5,0\text{l}$) sowie das Leitungssystem benötigen Bauraum sowie gezielte Maßnahmen zur Einfriersicherheit im Fahrzeug. Alle heißen Motorkomponenten (ZK, ZKG, Kolben sowie die komplette Abgasanlage) sind dem Wasserdampf bzw. Kondensat ausgesetzt, was sie korrosionsanfällig macht. Die Großserientauglichkeit und Kundenakzeptanz von Wassereinspritzungssystem muss zudem noch nachgewiesen werden.

Das PCC-System hingegen hat vergleichbare Potentiale zur Reduzierung der Klopfneigung und der thermischen Bauteilbelastung. Jedoch wird dies mit einem geschlossenen System absolut kundenneutral und mit geringerem Bauraumbedarf sicherstellt.

4.2. Miller Brennverfahren

Aktuelle PKW-Motoren generationen haben seit geraumer Zeit das Miller- Brennverfahren bzw. Miller- Steuerzeiten in Serie eingeführt, siehe [12], [13]. Im Vergleich zur füllungsoptimierten Auslegung wird durch ein frühes Schließen der Einlassventile eine Absenkung der Frischladungstemperatur (Einlassventil schließt weit vor UT, die fortlaufende Expansion führt durch Druckabsenkung ebenfalls zu einer Temperaturabsenkung) im Zylinder und bei konstantem geometrischen Verdichtungsverhältnis folglich auch eine niedrigere Verdichtungsendtemperatur erreicht. Die Klopfneigung reduziert sich demnach durch die Verkürzung der Einlassperiode und die sich im gleichen Maße ergebende verringerte Verbrennungsendtemperatur senkt die thermische Bauteilbelastung. Der Füllungsverlust (Verringerung Liefergrad) kann natürlich nur über eine Erhöhung des Ladedruckes kompensiert werden und steigert die Verdichterleistung signifikant. Zudem steigt die Kühlleistung am Ladeluftkühler (LLK) ebenfalls, um eine prozess- optimale Ladelufttemperatur zu gewährleisten. Eine Kühlleistung des LLK über $P_{LLK} > 30,0\text{ kW}$ (entspricht einer Motorleistung von ca. $P_{mot} \sim 130,0\text{ kW}$) sind in vielen Vorderwagen bauraum- bedingt schwer realisierbar, eine erhöhte Verdichterleistung bei gleichzeitig verringelter Abgasenthalpie stellt eine zusätzliche Herausforderungen bezüglich Low End Torque und Fahrdynamik dar.

Die Reduzierung der thermischen Bauteilbelastung kann auch hier durch das PCC-System in einem vergleichbaren Rahmen sichergestellt werden. Jedoch muss für das PCC-System ebenfalls der ATL leicht angepasst werden. Geht man von einer Anhebung des Verbrennungsluftverhältnisses ($\lambda = 1$) aus und behält die abgasseitige Temperaturgrenze bei, reduziert sich die Turbinenleistung um den Masseanteil der Kraftstoffanreicherung. Bei gleichem Leistungsziel und Gegendruckverhalten muss demnach eine Verdichter-/Turbinenanpassung durchgeführt werden. Die Änderungsumfänge fallen jedoch deutlich geringer aus, als für die Anpassung der entsprechenden Komponenten (ATL + Ventiltrieb) für das Miller- Brennverfahren.

5. Wirkungsweise der Phasenwechselkühlung am Verbrennungsmotor

5.1. Konvektionskühlung

Bei der aktuell in allen Verbrennungsmotoren eingesetzten Konvektionskühlung steht der betriebspunktabhängigen hohen Varianz des Wärmestroms im Brennraum infolge der hohen

Drehzahl- und Drehmomentspreizung nur eine geringe Varianz des kühlmittelseitigen austragbaren Wärmestroms gegenüber. Der Stand der Technik sind Kühlmitteltemperaturen zwischen $T_{KM} = 80 - 130^\circ\text{C}$, wobei das Thermostat bereits ab einer Temperatur von $T_{KM} = 115^\circ\text{C}$ geöffnet wird, um eine ausreichende Sicherheit bzw. Reserve für Lastsprünge im Kühlssystem vorzuhalten (Systemträchtigkeit). Aufgrund der Tatsache, dass das Kühlssystem für die Vollastanforderungen ausgelegt ist und in der Regel eine lineare Abhängigkeit der Pumpenleistung zur Motordrehzahl vorliegt, wird in den Teillastbereichen der Verbrennungsmotor überkühlt bzw. ist die Reduzierung der Wandwärmeverluste nur begrenzt möglich. Außerdem sollte die Kühlmitteltemperatur lokal nicht über $T_{KM} = 135^\circ\text{C}$ steigen, da daraufhin der Ethylen-Glykol-Zerfall einsetzt. Ein komplettes Deaktivieren der Kühlmittelpumpe (elektrisch oder mechanisch) ist nur kurzzeitig möglich, da durch die geringen HTC lokale Hotspots entstehen können. Speziell die Zylinderköpfe mit integriertem Abgaskrümmer sind diesbezüglich problematisch, weshalb für diese Bauform in der Regel immer ein minimaler Kühlmittelvolumenstrom ausgelegt wird, was zu einer entsprechenden Kühlung des Bauteils führt.

5.2 Phasenwechselkühlung

Beim PCC-System steht ein deutlich größerer Parameterbereich für die Variabilität des austragbaren Wärmestroms auf der Kühlmittelseite zur Verfügung ($T_{KM} = 90 - 250^\circ\text{C}$, praktisch jedoch nur bis $T_{KM} = 200^\circ\text{C}$ notwendig/ genutzt¹⁾). In der Teillast können demnach die Wandwärmeverluste reduziert werden, indem die Kühlmitteltemperatur über den einstellbaren Systemdruck in den gewünschten Bereich angehoben wird. Die sehr schnelle Druckregelung im PCC-System in Verbindung mit den sehr hohen HTC- Werten (HTC bis 100.000 W/m² K) garantiert die optimale/ ausgelegte Bauteiltemperatur und es ist kein Sicherheitsvorhalt für Lastsprünge notwendig. Bei Hoch- und Vollast können durch die Absenkung des Systemdruckes die Bauteiltemperaturen deutlich unter die aktuell auftretenden Temperaturen gesenkt werden, was die Klopfneigung reduziert. Wie bereits beschrieben, ist bei einer konsequenten Motorauslegung mit dem PCC-System eine Erhöhung der Grundverdichtung möglich, da kühlungsseitig ausreichend Potential zur Klopfreduzierung (durch Präzessionsbauteilkühlung) vorhanden ist. Der schematische Vergleich der Kühlssysteme über die Kühlmitteltemperatur ist im nachfolgenden Bild 4 zusammengefasst.

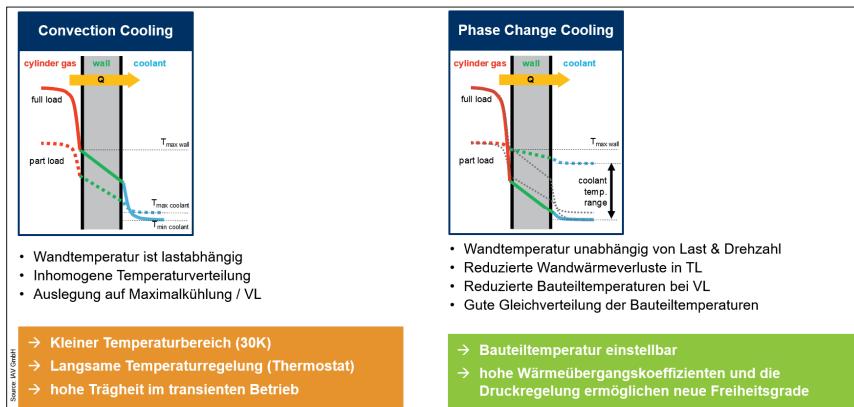


Bild 4: Vergleich Konvektions- und Phasenwechselkühlung (© IAV)

5.3. Systembeschreibung und Komponenten

Das PCC-Kühlsystem ist grundsätzlich in zwei Kreise aufgeteilt, dem Primärkreis (Hochdruck nur im Zylinderkopf und Kurbelgehäuse) und dem Sekundärkreis (vgl. Bild 5). Aus einem Kühlmitteltank (Volumen $V_{Tank} \sim 2,01^{11}$) fördert eine elektrische Förderpumpe das Kühlmedium in den Kühlmittelkern von Kurbelgehäuse und Zylinderkopf. Je nach Systemauslegung wird entweder eine eigens entwickelte elektrische 12V- Kühlmittelpumpe (Systemdruck $p_{KM} \leq 20\text{bar}$) oder eine angepasste Hochdruckpumpe (HDP, Systemdruck $p_{KM} \leq 60\text{bar}$) aus dem Automotive- Portfolio eingesetzt. Die Ausführung ist dabei ähnlich einer E85- HDP und wird von der Nockenwelle angetrieben. Entlang der Kühlkanäle im Kurbelgehäuse und Zylinderkopf findet die gezielte Verdampfung und damit der Wärmetransport ins PCC-System statt. Am Ausgang des Kühlmittelkerns (vergleichbar der heutigen Thermostatposition) befindet sich ein Druckregelventil (DRV), welches den gewünschten Systemdruck kennfeldgesteuert sicherstellt und damit die Temperatur im PCC-System einstellt. Nach dem Passieren des Druckregelventils wird das dampfförmige Kühlmittel nahezu entspannt und mit einem Restdruck von $p_{KM} \sim 2,0\text{bar}$ dem angeschlossenem Kondensator zugeführt, wo die Kondensation des Dampfes zur Flüssigkeit erfolgt. Anschließend wird das nun wieder flüssige Kühlmittel zurück in den Tank bzw. in den weiteren Kreislauf gefördert. Im Sekundärkreis wird ein Teil- Kühlmittelstrom des PCC-Systems dem Öl- Wärmetauscher zugeführt, da dieser auf einem niedrigeren Temperaturniveau arbeiten muss.

Der Systemdruck im Hochdruckbereich mit $p_{KM} \leq 60\text{bar}$ (vgl. Bild 3) liegen nur innerhalb der Strukturbauenteile Kurbelgehäuse und Zylinderkopf an und stellen eine bisherige versuchsseitig

untersetzte Grenzbetrachtung dar. In einer typischen PKW- Anwendung¹⁾ wird jedoch lediglich ein Systemdruck von $p_{KM} \leq 20\text{bar}$ benötigt. Die anderen Bereiche des PCC- Kreislaufes (Niederdruckbereich) arbeiten mit einem Druck von $p_{KM} \leq 3,0\text{bar}$. Somit stellt das PCC- System keine größeren Anforderungen hinsichtlich der Verrohrung und die Crashsicherheit von Fahrzeugen mit PCC-System ist analog zum heutigen Stand zu bewerten.

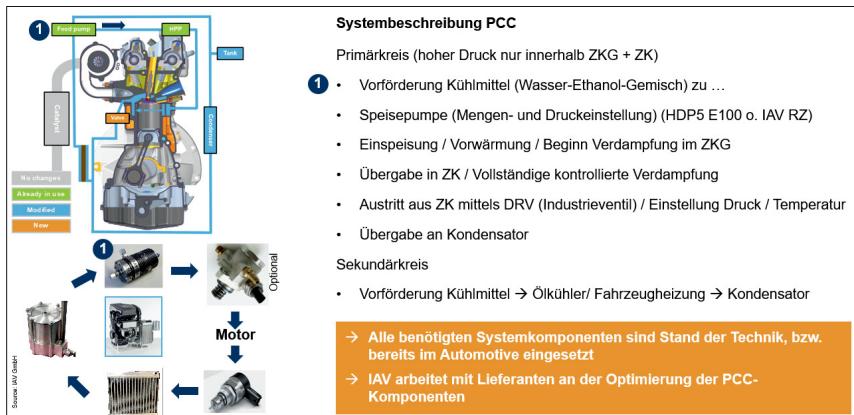


Bild 5: Systembeschreibung PCC- System (© IAV)

Alle benötigten Kreislaufkomponenten sind im aktuellen Automotive- Portfolio der Zulieferindustrie vorhanden. Für die elektrische 12V- Kühlmittelpumpe mit PCC- spezifischer Auslegung liegen bei IAV detaillierte Konstruktionen und Prototypen vor. Zur Industrialisierung ist IAV aktuell im Kontakt mit potenziellen Lieferanten. Das Druckregelventil ist momentan noch aus dem Industrie- Portfolio entnommen. Einer Qualifizierung in Richtung Automotive- Produkt stehen prinzipiell keine technischen Hürden im Wege. Gleichermaßen wird in einem laufenden Kundenprojekt die Qualifizierung des Kühlmittels inklusive eventuell notwendiger Additive vorangetrieben.

Zur Auslegung des gesamten PCC-Systems hat IAV eine eigene Entwicklungsmethodik erstellt und spezifische Auslegungsprogramme etabliert. Je nach Zielsetzung der Kunden kann damit das Gesamtsystem ausgelegt und die Spezifikationen aller PCC-Systemkomponenten vorgenommen werden. Dies beinhaltet insbesondere die konstruktiven Vorgaben zur Kühlmittelkerngestaltung für Kurbelgehäuse und Zylinderkopf, um die angestrebte Kühlleistung und Systemstabilität zu gewährleisten. Weiterführende Informationen bezüglich der PCC- Systemauslegung sind von IAV unter [14] veröffentlicht worden.

6. Anforderung PCC-System an die Gussteilgestaltung

Wie bereits beschrieben, bedingt die Einführung eines Kühlsystems mit PCC eine funktionell höhere Positionierung der Gussbauteile von Kurbelgehäuse und Zylinderkopf. Insbesondere die Gestaltung der jeweiligen Kühlkerngeometrie ist hier essentiell und stellt erhöhte Anforderungen an die Gussteifertigung. Damit setzt sich der Trend der immer komplexeren Kühlkanalführungen im Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse fort, welcher schon seit vielen Jahren im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren anhält. Die steigende spezifische Leistung, die Einführung von Motoren mit Thermomanagementsystemen und nicht zuletzt die Verbreitung von Zylinderköpfen mit integriertem Abgaskrümmer (IAGK) führten und führen zu einer diffizilen und filigranen Kerngeometrie sowie ehrhöhten Wandstärkenanforderungen. Siehe beispielhaft dazu Bild 6 – Zylinderkopf 4-Zyl. Ottomotor mit IAGK (links) und Zylinderköpfe V6 Dieselmotor (rechts).

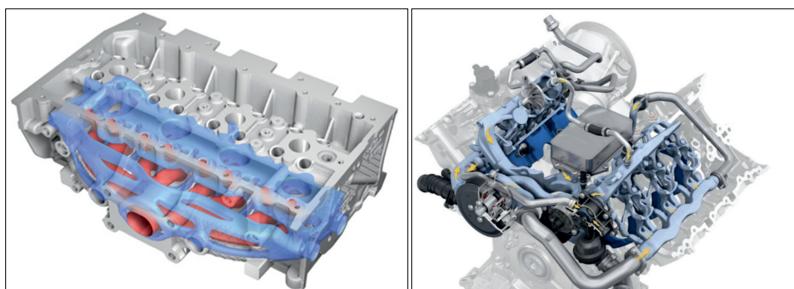


Bild 6: Beispiele Zylinderkopf- Wassermantelkerne [15], [16]

Die Erschließung weiterer Potentiale zur Verbesserung der Kühlungsverhältnisse bleibt, auch bei Einsatz konventioneller Kühlsysteme, ein Entwicklungsschwerpunkt. Dies bedingt auch die Weiterentwicklung von Fertigungsprozessen, Fertigungsverfahren und Verfahren zur Qualitätssicherung bzw. die Einführung von alternativen Methoden. Beispielhaft seien hier die additive Kernfertigung oder Inline- Computertomographie (CT) genannt.

Für das PCC-System wird eine gezielte und deutlich konsequenteren Führung des Kühlmediums als bei der konventionellen Konvektionskühlung benötigt (ähnliche Tendenzen sind aber durchaus aktuell bei der Weiterentwicklung von konventionellen Systemen zu beobachten). In Ableitung zur Gestaltung des Gussbauteils Zylinderkopf bedeutet dies, dass einzelne Kühlpfade mit geringerem Querschnitt realisiert werden müssen. Die vorausgelegten und imple-

mentierten Kernquerschnitte der einzelnen Kühlpfade sowie deren Routing werden dabei bezüglich Sicherstellung von Wandbenetzung mit Kühlmedium und Dampfabtragsort mittels mehrphasigen CFD-Simulationen optimiert. Auch die Kühlkerngeometrie des Kurbelgehäuses wird durch die aufgestellte Forderung deutlich filigraner und gleicht sich hinsichtlich Komplexität teilweise denen des Zylinderkopfes an. Die Kurbelgehäuse- und Zylinderkopfkühlung werden dabei mit nur einer einzigen Übergabestelle in Reihe geschaltet, d.h. eine Verbindung an der Schnittstelle zwischen Kurbelgehäuse und Zylinderkopf über mehrere Querschnitte entfällt. Im gesamten Kennfeldbereich des Motors werden hohe Bauteiltemperaturen angestrebt ohne dabei zulässige Grenztemperaturen (z.B. Bauteillebensdauer) zu überschreiten. Grundsatz: Temperaturniveau so hoch wie möglich aber so gering wie nötig.

Das höhere Temperaturniveau (Kühlmedium und Bauteil) erfordert dabei die Isolation ölführender Bereiche um hier ein Überhitzen des Motoröles zu vermeiden. Diese Isolation wird über einen zusätzlichen nicht mediendurchströmten Isolationskern, zwischen Kühlkanalkern und Ölraumkern im Zylinderkopf erreicht (Bild 8).

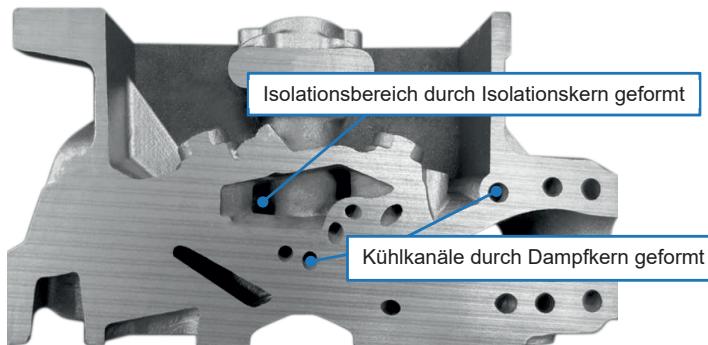


Bild 8: Zylinderkopf mit Kühlkanälen und Isolationsbereich (Schnitt ZK-Roteil)

Der Einsatz eines Wasser-Ethanol-Gemisches als Kühlmedium im PCC-System erfordert eine detaillierte Betrachtung hinsichtlich der Medienbeständigkeit der für die Gussbauteile eingesetzten Werkstoffe.

Beim Einsatz eines Aluminiumwerkstoffes für die Gusskomponenten Kurbelgehäuse und Zylinderkopf wird:

- gegebenenfalls eine Oberflächenbeschichtung erforderlich
- die Qualifizierung des Kühlmittels incl. notwendiger Additivierungen vorangetrieben

Im Gegensatz dazu, gibt es bei Grauguss- Zylinderköpfen (wie sie üblicherweise im Nfz-Bereich eingesetzt werden) bzw. Grauguss-Kurbelgehäusen keine zusätzlichen Anforderungen zu beachten. Zur Absicherung der Medienbeständigkeit ist auch eine Substitution von Aluminium durch Grauguss für Zylinderköpfe von PKW-Motoren denkbar. Aus Massegesichtspunkten wäre hier jedoch eine konsequente Leichtbaukonstruktion mit erhöhten Anforderungen an die Gussteilfertigung (komplexere Geometrien, Wandstärkenminimierung) anzustreben, analog der Vorgehensweise für Zylinderkurbelgehäuse [17]. Bezogen auf den Gesamtmotor muss die Masse bei Einsatz von Grauguss- Zylinderköpfen nicht zwangsläufig steigen, da wie unter den Punkten 3.1. und 5.3. beschrieben mehrere Systemkomponenten des PCC- Systems deutlich kleiner dimensioniert werden können. Beispielhaft sei hier das reduzierte Kühlmittelvolumen (um $V_{KM,red.} \sim 5,0\text{l}^1$) sowie der um ca. 40% flächenmäßig kleinere Kondensator erwähnt. Eine detaillierte Gesamtgewichtsbetrachtung muss für jeden Anwendungsfall separat erfolgen. Mit Einführung des PCC-Systems ist bei der Gussteilfertigung somit eine Kühlkerngeometrie mit reduziertem Querschnitt und großen freien Längen umzusetzen (vgl. Bild 10).

Folgende Anforderungen müssen beim Rohteil- bzw. Kernpaketdesign Beachtung finden:

- Gewährleistung der Kernstabilität bzgl. Handling und Abguss
- Kernlagerung und Abstützung mit relativ kleinen Kernlagerdurchmessern
- Vermeidung von Durchtritten im Bereich der Zylinderkopf- Bodenplatte und Kurbelgehäuse- Deck (fertigungstechnisch erforderliche Durchtritte müssen anschließend wieder verschlossen oder mit der Zylinderkopfdichtung angedichtet werden)
- Vermeidung von Verbindungen der Einzelkerne untereinander (ggf. Einsatz von Spangen für fertigungstechnisch erforderliche Kernverbindungen)
- Strategien/ Prozesse zum sicheren Handling bzw. Lagern der Kerne bei steigender Kernanzahl (inkl. zusätzlichem Isolationskern)
- Konzepte zu sicheren Entgasung der langen Kerngeometrien (Einzelpfade) beim Gießen
- Absicherung der Hitzebeständigkeit der Kühlkerne mit geringem Querschnitt (ggf. durch spezielle Kernwerkstoffe oder Schlichten), dies vorrangig bei Grauguss-Bauteilen
- u.U. zusätzlicher Prozessschritt bzgl. Oberflächenbeschichtung (Medienbeständigkeit bei Al-Gussbauteilen)

- Konzepte zur Bauteilprüfung (z.B. Dichtheitsprüfung aller Einzelpfade der Kühlkerne, CT)
- angepasste Konzepte zur Entformung und Bauteilreinigung

Die nachfolgende Darstellung im Bild 9 zeigt exemplarisch den Formkasten und das Kernpaket für einen Zylinderkopf.

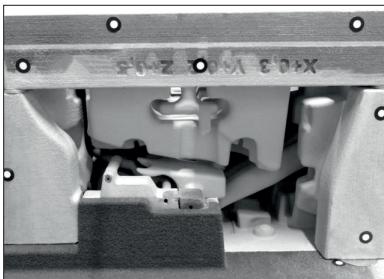
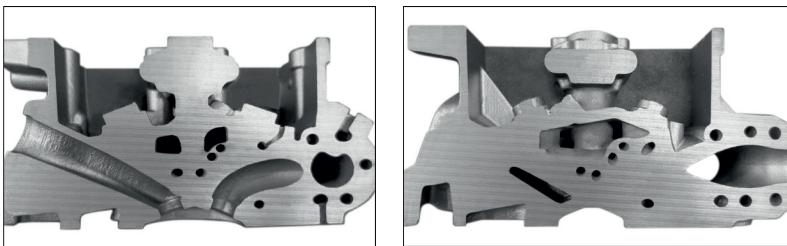


Bild 9: Kernpaket für Zylinderkopf mit Dampf- und Isolationskern

Das entstandene ZK-Rohteil mit seiner Kühlkanalgeometrie und Verteilung ist in Bild 10 (links) mit einem Schnitt durch den Brennraum und dem Isolationsbereich inkl. dem IAGK (rechts) zu sehen.



Bilder 10: ZK-Abguss (Schnitt) mit resultierende Rohteilgeometrie

Bei den bisher bei IAV durchgeföhrten Projekten zum PCC-System ist es durch eine enge Abstimmung zwischen Bauteilentwicklern und dem Gießer in einer frühen Entwicklungsphase stets gelungen qualifizierte und funktionale Lösungen für die gießtechnischen Herausforderungen zu finden. Wie bei der Gestaltung von Bauteilen mit konventionellem Kühlsystem erschließt eine additive Kernfertigung zusätzliche Gestaltungsoptionen, welche auch für ein PCC-System zusätzliches Potential bieten und die genannten Herausforderungen lösen. Bei entsprechender konstruktiver Umsetzung ist der Einsatz konventionell geschossener Kerne

natürlich auch möglich und zu bevorzugen, was als sinnvoller Schritt für den Einsatz der PCC-Technologie für Großserienanwendung gilt.

7. Entwicklungsstatus

IAV entwickelt seit 2015 ein innovatives Thermomanagement für Verbrennungsmotoren unter Nutzung der Potentiale der Phasenwechselkühlung. Dazu wurden neben der umfangreichen Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur Systemauslegung und der Anwendung des PCC-Prozesses zur Abgaswärmerückgewinnung im Jahr 2016 ein 4-Zyl. PKW-Ottomotor (Serienstand) auf ein PCC-System umgerüstet und auf dem Prüfstand erprobt bzw. vermessen. Der erzielte Verbrauchsvorteil durch die Umstellung auf Phasenwechselkühlung und der damit einhergehenden Reduzierung der Kühlmittelpumpenleistung, Verringerung der Wandwärmeverluste sowie einer schnelleren Erwärmung des Motors beträgt in Summe ca. 6 %²⁾ im aktuellen Fahrzyklus WLTC.

IAV bearbeitet aktuell in unterschiedlichen Kundenprojekten Konzepte für verschiedene Ein-satzszenarios des PCC-Systems im Bereich Verbrennungsmotor. Beginnend bei mehreren Projekten zur Komponentenkühlung (gekühlte Abgaskräümmer zur Erweiterung des Lambda1-Kennfeldes) über komplett PCC-gekühlte Verbrennungsmotoren (3- und 4-Zyl. PKW-Ottomotoren) bis hin zu 6-Zyl. Nfz-Dieselmotoren. Teilweise werden die PCC-Systeme auch um die Einbindung der Rekuperation der Abgaswärme erweitert. In allen Projekten konnte jeweils der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems geführt, sowie die Erfüllung der spezifischen Projektziele realisiert werden (z.B. Ausweitung des Lambda1-Kennfeldes, Verbrauchsreduzierung, Bauteilschutz, etc.).

8.

Zusammenfassung

Die hybriden Antriebsstränge stellen mittelfristig im PKW- Sektor ein notwendiges Übergangs-szenario dar. Im Nfz- Sektor werden die Verbrennungsmotoren noch weitaus länger benötigt. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Verbrennungsmotor noch mindestens eine Generation weiter zu entwickeln. Zielführend ist dabei der Einsatz erweiterbarer bzw. neuer Technologien, die:

- den Wirkungsgrad des Gesamtsystems verbessern
- unabhängig vom Energieträger anwendbar sind (fossile Kraftstoffe, e-Fuels, CNG/LPG, H₂)
- unabhängig von der Art und Anwendung des Verbrennungsmotors sind (Otto/ Diesel; PKW / Nfz)
- sowie dabei weitestgehend verfügbare Fertigungs- und Montageanlagen nutzen.

Modernes Thermomanagement mittels Phasenwechselkühlung erfüllt all diese Kriterien und ist bei allen Arten von VKM vorteilhaft integrierbar; als eigenständiges Technologiepaket oder als Ergänzung anderer Technologien.

Der großserienfähigen Umsetzung der PCC- typischen Kühlkerneometrie in den Gussbauteilen Kurbelgehäuse und Zylinderkopf kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. IAV möchte deshalb die Gusshersteller motivieren, die Entwicklung von PCC- Bauteilen mit voran zu treiben, um interessierten Fahrzeug- und Motorenherstellern serienfähige Lösungen anbieten zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Kratzsch, W. Wukisiewitsch, M. Sens, M. Brauer, R. Tröger; *Der Weg zur CO₂-neutralen Mobilität 2050;* 40. Internationales Wiener Motorensymposium; 2019
- [2] Deloitte; *Is consumer interest in advanced automotive technologies on the move?;* 2020 Global Automotive Consumer Study; 2020
- [3] P. Gutzmer, U. Wagner, M. Zink; *Mobilität für morgen;* Schaeffler Kolloquium; 2018
- [4] B. Smith, A. Spulber, S. Modi, T. Fiorelli; *Technology Roadmaps: Intelligent Mobility Technology, Materials and Manufacturing Processes, and Light Duty Vehicle Propulsion;* (www.cargroup.org/wp-content/uploads/2018/01/Technology_Roadmap_Combined_23JAN18.pdf); 2017
- [5] V. Matthias, J. Bieser, T. Mocanu, Th. Pregger, M. Quante, M. Ramacher, St. Seum, Chr. Winkler; *Modelling road transport emissions in Germany – Current day situation and scenarios for 2040;* Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 87, 2020
- [6] ACEA (2020): *Overview - Electric vehicles: Tax benefits & purchase incentives in the European Union* (<https://www.acea.be/publications/article/overview-of-incentives-for-buying-electric-vehicles>), 2020
- [7] M. Allekotte, F. Bergk, K. Biemann, C. Deregowksi, W. Knörr, H.-J. Althaus, D. Sutter, Th. Bergmann; *Ökologische Bewertung von Verkehrsarten;* Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes; 2020
- [8] M. Sens, M. Pannwitz, A. Forell, M. Brauer, W. Wukisiewitsch, M. Kratzsch; *Antriebskonzepte auf dem Weg zur CO₂ neutralen Mobilität;* 41. Internationales Wiener Motorensymposium; 2020
- [9] St. Seum, S. Ehrenberger, Th. Pregger; *Well-to-wheel emission factors for future cars in Germany with a focus on 1 fleet composition, new technologies and emissions from energy supplies;* 23rd International TAP Conference; 2019
- [10] M. Maus; *Zukünftige Kraftstoffe – Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel;* Springer Vieweg Verlag; 2019
- [11] B. Durst, C. Landerl, J. Poggel, C. Schwarz, W. Kleczka, B. Hußmann; *BMW Wassereinspritzung: Erste Erfahrungen und künftige Potentiale;* 38. Internationales Wiener Motorensymposium; 2017
- [12] R. Wurms, R. Budack, M. Grigo, G. Mendl, T. Heiduck, S. Knirsch; *Der neue Audi 2,0l mit innovativem Rightsizing – ein weiterer Meilenstein der TFSI-Technologie;* 36. Internationales Wiener Motorensymposium; 2015

- [13] F. Eichler, W. Demmelbauer-Ebner, J. Theobald, B. Stiebels, H. Hoffmeyer, M. Kreft; *Der neue EA211 TSI®evo von Volkswagen*; 37. Internationales Wiener Motoren symposium; 2016
- [14] M. Weise, Th. Arnold, V. Ambrosius, H. Neukirchner; *Innovatives Thermomanagement*; MTZ10/2017 Jahrgang 78; 2017
- [15] J. Hadler, H.-J. Neußer, R. Szengel, H. Middendorf, J. Theobald, N. Möller; *Der neue TSI®*; 33. Internationales Wiener Motoren symposium; 2012
- [16] J. Königstedt, G. Bonn, Chr. Brinkmann, G. Fröhlich, Th. Heiduck, J. Jablonski; *Der neue 3.0l-V6-TFSI-Motor von Audi*; 37. Internationales Wiener Motoren symposium; 2016
- [17] F. Grunow, W. Görtz, R. Weber; *Zylinderkurbelgehäuse für Pkw*; ATZ10/2007 Jahrgang 109; 2007

Bildnachweis

- Bild 1 – 5: IAV GmbH
- Bild 6: J. Hadler, H.-J. Neußer, R. Szengel, H. Middendorf, J. Theobald, N. Möller; *Der neue TSI®*; 33. Internationales Wiener Motoren symposium 2012
- Bild 7: J. Königstedt, G. Bonn, Chr. Brinkmann, G. Fröhlich, Th. Heiduck, J. Jablonski; *Der neue 3.0l-V6-TFSI-Motor von Audi*; 37. Internationales Wiener Motoren symposium 2016
- Bild 8 – 12: IAV GmbH

Fußnoten

- ¹⁾ Die Angaben sind Richtwerte und beziehen sich auf einen 4-Zyl. PKW-Ottomotor mit Abgasturboaufladung ($V_h = 2,0\text{l}$; $P_e = 200\text{kW}$)
- ²⁾ Basis für die WLTC Messungen ist ein C-Segment – Fahrzeug

Die Verbrennungskraftmaschine im elektrifizierten Antriebsstrang – Modularer Ansatz auf einheitlicher Plattform im Spannungsfeld zwischen Kosten und CO₂-Optimierung

The combustion engine in the electrified powertrain – modular approach within a common platform between Cost and CO₂ optimization

W. Schöffmann, M. Howlett, P. Kapus, G. Teuschl, C. Sams, I. Barna,
AVL List GmbH, Graz, Österreich

Abstract

The electrification of the powertrain is a prerequisite to meet future CO₂ Targets; at the same time, the internal combustion engine (ICE) will remain a key element of most production volume relevant powertrain concepts, ranging from parallel hybrids, through 48V- or High Voltage Mild- or Full hybrids, up to Serial hybrids. In electrified powertrains, with the potential to reduce the operation range of the ICE to the preferred load and speed ranges with high efficiency, a step by step simplification of the ICE is achievable, towards the target of a dedicated hybrid engine (DHE).

The competition between different technologies with varying production volume distributions can be addressed by a modular engine family architecture with common parts and common machining and assembly concepts, with the flexibility to integrate different technology packages, utilizing existing production and development facilities to a large extent.

The paper shows the potentials of a modular technology approach, as well as the impact of electrified powertrain variants on the relevant cast structure components, with focus on a balanced overall complexity of the engine, transmission, e-drive and battery in regard of Cost and CO₂-reduction.

Kurzfassung

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges ist zur Erfüllung zukünftiger Verbrauchsziele nicht mehr wegzudenken, wobei die Verbrennungskraftmaschine bei allen stückzahlrelevanten Antriebskonzepten auch weiterhin ein Schlüsselement darstellen wird.

Die Bandbreite wird sich über Parallelhybride, als 48V- oder Hochvolt- Mild- oder Vollhybrid, bis zu seriellen Hybriden darstellen. Bei elektrifizierten Antrieben mit der Möglichkeit, den Betriebsbereich der VKM auf bevorzugte Last- und Drehzahlbereiche hoher Wirkungsgrade zu beschränken, lässt sich eine partielle und zunehmend steigende Vereinfachung der VKM erreichen, mit dem Ziel eines maßgeschneiderten Hybridmotors.

Der Wettbewerb unterschiedlicher Technologien und Variabilitäten bei varierenden Stückzahlen in verschiedenen Applikationen erfordert eine modulare einheitliche Familienarchitektur mit Gleichteile- und Gleichbearbeitungskonzept, sowie der Integrationsfähigkeit unterschiedlicher Technologiepakete unter Nutzung existierender Produktions- und Entwicklungsstandorte.

Der Beitrag zeigt die Chancen eines modularen Technologieansatzes, sowie die Auswirkungen der elektrifizierten Antriebsstrangvarianten auf die gußtechnisch relevanten Strukturkomponenten, mit Fokus auf eine Balancierung der Gesamtkomplexität von VKM, Getriebe, E-Drive und Batterie hinsichtlich Kosten des Antriebssystems und erzielbarer CO₂-Reduktion.

1. Introduction

In order to achieve the required CO₂ Emissions improvement for 2025 and even more 2030 legislation, advanced internal combustion technologies need to be combined with electric systems [1,2].

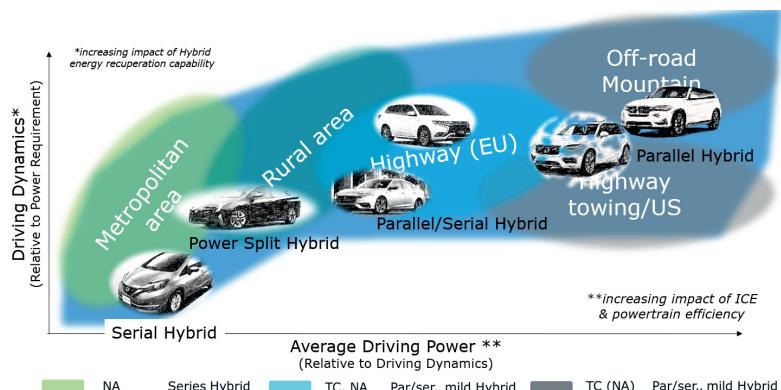


Fig. 1: Diversity of Powertrain Electrification [3]

The distribution of battery electric powertrains and electrified ICE based powertrains in a large variety of topologies and combinations between electric and combustion engine performance, is very much dependent on the usage, respectively speed, driving dynamics and driving ranges on one side and the vehicle size and weight on the other side (Figure 1) [4].

With increasing speed and dynamic requirements, potentials are shifted from series to powersplit and series/parallel concepts respectively and finally towards pure parallel powertrain concepts. Besides the above-mentioned functional requirements that are directly related to customer value, the system choice depends on the known and future legal boundary conditions. A future powertrain system needs to show scalability of electric power / energy on the one hand and of the used ICE technology on the other hand. This allows the use in various applications as well as robustness related to future real-world fuel consumption targets.

Further reduction of CO₂ targets raises the need for plug-in solutions and further increase of electric power and battery capacity in order to extend the electric drive share. As the achievable CO₂ reduction of plug-in hybrids in real life strongly depends on the usage and driving range and profile further efficiency optimization of the ICE is essential as well.

Further tightening of emission targets requires increased electric energy and a precise calibration of the ICE operating strategy and its exhaust aftertreatment systemFurther limitation of the deviation between test cycle and real-world consumption requires a change in system architecture and ICE technology packages.

The additional technologies and systems required for electrification add cost to the powertrain which can be partially balanced by simplification of the ICE itself. The ICE remains a cost-effective power source and a key component of integrated powertrain systems with the degree of electrification adapted to the specific application.

2. Hybridized powertrain configurations

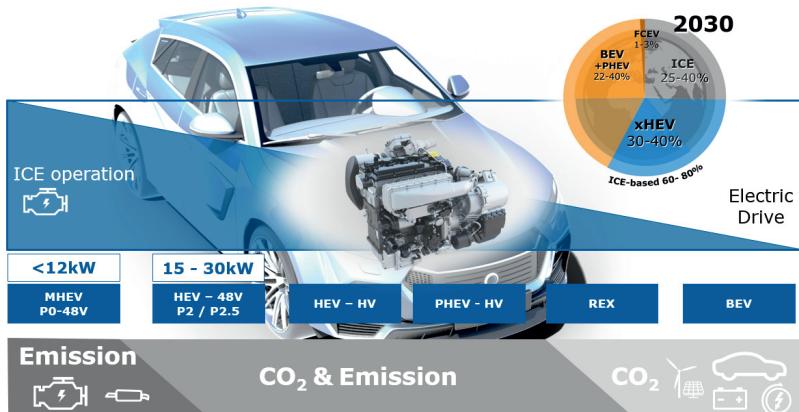


Fig. 2: Degree of powertrain electrification

Figure 2 illustrates the range of electrification solutions from pure ICE, via increasing hybridisation to pure BEV. In reality, the current baseline is an ICE with a 12V stop-start system. Increasing the voltage, enables higher power and energy recuperation during deceleration and braking events, increases the power available for torque assist during acceleration and permits the electrification of base engine pumps and auxiliary drives. A 48V architecture already provides considerable electric potential (for example, use of efficient e-pumps and e-Turbocharger), without the additional cost and complexity arising from HV safety requirements. Implementation as a P0 system by exchanging the 12V alternator for a 48V Belt Starter Generator (BSG) represents a cost effective approach to meet future emission legislation [5, 6].

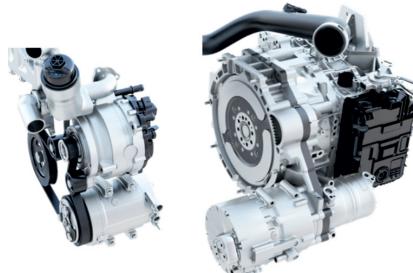


Fig. 3: Electrification Variants 48V - P0-BSG as well as P2-module with conventional transmission [5, 6]

The next level in powertrain electrification is a P2-configuration, still remaining at the 48V level. The parallel configuration as shown in Figure 3 allows the integration in transverse installations, usually very sensitive regarding overall powertrain length.

The configurations with increased electrical performance allow replacement of mechanical functions by electrical solutions, as well as extended recuperation capability, torque assist and load point shifting of the ICE. Because the e-machine is decoupled from the ICE Crankshaft, full electric drive can be implemented even with 48V, at least in short range city operation [6, 7].

The simplification of the ICE auxiliary drive as well as enhanced demand control lead to increasing electrification of power steering, vacuum pump, coolant pump, oil pump and A/C-compressor. A beltless ICE without auxiliary drives is a consequent route in hybrid powertrains [6, 7].

Integrating the e-Motor into the transmission architecture allows integration of electrical and mechanical functions in P2 or P2.5 architectures, thus achieving savings in package volume and weight.

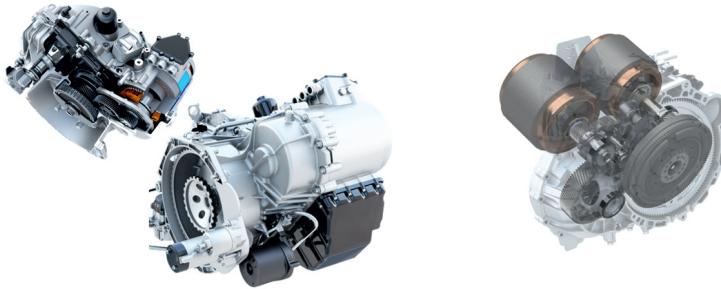


Fig. 4: DHT solutions with 1 e-motor and 2 e-motors

For further increasing electrification range and driving power a shift to high voltage is needed to limit the electric current and increase electrical efficiency.

AVL has developed a modular 1-E-Motor-Hybrid transmission family, allowing the integration of 48V, as well as HV-e-motor solutions, shown in Figure 4 left side [8].

Further improvement in electric performance and efficiency is achievable with 2-e-motor-solutions for a Dedicated Hybrid Transmission (Figure 4 right side) combining cost effective transmission technology with higher electric efficiency in particular in the part load area and as a consequence increased fuel consumption reduction potential.

3. The ICE in HEV Powertrain - CO₂ Reduction Potential

The optimisation of the ICE operation is highly influenced by the powertrain configuration as well as by the characteristics of the ICE itself. When comparing typical hybrid configurations equipped with today's ICE technology with the same architectures equipped with dedicated hybrid engines huge differences can be seen.

For today's engines – characterised by a rather narrow speed and load band with good efficiency – the various architectures show significantly different fuel consumption potential in WLTP. The spread of fuel consumption reduction of these hybrid architectures are shown in Figure 5.

The variation parameters are electric power and gear ratios. The lowest consumption for today's engines is achieved by a powersplit architecture (PS) that can concentrate the operation range of the ICE best in the area of optimum efficiency due to its electric CVT mode. On the other hand PS architectures show disadvantages in highway driving and towing.

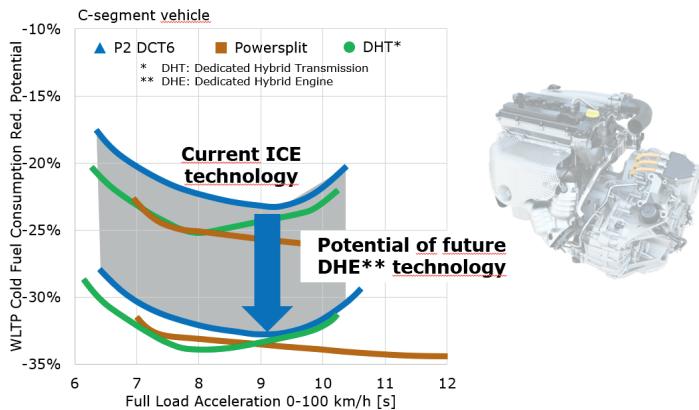


Fig. 5: HEV CO₂ reduction potential with conventional ICE and DHE [3]

If future dedicated hybrid engines are introduced, which are characterised by a better overall efficiency and a wider load / speed area of good efficiency, the differences between the architectures are getting smaller at significantly lower fuel consumption level than the best values achieved with today's engine technology. Dedicated hybrid engines thus allow further CO₂ reduction and reduce the effect of the implemented architecture on fuel consumption. The CO₂-reduction potential of different hybrid configurations, such as parallel hybrid, powersplit or other dedicated hybrid transmissions is on a quite comparable level in this combination.

Beside CO₂ reduction other factors such as performance, drivability and cost are decisive for the determination of the powertrain configuration as well.

The left diagram in Figure 6 shows a typical torque curve of a TC engine in an ICE-only application. The engine has to be capable of high low speed torque and fast transient torque build-up, in order to give a satisfactory driveability. A high torque plateau allows a transmission matching and shift strategy to be developed for either highest performance or highest efficiency. The engine has to be capable of operating in a wide speed-load map to cover all potential operating conditions.

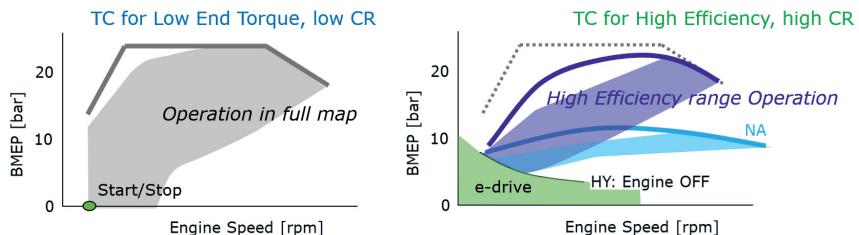


Fig. 6: Engine map comparison – conventional TGDI engine layout versus hybrid engine
TC and NA

The diagram on the right side shows how the e-drive capability modifies the demand on the engine. Compared to the standard powertrain the low load points are either moved to higher loads by load point shifting or even purely electrically driven. The low end torque area is electrically supported too, reducing the ICE torque demand (dark blue curve). This eliminates an ICE operation area which is critical for both TC layout and knock as well as preignition sensitivity, and allows a higher compression ratio as well as a TC match oriented to a larger turbine with higher efficiency. The shape of the torque curve becomes similar to that of the naturally aspirated engine (light blue).

The operating area of the ICE is reduced to focus on the BSFC-minimum area.

Improvements in Brake Thermal Efficiency (BTE) in this range of operation then translate more directly into vehicle FC-reduction, than is the case with ICE-only powertrains.

The hybrid system itself further improves the overall efficiency through utilisation of recuperation energy used for electric drive portions.

Thus, the integration of the ICE with high voltage powertrain systems allows the overall strategy to be selected to maximise the overall powertrain efficiency, while maintaining or improving the vehicle performance experienced by the customer.

4. The dedicated ICE for High Voltage-HEV and PHEV

The performance requirements described above for the ICE can be achieved in several different ways. The optimum choice for a particular application will depend on the other boundary conditions such as vehicle packaging, customer acceptance, relation to an existing engine family concept, or overall cost target [9].

Focussing on the powertrain variants with high voltage electrical machines (columns E1 and E2 in Figure 21 and Figure 22), with an 80-100kW electrical machine, the required ICE power output will be – depending on the vehicle size – around 75kW to 100kW. The Table below summarises several different potential solutions for these applications:

Table 1: Dedicated hybrid engine variants and power requirement [12]

Engine Capacity	1.5L			2.0L		2.5L
Charging	NA		TC		NA	TC
kW/l @Lambda=1	45-50		70-75		50-55	70-75
kW ICE	70-75		100-112		140-150	112
Market	China			Europe		
Application	B/C Car / SUV		C/D Car / SUV			Premium/ Performance
No. Of cylinders	3	4	3	4	4	4
Cylinder Volume	0.5	0.375	0.5	0.375	0.5	0.625

Taking the C/D class SUV as an example, an ICE power demand of around 100-110kW is required to allow continuous high speed highway driving without depleting the HV battery. In the US or Japan this range of output would traditionally be met with a large, naturally aspirated engine. For the Chinese market, on the other hand, with its sales tax incentive based on cylinder capacity, the 1.5L TC engine is an attractive solution.

For engines with 2.0L displacement or above, four cylinders remain the basis. But for the 1.5L class, the decision between 4 and 3 cylinders is less clear. Often this decision is driven by end-consumer preferences.

4.1. Dedicated Hybrid Engine Configurations – Swept Volume vs. Charging System: TC or NA

Current high volume NA engines typically achieve a rated output of around 55 kW/l, but considering future emissions requirements mandating full-map stoichiometric operation, this is expected to drop. Running with Atkinson cycle and very low mechanical friction, such an engine demonstrates a best point BTE up to 42% The 100kW vehicle requirement can be met with a capacity of at least 2,0L. However the area of best efficiency is limited by air flow. In comparison, the TC-engine broadens this band towards higher loads by efficient boosting. This means that the TC engine requires less support from the hybrid system to stay within the optimum efficiency band.

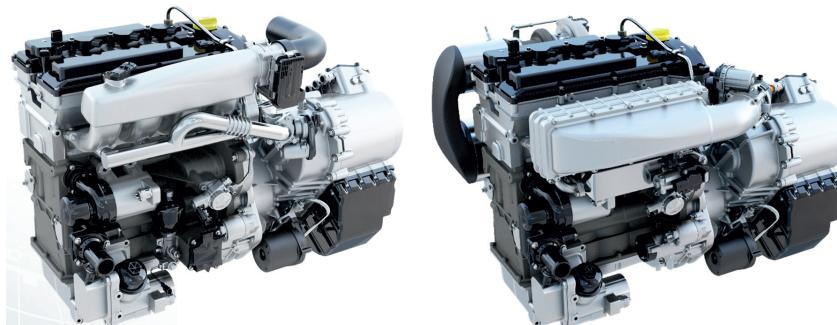


Fig. 7: Engine Features of the 2,0L-I4-Atkinson-NA and the 1,5L-I4-Cylinder Miller Hybrid Engine Variants

A typical TC engine layout for ICE only or mild hybrid operation has considerably higher friction than an NA engine of the same size. One main contribution to that is the higher cylinder pressure at low engine speeds, which represents a critical condition for the conrod bearings and in turn determines the sizing of the crankshaft bearings and thus their friction contribution.

With the torque curve of a DHE engine, eliminating the low end torque requirements and optimizing the TC layout for highest efficiency, in combination with quite moderate specific power, these demands are reduced and it is possible to design the cranktrain with a friction level only slightly higher than that of the NA engine.

4.2. Impact of cylinder displacement - I3 versus I4

The moderately boosted TC engine allows to achieve the best values in terms of overall BTE at given cylinder displacement under the boundary condition of lowest friction and efficient boosting. On the other hand, increased cylinder volume correlates positively with increased thermal efficiency, due to a favourable surface/volume ratio resulting in a reduction of wall heat losses. Hence, for a given total displacement a smaller number of larger cylinders is favourable for the overall efficiency. That fact is valid especially for smaller cylinder displacements. Therefore for the 1.5L TC engine a move from 4- to 3-cylinders represents a logical next step. Figure 8 shows the regression over the cylinder displacement and indicates the differences in the achievable efficiency based on similar combustion technology level and identical mechanical efficiency. Replacing the 1,5L-4-cylinder with a BTE of 42% by a 3-cylinder with 0,50 l/cyl will result in a BTE of more than 43% with equal technology and friction level. Acheiving the same friction requires detailed consideration during the layout of the cranktrain system.

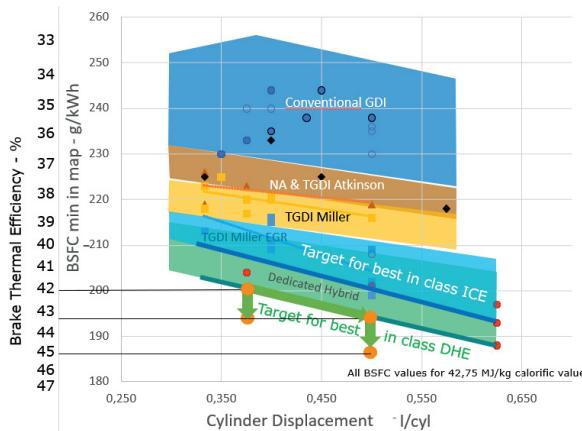


Fig. 8: Regression line - BTE over cylinder displacement

In a conventional ICE-Powertrain the acceptance of the 1.5L TC engine has been somewhat limited on many markets due to concerns about NVH impact of the higher torque fluctuations and free mass moments (and respectively, the additional cost of NVH mitigation measures). For application as a Dedicated Hybrid Engine however, these concerns diminish in importance as the engine is not running in the low end torque operation and thus in the range of high torque fluctuations. The free mass moment can be reduced in its effect by limiting the maximum

engine speed. Thus elimination of the mass balance shaft can be considered, giving a benefit in cost and mechanical friction.

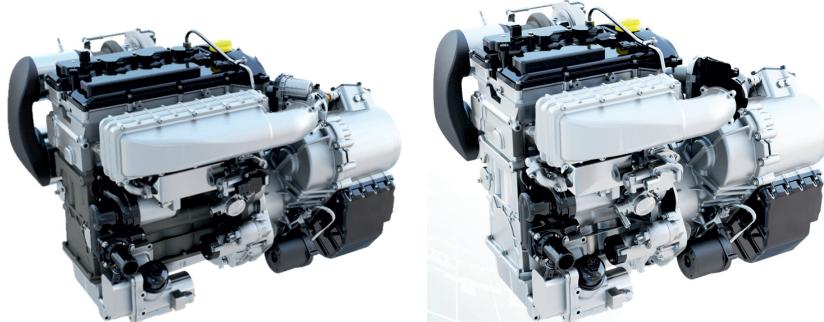


Fig. 9: Comparison of the 1,5L-I4-Cylinder and the 1,5L-I3-Cylinder Miller Hybrid Engine Variants

The separation of the exhaust pulses with 3 cylinders furthermore promotes high gas exchange- and TC efficiency without separation of exhaust lines as required on the 4 cylinder engine.

The reduced package dimensions of the 3 Cylinder, especially the axial length, is an obvious benefit in transverse powertrain installations. For a 1.5L engine this is in the order of magnitude of 50mm allowing the integration of hybrid modules without additional vehicle measures.

4.3. Main System Definition for Dedicated Hybrid Engines

Based on the different operating regime of a DHE engine in combination with a HV-hybrid system, compared to a Mild Hybrid or ICE only application, the priority of the evaluation criteria for concept choices should be reevaluated (Figure 10).

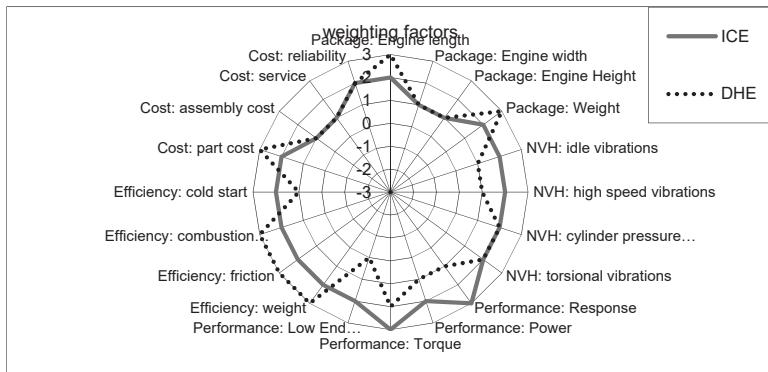


Fig. 10: Evaluation Criteria and weighting factors for ICE/DHE applications

For example, the transient response and low end torque have top priority for an ICE-only application, whereas for the HV-hybrid application, the efficiency, friction and weight are more important. As part of a hybrid powertrain, the DHE is particularly challenged in terms of engine length – assuming coaxial placement of the hybrid transmission – as well as weight.

Conscientious use of these evaluation criteria can be used to find an optimum architecture, system by system, for a dedicated hybrid engine.

4.3.1. Cranktrain Layout

Since the cranktrain remains the main source of engine friction (>60% of motored FMEP, Figure 11) the design is focused on minimizing the friction; the weight is a second major consideration.

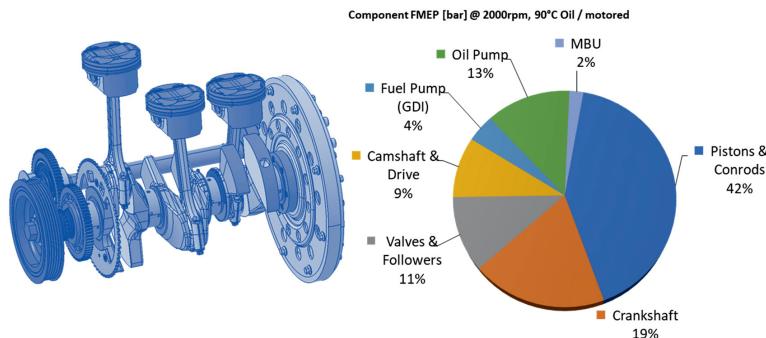


Fig. 11: Engine FMEP Breakdown based on 3-Cylinder DHE engine

The choice of main and crankpin bearing dimensions is one of the main design parameters affecting the friction. The use of a forged steel crankshaft allows to minimize the diameter of the bearings, while maintaining the bending and torsional stiffness required for satisfactory NVH behavior. The most critical operating points for the bearing system in standard ICE-only engine on the one hand are around the low-end torque, where the combination of high cylinder pressure and low rotational speed gives the lowest oil film thickness. On the other hand critical conditions occur at high speed, high load operation where the oil temperature approaches its limit due to frictional heating (Figure 12). For the modified torque curve of a dedicated hybrid engine, the bearing layout can be reoptimized since these operating conditions are outside the relevant operating range. With this approach the crankshaft friction of a turbocharged DHE can be reduced to values very close to that of a naturally-aspirated engine.

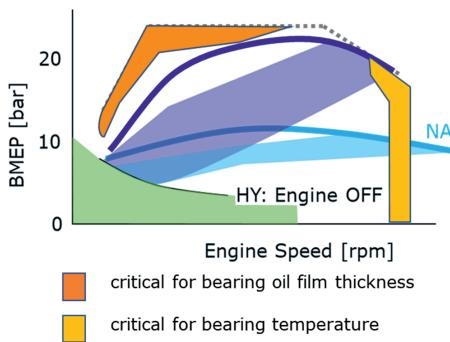


Fig. 12: Reduced crankshaft dimensions by avoiding critical map areas in DHE

Figure 13 shows typical layouts for DHE Crankshafts, with 3 and 4 cylinders, based on a common total engine capacity. The very slender layout of the bearings, with negative overlap of main and pin journals, can be clearly seen. The 4 cylinder has more bearings of smaller dimensions; the overall friction of both systems is very similar.

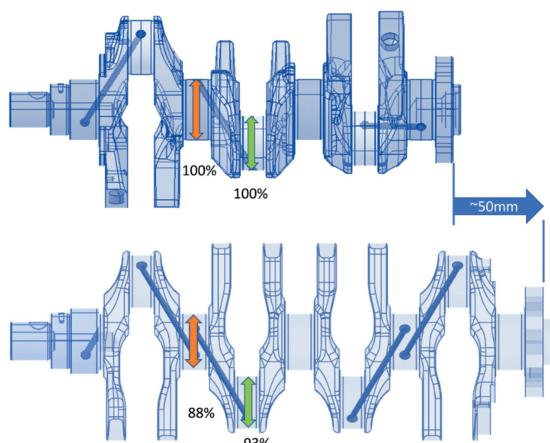


Fig. 13: Comparison of 3- and 4-cylinder crankshaft layouts for DHE application

The 3 cylinder version is approximately 50mm shorter; the weight of the two designs is similar due to the larger counterweights on the 3 cylinder engine.

For the moderate specific power ratings of the DHE engine, a cast aluminium piston is sufficient, with piston crown geometry specifically optimized for efficient combustion despite the increased compression ratio. As for ICE-only applications, the specifications of the piston rings with minimum total preload is a key parameter; a layout with 3 piston rings still remains the best compromise between friction, oil consumption and blowby control.

Fracture split forged steel or sintered conrods are typically optimized to the load level of the engine family variants. Use of high strength alloyed steel and bushless small end with DLC coated piston pin allow the mass of the conrod to be reduced significantly. This also reduces the 2nd order mass forces, and thus the size of the counterweights on the crankshaft and mass balance shaft.

As the DHE does not require an auxiliary drive belt or crankshaft pulley, locating the torsional vibration damper inside the engine crankcase allows elimination of the front crankshaft seal and thus an additional source of mechanical friction. Solutions for dampers running in the engine oil are currently seen as more expensive than traditional rubber dampers and have therefore not yet gained wide acceptance.

4.3.2. Mass Balancing System

In ICE-only applications, mass balance shafts are typically required for 4-Cylinder engines of 2.0L and above, and for 3-Cylinder engines, above 1.0L capacity.

The use of roller bearings for the balance shafts is already established as standard, leaving a rather small friction penalty of less than 0.01 bar FMEP for a 3-Cylinder engine with a single 1st order balancer shaft.

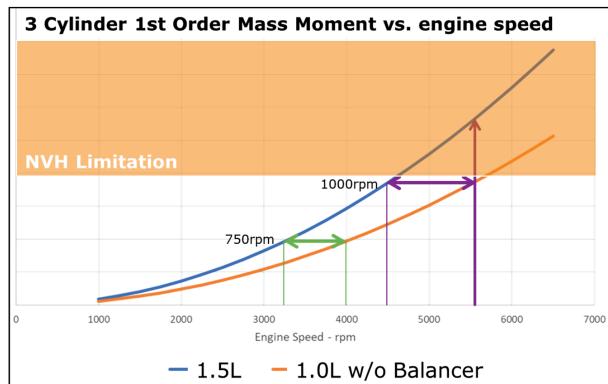


Fig. 14: 1st Order mass moments without balance shaft – 1.5 vs. 1.0L engine

For DHE application, elimination of the balance shaft to gain further efficiency could be considered. Taking a 3-cylinder 1.5L engine for example, Figure 14 illustrates how downspeeding of engine operation by 750-1000rpm in the main operation range, can result in a reduction of the resulting mass moments of the 1.5L engine to the same level as a 1.0L engine. A turbocharged DHE with rated speed reduced below 5000rpm could therefore benefit from the reduced mass vibrations.

4.3.3. Cylinder Block

The choice of cylinder block structure is fundamental to the definition of any engine family. The selection of material, manufacturing concept, and key dimensions such as bore pitch, interact with one another. Detailed investigation of several trade-offs to find an optimum design depending on different boundary conditions lead to a variety of different configurations which can be found in current production engines (Figure 15).

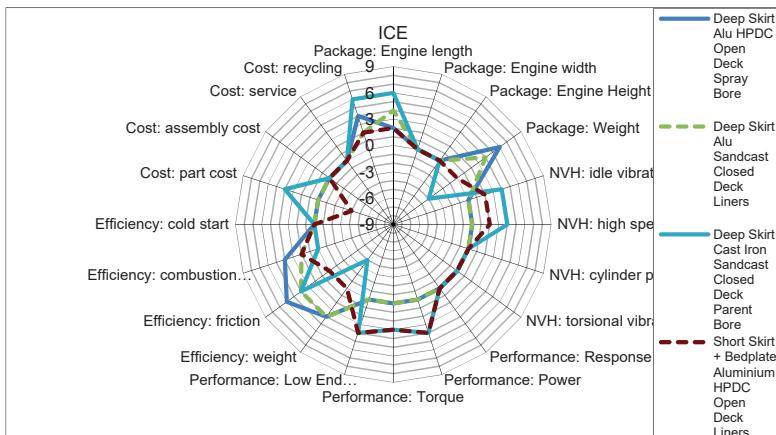


Fig. 15: Concept Evaluation of Cylinder Block structure

A DHE variant based on an existing engine family or production facility can carry over the basic architecture and main dimensions. In this case optimisation of the main parameters affecting the efficiency have to be considered as incremental improvements on the basis, For example, improvement of cylinder bore distortion and honing process; reduction of main bearing diameter or local improvement of cylinder cooling.

For a stand-alone DHE, or a new engine family including a high proportion of hybrid applications, the ideal cylinder block concept can be defined, using the modified evaluation criteria shown in Figure 10.

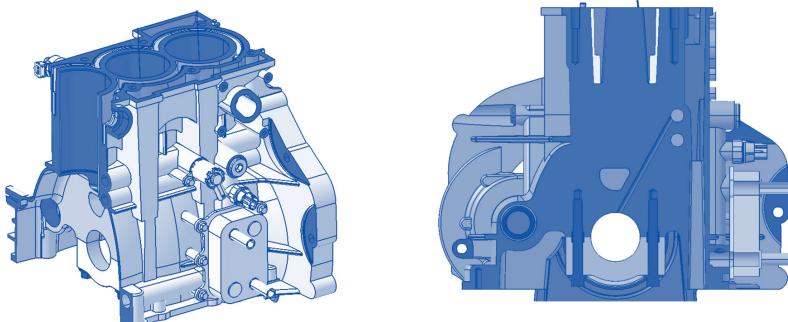


Fig. 16: Cylinder Block structure for DHE

A deep-skirt architecture with single bearing caps is selected because of its stiffness characteristics. The skirt, reinforced by a structural upper oil pan, supports the flange to the hybrid transmission, resulting in a high global bending stiffness of the power unit. At the same time, the individual main bearing supports are relatively flexible in axial direction, allowing them to conform under the bending moments from the crankshaft. This avoids edge-loading of the bearings. This architecture is also lighter overall compared to a bedplate structure, given the relatively low peak cylinder pressures of the DHE application.

The cylinder running surface is spray-coated, giving a weight saving compared to a cast-in liner as well as allowing a reduction in bore bridge width and hence engine length. The spray coating is meanwhile an established mass production process. Its defined porosity creates an oil retention volume, allowing very smooth final honing of the bore, a further benefit for friction. The block water jacket is an open deck design, feasible for a high-volume die casting process. An insert in the water jacket reduces the total coolant volume to ensure faster warm up. Figure 17 summarises the weighted ratings for this concept, and compares it with an alternative concept with bedplate and cast-in liners which is more suited to highly-loaded ICE only applications.

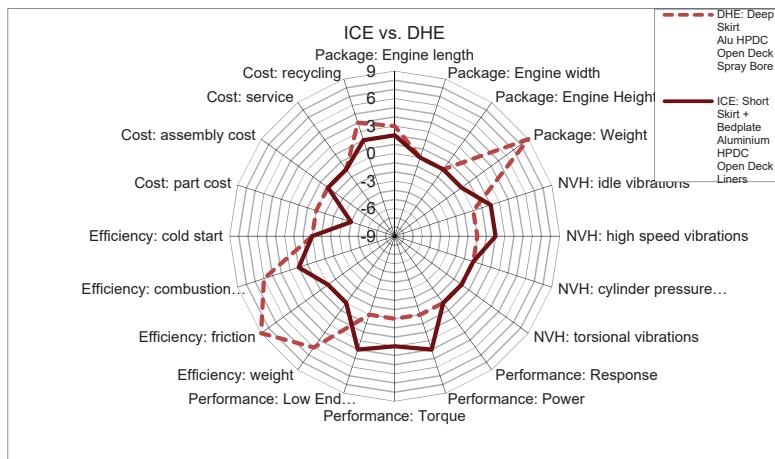


Fig. 17: Concept Evaluation of 2 competing Block concepts

4.3.4. Head & Valvetrain

The cylinder head is designed around four valves per cylinder and central spark plug; in order to provide a compact combustion chamber geometry with high compression ratio, the valve angles are steeper than for previous designs. The area between the valves is design protected for a passive pre-chamber integrated in the spark plug. The high CR is more sensitive to variation in combustion chamber volume; machining of the combustion chamber surfaces reduces the tolerances and reduce the surface roughness in order to minimize heat losses.

The roller finger follower valvetrain is arranged for minimum friction with trailing followers on both sides (Figure 18). Intake ports are designed for high tumble generation over the full valve lift. Apart from its benefits in friction, the RFF system is best suited for achieving the necessary valve opening acceleration to support Miller combustion with reduced opening duration.



Fig. 18: Cylinder Head and Valvetrain

A future package of measures for improving BTE towards 45% includes a “Thermoswing” coating for the combustion chamber, including cylinder head and piston crown, to reduce the net heat transfer.

The Exhaust Manifold is integrated into the cylinder head and water cooled. The catalyst (NA engines) or Turbine housing for TC engines, is flanged directly to the cylinder head. Depending on the number of cylinders and specific power requirements of the engines – especially NA engines, an exhaust pulse separation is made from the combustion chamber up to the cylinder head flange (Figure 19). An insulating coating on the inside of the manifold is a future potential measure to reduce heat transfer. Especially for E-turbo usage a reduced heat transfer can enable better electric power generation by the e-turbo's e-motor used as generator. Such coating needs to be balanced with the Lambda=1 capability of the engine.



Fig. 19: Integrated exhaust manifold for 3- and 4-Cylinder engines

4.3.5. Engine Cooling

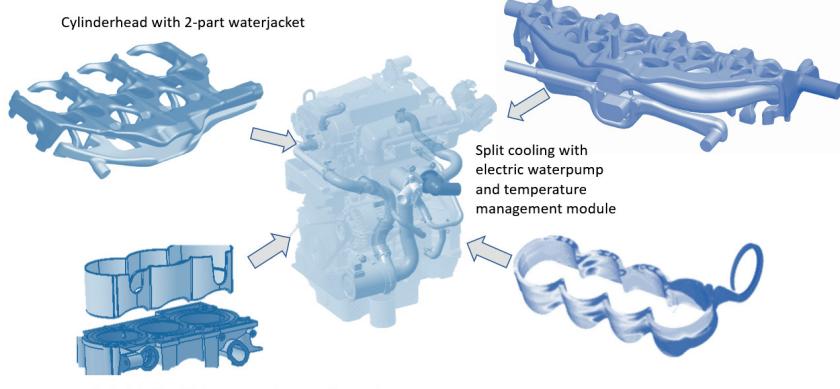


Fig. 20: Cooling system of 3-Cylinder and 4-Cylinder DHE variants

An electric water pump, supplying the minimum possible coolant according to engine cooling demand and independent of engine speed is a prerequisite. Electronic control of coolant and monitoring of component temperature allows the split cooling system, with minimized overall pressure drop through cylinder block and head, to adapt the temperature to the demands of the engine operation (Figure 20). For maximum efficiency the cylinder head should be kept cool to extend the window of knock-free combustion whilst the cylinder liner temperature will be higher, for reduced piston friction.

5. Production and Cost Impact

5.1. Modular Engine Families

As already shown in previous publications [9, 19, 11, 12], the power range of vehicle platforms can conveniently be covered by a modular powertrain family including different engine, transmission and electrification blocks which can be combined intelligently with one another. The ICE element of this family is ideally based around a common cylinder unit, with a basic

architecture defined for high combustion efficiency and low parasitic losses; and variations in terms of turbocharging, valvetrain module, or other add-on technologies to adapt to the specific application. In practice, the main cylinder unit sizes are 0.5L and 0.375L, representing 2.0L and 1.5L 3 and 4-Cylinder engines as fundamental building blocks. Most OEMs have engine families based on one or the other of these units; very large manufacturers may have both in parallel. Figure 21 and Figure 22 show exemplary Modular Powertrain families based on these.

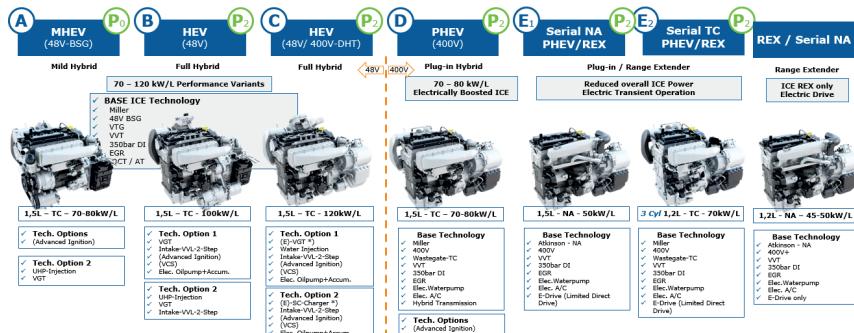


Fig. 21: Modular Powertrain Platform based on 1,5L-I4 engines

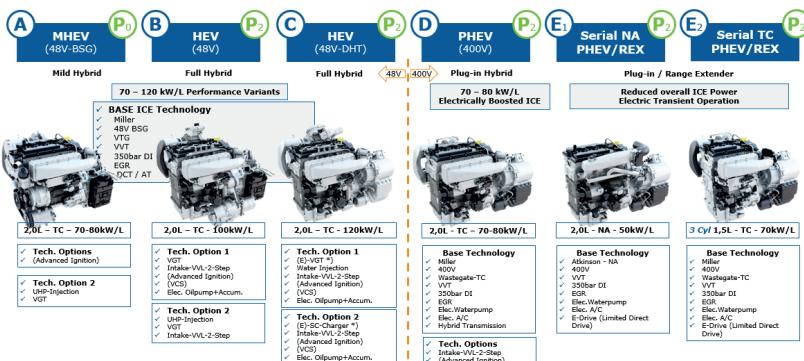


Fig. 22: Modular Powertrain platform based on 2,0L-I4 engines [18]

The technology options of the ICE in low voltage micro- or mild hybrid powertrains include variabilities on valve lift and timing as well as on the turbocharger to cover the full map transient operation one hand and full load performance of higher power ratings on the other hand. With increasing electric performance a significant reduction of variabilities on the ICE is acceptable.

5.2. Contribution of structural Castings

The conventional automotive ICE features a number of large, structural cast components. The Cylinder Block and Cylinder Head are the key components and particularly demanding in terms of design and casting process because of the complex geometry due to integration of fluid transport (coolant, lubricant and combustion gases), multiple sealing interfaces, and areas of very high mechanical and thermal loading. Further cast components like oil pans and timing- or flywheel covers typically combine sealing and fluid transport functions with structural requirements, contributing to the overall powertrain stiffness and providing a load path for the powertrain mounts, for example. For a typical 2.0L 4 Cylinder engine weighing 150kg, the mass of large structural aluminium castings is in the range of 40~45 kg.

The masses of Clutch and Transmission housings represent a further 8~10 kg.

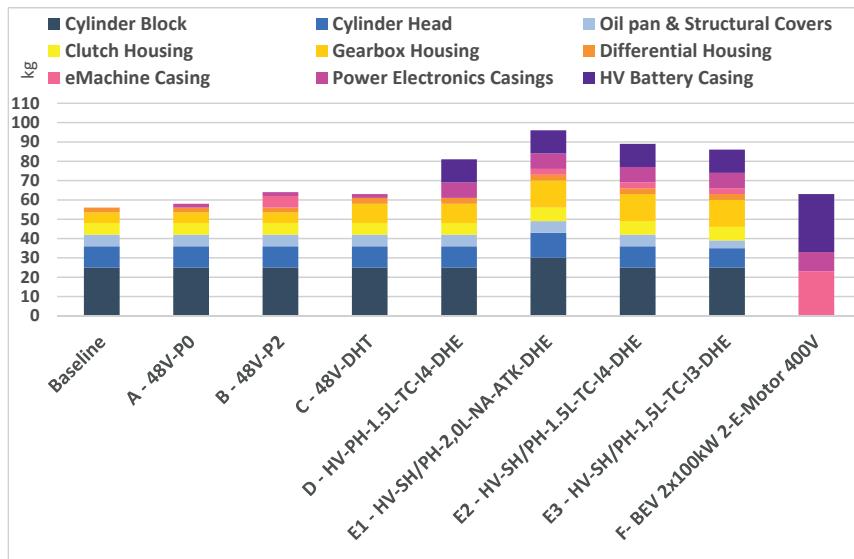


Fig. 23.

The contribution of structural castings, within electrified powertrains are significantly different to conventional powertrains as illustrated in Moving from the conventional ICE as Basline, the step to 48V Hybridisation introduces an additional P2 Module with a cast aluminium housing for the e-Machine as well as the required power electronics. Integration of the e-Machine into a Dedicated Hybrid Transmission shifts the weight from a separate housing into an integrated and structurally optimized design.

Moving to High Voltage (HV) PHEV solutions, the higher requirements on structural integrity for the HV Battery and the housing of the Power electronics demand additionl cast components in the range of 25~30 kg based on 400V and 2kWh.

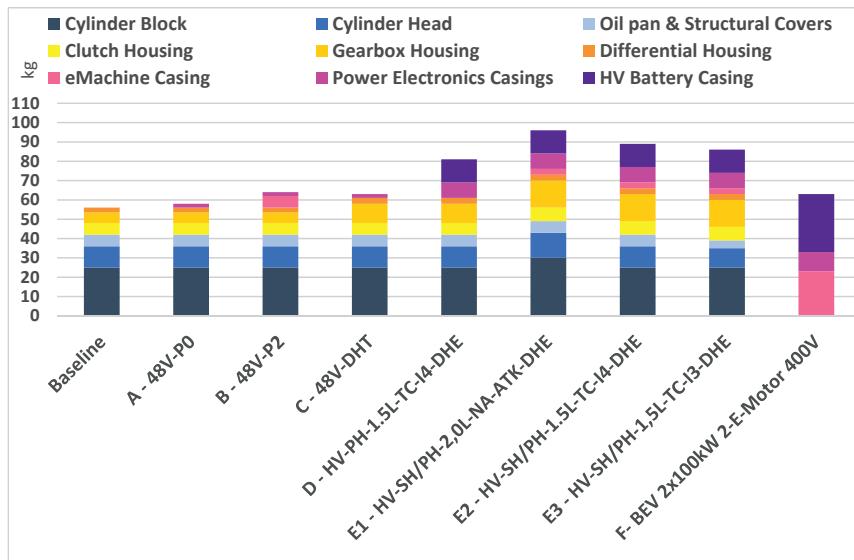


Fig. 23: Mass of Structural Aluminium castings

With a shift from Hybrid to fully electric BEV, the ICE is obviously no longer required, however the significant increase in the power output of the electric drive units (EDU) and required size of the HV Battery, as well as the safety critical packaging of the battery itself under all crash load cases, lead to increasing mass of lightweight structural castings on the battery and power electronics components.

The overall mass of Aluminium Castings in the Powertrain System of a Compact class BEV is therefore on a comparable level to current conventional ICE-Powertrain with I4-TGDI engine and MT or DCT-transmission.

5.3. Powertrain Cost Impact

The trade-off between add-on cost and CO₂ savings on one side and robustness regarding RDE-requirements on the other side is an essential factor for the final selection of the optimum technology packages.



Fig. 24: Comparison of 2,0L-NA and 1,5L-I4 and -I3 TGDI hybrid engine variants

In Figure 25 the cost for different powertrain architectures and technology packages leading to comparable system power levels are visualized.

The Baseline engine is a 2020 EU6d variant with 12V-BSG-Start Stop system and a DCT transmission. These cost blocks in the diagram represent the 100% line.

Starting point for each of the further hybridized variants is an EU7 emission compliant (full map Lambda=1) base engine together with a conforming aftertreatment system (again for expected EU7 targets).

On this basis cost for individual technology features targeting CO₂ optimization are added. Afterwards cost for different hybridization architectures are considered, starting with the electric drive unit consisting of transmission, e-motor and inverter. Finally battery, DC/DC converter, as well as wiring harness, connectors and control unit are summed up.

For the powertrain cost comparison the minimum battery size, required to utilize the whole recuperation potential of HEV-versions was considered to allow a comparison of the actual powertrain cost.

The large battery of PHEV-variants, also dependent on future tax regulations, significantly adds to the overall powertrain cost and is not calculated in the comparison.

In the following table the powertrain architectures and technology packages of Figure 25 are summarized.

Table 2: Powertrain architectures and technology packages considered for the cost comparison.

PT variant	Base	A	B	C	D	E1	E2	E3	E3-DHE44-45
Voltage level	12V	48V				HV			
PT architecture	MHEV P0	MHEV P0	HEV P2	HEV P2.5	HEV P2.5	HEV Serial/Par			
ICE Baseline (for full map Lambda=1 + EU7 emission legislation)	1.5L IL4 TGDI Miller DOHC; VVT; VTG; ext. EGR; mech.; WP; OP; VP	1.5L IL4 TGDI Miller DOHC; VVT; VTG; ext. EGR; mech.; WP; OP; VP	1.5L IL4 TGDI Miller beltless, DOHC; VVT; VTG; ext. EGR; mech. OP; el. WP, VP	1.5L IL4 TGDI Miller beltless, DOHC; VVT; VTG; ext. EGR; mech. OP; el. WP	2.0L IL4 NA Atkin Miller beltless, DOHC; VVT; ext. EGR; mech. OP; el. WP	1.5L IL4 TGDI Miller beltless, DOHC; VVT; VTG; TC; mech.; OP; el. WP	1.5L IL3 TGDI Miller beltless, DOHC; VVT; TC; mech.; OP; el. WP		
EAS system EU7	TWC+4WC closed coupled				TWC+4WC closed coupled; TWC under floor, el. heated catalyst				
CO ₂ optimization technologies		Intake-VVL-2-Step, ext. EGR				ext. EGR			EGR, Adv Ignition, Thermal Coatings
Transmission/ e-Drive	DCT/AT + P0 3kW	DCT/AT + P0 12kW	DCT/AT + P2 20kW	DHT 30kW	DHT 80kW	2-e-Motor DHT 100kW + 70kW Generator			
Battery	Lead 12V	Li-Ion 0.8kWh	Li-Ion 0.8kWh	Li-Ion 0.8kWh		Li-Ion 2kWh - for HEV electric driving range only			
DC/DC	Not applicable	3k6				3k6			
On-board charger		Not applicable				Not applicable			
Wiring harness/ connectors and HCU		48V wiring harness and connectors without additional safety measures			HV wiring harness, connectors and charging plug; considering safety measures (e.g., high voltage interlock loop, galvanic isolation, ground fault detection)				
System power	80kW/*1.5L	80kW/*1.5L + 12kW = 132kW	80kW/*1.5L + 20kW = 140kW	80kW/*1.5L + 30kW = 150kW	70kW/*1.5L + 80kW = 185kW	50kW/*2.0L + 100kW = 200kW	70kW/*1.5L + 100kW = 205kW		

Main boundaries for the cost comparison are:

- The presented cost data are calculated on BOM basis, components as delivered to the assembly line.
- Cost changes are calculated based on a volume of >300.000 units per year produced in 2025 in western Europe with an established suppliers base.

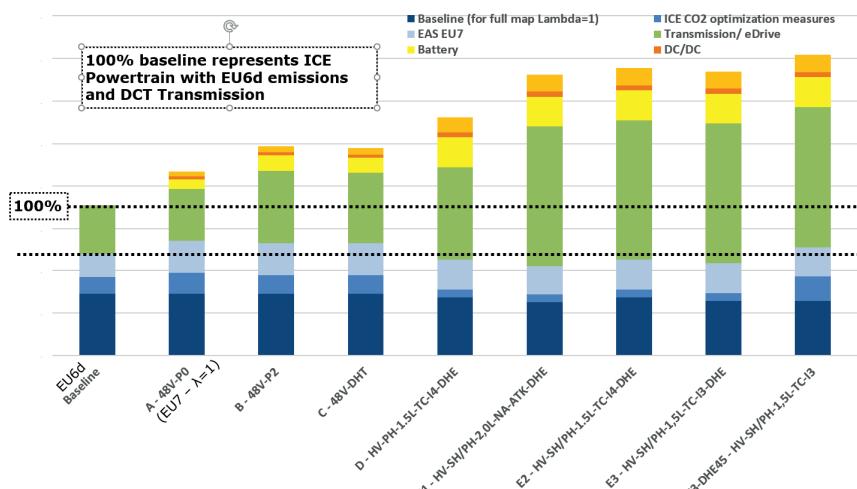


Fig. 25: Powertrain Cost and Technology Packages for different Hybridization variants
(battery size of HEV versions only)

The DHE version shown at far right side includes the expected add-on technology package required to achieve CO₂ efficiency towards BTE of 45% in the best area of the map, thus causing a considerable increase of the overall ICE cost contribution.

Although the target achievement of both CO₂ reduction and emission compliance are not exactly measureable in terms of benefit versus cost, all options considered, fall below the proposed penalty line for all vehicle segments investigated and so become potential options to meet future legislation targets.

However, the final selection of the most appropriate technology combinations for each particular OEM would perhaps also need to consider the main powertrain options for the respective vehicle lines.

6. Summary - Outlook

The increasing number of different PT architectures with partially complex hybrid solutions on one side and stringent fuel consumption and emission legislation on the other side are boundaries for future ICE development.

The competition of different technologies and variabilities, from electrified components, variable cam timing, variable valve lift, advanced boosting technologies, EGR, advanced ignition, high pressure injection up to even variable compression ratio, as well as add on measures such as e.g. water injection require significantly increased efforts in both development and investment for the OEMs.

An approach for an affordable lineup of powertrain versions is a modular common engine family architecture with common machining and assembly concepts, as well as the feasibility to integrate different technology packages

The powertrain family, as a reference in the paper based on a SUV platform, requires optimized targets for each individual variant, rather than a traditional common parts concept. The requirements on the ICE in hybrid powertrains are significantly different compared to that on an ICE only powertrain. So far a modular technology component box is the consequence to cope with future fuel consumption and emission limits, in particular when considering an uncertain distribution of variants in future vehicle platforms.

7. References

- [1] List, H.O.: Propulsion Systems in Transition. Vienna, 39. International Vienna Motor Symposium, 2018
- [2] Fraidl, G.; Kapus, P.; Mitterecker, H.; Prevedel, K.; Teuschl, G.; Weissbäck, M.: Internal Combustion Engine 4.0. Vienna, 39. International Vienna Motor Symposium, 2018
- [3] Kapus, P.; Ellinger, R.; Bogner, E.; Schrank, G.; Teuschl, G.; Sams, Ch.; Prochazka, W.; Fraidl, G.: Passenger Car Powertrain 4.x. Vienna, 41. International Vienna Motor Symposium, 2020
- [4] Küpper, K.; Pels, T.; Deiml, M.; Angermaier, A.; Bürger, T.; "Efficient Powertrain Solutions for 12V up to 800V" Graz, 27th International AVL Conference "Engine & Environment", 2015
- [5] Sorger, H.; Schöffmann, W.; Schöggel, P.; Hütter, M.; Krenek, T.; Fuckar, G.; Hood, J.; Graf, B.: Vehicle Integration of a new engine concept for 48 Volts – Opportunities for Efficiency improvement and optimization of the overall system complexity. Baden-Baden, 3. International Engine Congress 2016
- [6] Schöffmann, W.; Sorger, H.; Weissbäck, M.; Pels, T.; Kaup, C.; Brunner, M.: The tailored powertrain for 48V – Options for the Gasoline Engine – Chance for future Diesel Engines. Baden-Baden, 4. International Engine Congress 2017
- [7] Pels, T.; Davydov, V.; Ellinger, R.; Kaup, C.; Schöffmann, W.; 48V – where to place the e-machine ? Frankfurt, 11th International MTZ Conference on Future Powertrains, 2017
- [8] Andrašec, I.; Jeitler, B.: AVL's Future Hybrid X Mode - a modular hybrid transmission family concept for 12V, 48V, HEV and PHEV. 12^h International CTI Symposium Automotive Transmissions, HEV and EV Drives, USA, 2018
- [9] Schöffmann, W.; Sorger, H.; Fürhapter, A.; Kapus, P.; Teuschl, G.; Sams, C.: The ICE in the electrified powertrain – modular approach within a common platform between Cost and CO2 optimization. Baden-Baden, 6. International Engine Congress 2019
- [10] Howlett, M.; Krapf, S.; Enzi, B.; Schöffmann, W.: Modular Platform for Electrified Diesel-Powertrains in Light Commercial Vehicles and SUVs. MTZ 01/2020

- [11] Schöffmann, W.; Howlett, M.; Enzi, B.; Krapf, S.; Sams, C.; Wancura, H.; Weißbäck, M.; Sorger, H.: Future Diesel-Powertrain in LCV and SUV – electrified, modular platform with focus on Emission, Efficiency and Cost. Baden-Baden, 7. International Engine Congress 2020
- [12] Schöffmann, W.; Howlett, M.; Kapus, P.; Teuschl, G.; Ellinger, R.; Sams, C.; Barna, I.; Weihrauch, K.: The combustion engine in hybrid powertrains – highly efficient and cost optimized derived from modular platforms. Baden-Baden, 8. International Engine Congress 2021

Modulares Zylinderkopfkonzept für schnelllaufende Diesel- und Gas-Großmotoren mit Spitzendruckanforderung bis 330 bar

Kurt Schmidleitner, Gareth John Estebanez,
AVL-List GmbH, Graz, Österreich;
Simon W. Geib, Gienanth GmbH, Eisenberg (Pfalz)

Kurzfassung

Schnelllaufende Großmotoren im Leistungsbereich zwischen 500kW und 5MW sind - und bleiben auch in absehbarer Zukunft - eine der wichtigsten primären Energiequellen für dezentrale Energieerzeugung, die Schifffahrt, Öl- und Gasindustrie, im Schienenverkehr sowie für mobile Baumaschinen. Für die kommende Generation schnelllaufender Großmotoren stehen multiple Kraftstofftauglichkeit, Leistungsdichte und Energieeffizienz zukünftig mehr denn je im Mittelpunkt.

AVL hat hierzu eine universelle Zylindereinheit für unterschiedliche Motoren entwickelt, die den zukünftigen Ansprüchen von Zünddrücken bis 330 bar und Mitteldrücken bis 35 bar im Hochleistungsmarine- bzw. Notstromaggregate-Segment genügt. Durch ein modulares Zylinderkopfkonzept lassen sich sowohl Diesel als auch Gas Verbrennung mit aktiver Vorkammer darstellen. Um in einer modernen Motorbaureihe nicht nur das Hochleistungssegment abdecken zu können, sondern auch das preissensitive Segment von Grund- und Spitzenlast-Generatoren, lässt sich der Zylinderkopf auch in unterschiedlichen Materialien wie GJL und GJV darstellen. Dabei erlaubt das patentierte Zylinderkopfstrukturkonzept trotz geringerer Materialkennwerte von GJL Zünddrücke bis zu 250 bar.

Eine Weiteroptimierung der Zylinderkopfkühlung (AVL Advanced Top-Down Kühlung, TDC) ermöglicht zum einen, die geforderten Leistungsziele bei kleinstem Bauraum zu erreichen, und erlaubt es zum anderen, die aktive Ventilsitzringkühlung zu Gunsten einer verbesserten Ausfallsicherheit gänzlich zu eliminieren und gleichzeitig Produktionskosten gering zu halten. Gienanth als Gießereipartner übernimmt begleitend bei der Entwicklung sowie beim Guss des Zylinderkopfes hier eine führende Rolle und beschreibt im Beitrag die Herausforderungen der Gusskernherstellung, den Gussprozess bzw. Gießbarkeit von hochbelasteten Zylinderköpfen für unterschiedlichen Materialqualitäten.

Zusammenfassend zeigt der Beitrag wie mit fortschrittlichen Konstruktionsmerkmalen und frühzeitigem Einsatz von umfangreichen CAE-Techniken unter Einbindung der Erfahrungen

einer innovativen Gießereigruppe der Zielkonflikt zwischen steigenden Anforderungen und Kosten für die nächste Generation von schnelllaufenden Gasmotoren für flüssige und gasförmige Kraftstoffe gelöst werden kann.

Abstract

High-speed large engines in the power range of 500kW to 5MW are set to remain the most important primary power sources for decentral electric power generation, marine, oil- and gas industry, locomotives, and construction equipment.

In future the focus for the next generation of high-speed large engines will be laid on fuel flexibility, power density and efficiency more than ever.

For this purpose, AVL has developed a universal power cylinder unit for different engines that will meet future requirements of ignition pressures of up to 330 bar and mean effective pressures of up to 35 bar for the high-performance marine and emergency power generator segment. Thanks to a modular cylinder head concept, both diesel and gas combustion with an active prechamber can be realized. In order to be able to cover not only the high-performance segment in a modern engine series, but also the price-sensitive segment of base and peak load generators, the cylinder head can also be made of different materials such as GJL and GJV. The patented cylinder head structure concept allows peak firing pressures of up to 250 bar despite the lower material properties of GJL. A further optimization of the cylinder head cooling (AVL Advanced Top-Down Cooling, TDC) makes it possible, on the one hand, to achieve the required performance targets with the smallest installation space and, on the other hand, to completely eliminate the valve seat insert cooling in favour of improved reliability and at the same time to keep production costs low. As a foundry partner, Gienanth takes on a leading role in supporting the engineering and the casting of the cylinder head and describes the challenges of casting core production, the casting process and the castability of highly stressed cylinder heads for different material qualities. In summary, the article shows how the conflicting targets between increasing requirements and costs for the next generation of high-speed large engines for liquid and gaseous fuels can be resolved with advanced design features and the use of extensive CAE techniques, incorporating the experience of an innovative foundry.



Bild 1: modulare AVL Power Zylinder Einheit

1. Motivation

Während bei der Konzeptionierung einer Großmotorenfamilie für Schnellläufer immer schon auf unterschiedliche Anwendungen und deren Nutzungsraum sowie die Abdeckung eines möglichst breiten Leistungsspektrums durch unterschiedliche Zylinderzahlen Rücksicht genommen werden musste, klafft die Schere der konkurrierenden Anforderungen in Zukunft noch weiter auseinander. Zu einer hohe Leistungsdichte auf dem einen Ende des Spektrums und einer geforderten kostensparenden Effizienz auf der anderen Seite kommen neben der Forderung zur CO₂-Reduktion noch die Anforderungen der Kraftstoffflexibilität und der damit verbundenen Vielfalt an Verbrennungssystemen.

Entwickelt man - Stand heute - einen neuen Großmotor, der über einen Großteil seines Produktlebenszyklus wettbewerbsfähig bleiben soll, reicht es keineswegs aus, nur die aktuellen und kurzfristigen Abgasnormen zu erfüllen, sondern es sollten Technologiebausteine zur Verfügung stehen, die in Zukunft notwendig sein werden.

AVL hat hierzu eine universelle modulare Zylindereinheit für unterschiedliche Motoren entwickelt, die den zukünftigen Ansprüchen von Zünddrücken bis 330 bar und Mitteldrücken bis 35 bar im Hochleistungsmarine-, im Bergbau - bzw. im Stromaggregate-Segment genügt (Bild 1).

Vielfach geforderte CO₂-Reduktion kann kurzfristig teilweise durch weitere Effizienzsteigerung bei den noch weit verbreiteten Kraftstoffen wie Diesel und Erdgas erzielt werden.

Eine deutliche Verbrauchsverbesserung kann durch Einsatz von mehrstufiger hocheffizienter Aufladung und bei starker Miller Steuerzeiten erzielt werden (sehr früher Einlassschluß, damit lange Expansions-/Abkühlphase für die Zylinderladung). Bild 5 zeigt eine Lösung für die Steuerung eines variablen Einlassschlusses (bei unverändertem Einlassöffnen), dabei kann zwischen thermodynamisch optimierten Steuerzeiten für die Startphase, transienten Betrieb und Teillast, beziehungsweise Steuerzeiten für einen Miller-Prozess für mittlere und hohe Lasten mechanisch hin und her geschaltet werden.

- **Starting and transient acceleration**
The switching mechanism is activated.
→ Long duration cam follower extends the lift of the miller cam follower
- **Medium to high load operation**
the switching mechanism is deactivated

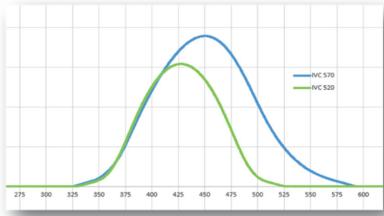


Bild 5: VIVT – Variabler Ventiltrieb für Miller-Timing, AVL Patent

Im Gegenzug erfordert der hohe Ladedruck hohe Zünddrücke, hohe Mitteldrücke sowie ein effizientes Abgas-Nachbehandlungskonzept. Den dadurch gesteigerten Reibungsverlusten und dem Zusatzgewicht muss mit entsprechender Reibungsoptimierung und dem Einsatz von höherfesten Materialien begegnet werden.

Langfristig kommen zur CO₂-Reduktion alternative Kraftstoffe wie Flüssiggas (LPG) und Methanol bzw. gänzlich kohlenstofflose Kraftstoffe wie Ammoniak oder Wasserstoff auf den Plan. Hierbei werden ebenfalls Verbrennungskonzepte mit hoher Aufladung und aggressivem Miller bzw. variablem Einlassschluss verfolgt, was wiederum durch die Zünddruckfähigkeit der Zylindereinheit unterstützt wird.

Einen Technologieüberblick liefert Bild 3.

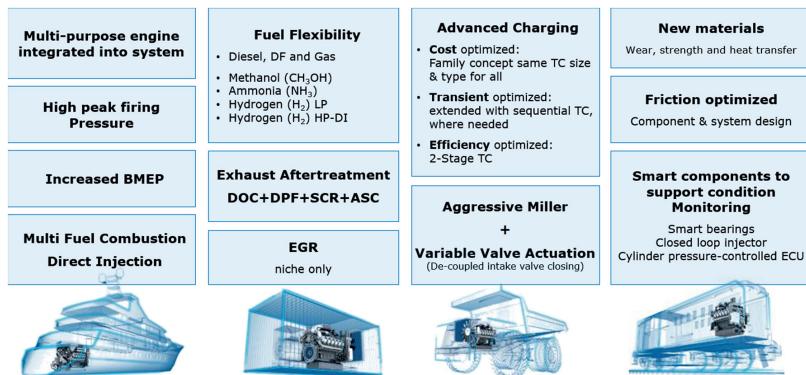


Bild 3: Zukünftig notwendige Technologien für Großmotoren

2. Der Ansatz

Die Kombination von AVL Technologie und dem Einsatz von modernen Fertigungsmethoden (Gienanth) ermöglicht nun ein modulares Zylinderkopfkonzept, das allen Anforderungen Rechnung tragen kann.

Die Modularität zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Gleicher Gussrohling mit leicht geänderter Bearbeitung für unterschiedliche Einspritz-Systeme; verschiedene Diesel Injektoren, aktive oder passive Vorkammer für Gasbetrieb bzw. alternative Kraftstoffe (siehe Bild 6).
- Mit Änderungen am Wassermantel (Kerntausch) bzw. geänderten Wandstärken lassen sich unterschiedliche Materialqualitäten abgießen, um für niedrigere bzw. weniger Zünddruck getriebene Anwendungen bzw. Kraftstoff eine kosteneffiziente Lösung in derselben Motorbaureihe anbieten zu können.

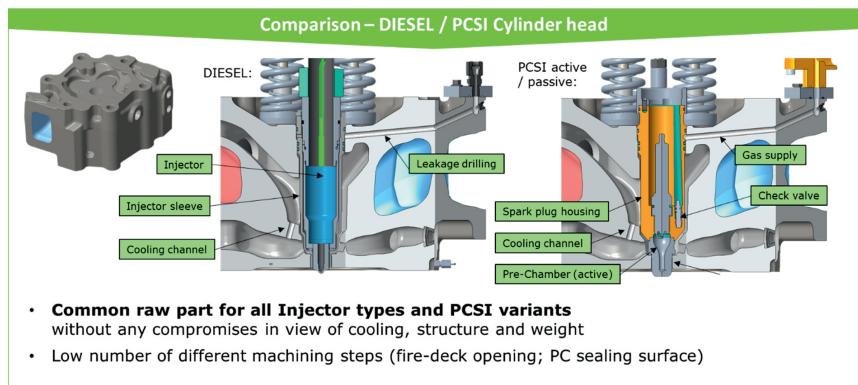


Bild 6: Diesel und Gas-Variante, gleicher Rohteil mit leicht unterschiedlicher Bearbeitung

Unterstützt wird diese Modularität weitgehend durch den 3D-Druck von Sandkernen speziell für kleine Losgrößen. Zum Zweck der Massenproduktion, werden die Sandkerne für die Eisengusskomponenten mit Kernschuss-Maschinen hergestellt. Abhängig von der Konstruktion benötigt dies zwischen drei bis sieben Minuten pro Kern.

Die Produktionszeit am 3D-Drucker ist naturgemäß sehr viel länger, allerdings benötigen die traditionellen Methoden Werkzeuge, die sehr komplex sind in der Herstellung und ebenso kostenaufwändig.

Daraus resultiert: für kleine Losgrößen können Sandkerne aus dem 3D-Drucker sehr viel wirtschaftlicher sein.

Wenn Zeit eine große Rolle spielt, dann können gedruckte Kerne innerhalb von Tagen bereitgestellt werden, während die Fertigung der Werkzeuge für eine Kernschuss-Maschine manchmal mehrere Monate in Anspruch nehmen kann.

3. Die konstruktive Lösung

Die Konstruktion stützt sich im Wesentlichen auf drei Kernelemente, die in der AVL entwickelt und zum Patent angemeldet wurden:

Die Implementierung der AVL Advanced Top-Down Kühlung und die Zylinderkopfstruktur samt optimierter Kraftübertrag, weiters durch die Anordnung der Ventile beziehungsweise der Kanäle relativ zu den Zylinderkopfschrauben.

Dies sind Schlüsselfaktoren für die Darstellung des modularen Zylinderkopfkonzeptes.

Lag das Zünddrucklimit früher bei GJL Materialien bei ca. 220bar, können dank der Top-Down-Kühlung und der Zylinderkopfstruktur bis zu 250 bar erzielt werden.

Bei entsprechend höherwertigem GJV-450 sogar Zünddrücke bis 330bar.

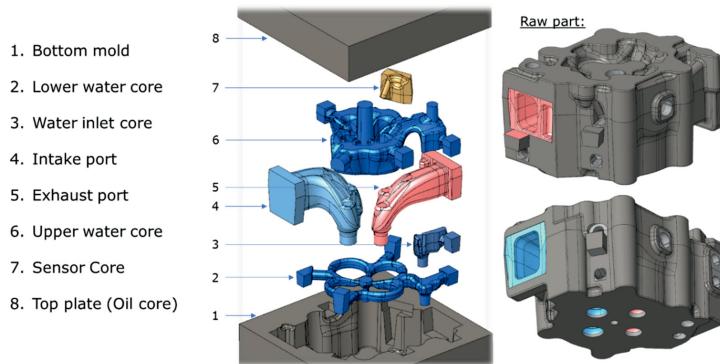


Bild 7: Kernkonzept für den modularen Zylinderkopf mit oberem und unterem Wassermantel

Das Kernpaket des Kühlwassermantel besteht, wie bei den meisten modernen Motoren aus einem unteren und einem oberen Wassermantel. Über einen separaten Wassereinlasskern wird das Kühlwasser vom Zylinderblock kommend aufgenommen (Bild 7).

Bei der AVL Top-Down Kühlung strömt das Kühlwasser zuerst in den oberen Wassermantel des Zylinderkopfes und von dort entlang der Einspritzdüsenhülse oder der Gasvorkammer über einen Ringspalt zentral in den unteren Wassermantel direkt auf das Feuerdeck. Durch diese Methode lässt sich zum einen die Verteilung der Wassermengen durch die Ventilsteg zielgenau steuern und zum anderen wird die Strömung auf die heiße Oberfläche des Feuerdecks gerichtet, dort wo es notwendig ist.

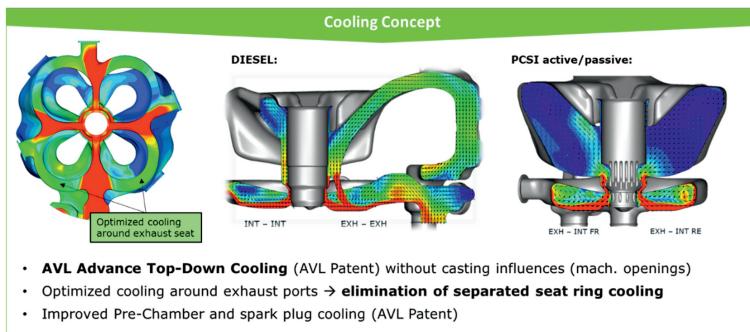


Bild 8: Optimierte AVL Top-Down Kühlung ermöglicht die Elimination der aktiven Sitzringkühlung

Bei der weiterentwickelten Top-Down Kühlung für einen zuverlässigen Betrieb unter hohen Zünddrücken wurde speziell in der Ventilbrücke zwischen den beiden Auslassventilen noch eine zusätzliche Kühljet-Bohrung eingeführt. Durch geeignete Anordnung dieser Bohrung kann nicht nur die abgeführte Wärmemenge erhöht werden, angefacht durch verbesserte turbulente Strömung über den gesamten Querschnitt der Ventilbrücke, sondern auch die Kühlung der Sitzringe über den Umfang bedarfsgerecht optimiert werden. Dies ermöglicht es wiederum, dass die aufwändige Sitzringkühlung entfallen kann. Damit werden nicht nur die mechanischen Bearbeitungsschritte vereinfacht und Produktionskosten reduziert, sondern auch die Systemrobustheit erhöht. (siehe Bild 8).

Neben der Bauteilkühlung wurde speziell die Zylinderkopfstruktur dahingehend optimiert, dass die Kraft am Feuerdeck, verursacht durch den hohen Zünddruck, möglichst gleichmäßig und effizient in die Schraubenbutzen eingeleitet wird, dabei stellt sich die Kombination aus verdrehtem Ventibild und sechs Schrauben pro Zylinderkopf als sehr günstig heraus, um die Kanalwände so zu integrieren, dass sie zur Steifigkeitserhöhung beitragen. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die Ventilbutzen möglichst von der Last tragenden Struktur entkoppelt werden, um unerwünschte Verformungen in den Ventilführungen zu vermeiden (Bild 9).

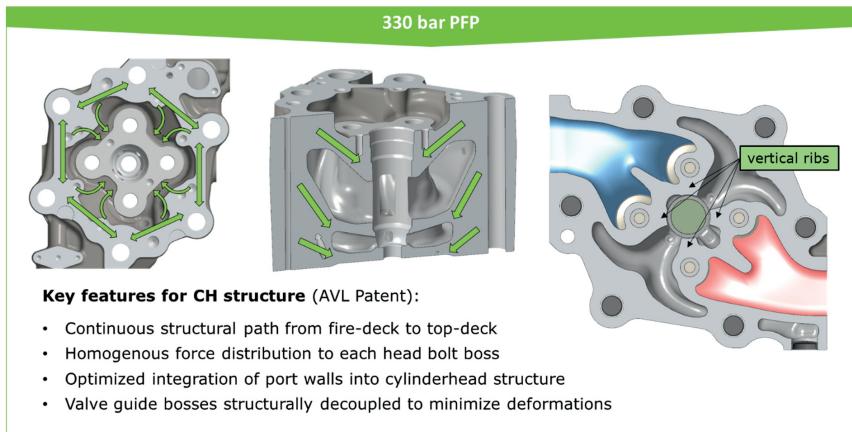


Bild 9: Kraftübertragungspfad für ein verdrehtes oder paralleles Ventilbild, AVL Patent

4. Fertigung und Erprobung

Die Fertigung der Prototypen Zylinderköpfe aus GJV-450 wurde von der Gießerei Gienanth im pfälzischen Eisenberg übernommen. Durch Füllungs- und Erstarrungssimulationen wurde während der Entwicklungsphase bereits der Gussprozess virtuell abgebildet und somit konnten gewonnene Erkenntnisse optimierend in die Konstruktion mit eingebracht werden (Bild 10). Bei der Auswahl der gedruckten Wasserkerne wurde der Fokus auf die Oberflächenqualität und das Kernmaterial gelegt. Insbesondere der untere Wasserkanalkern mit extrem kleinen Querschnitten waren produktionstechnisch herausfordernd. Ebenso war die Auswahl des Sandes essenziell für die erfolgreiche Realisierung, denn aufgrund der geringen Querschnitte sind die späteren Hohlräume für nacharbeiten nicht mehr erreichbar. Um die erforderlich hohe Anforderung an die Oberflächenqualität realisieren zu können, kam ein speziell synthetischer Sand mit sehr hoher Wärmeleiteigenschaft zum Einsatz. Hinzu wurde eine deziert für diese Anwendungen entwickelte Schlichte auf die 3D-gedruckten Sandkerne aufgetragen. Der Abguss der Prototypen Zylinderköpfe erfolgte anschließend im klassischen Handformgussverfahren.

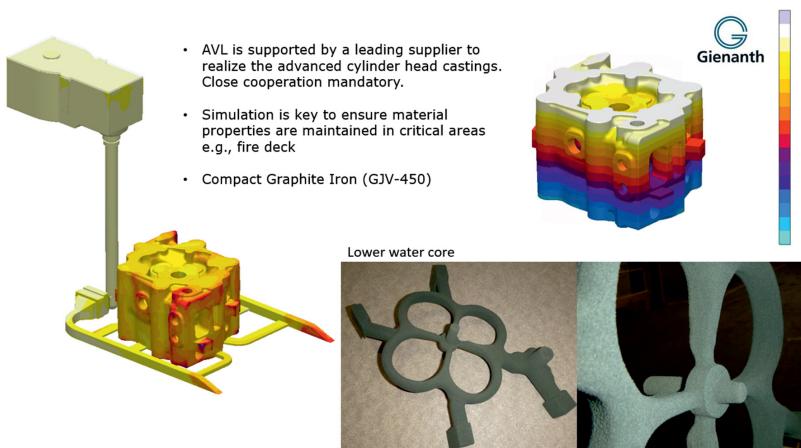


Bild 10: Füllungs- und Erstarrungssimulation des Zylinderkopfes

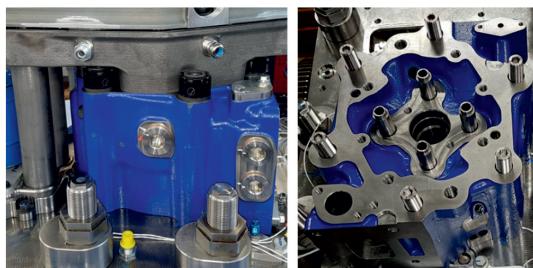


Bild 11: Zylindereinheit Aufbau für den Einzylinder Forschungsmotor

Die Zylindereinheit samt Zylinderkopf befindet sich derzeit am Einzylinder-Prüfstand und hat bereits ihre Feuertaufe erhalten. Die geforderten Leistungsziele von 35bar Mitteldruck und 330 bar Zünddruck konnten erfolgreich getestet werden. In weiterer Folge werden die Vorteile der neuen Verbrennungskonzepte herausgefahrene (Bild 11).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Schnelllaufende Großmotoren werden langfristig die Hauptantriebsquelle für dezentrale Stromerzeugung, Bergbau, Marine, Schienengüterverkehr und Öl- und Gasindustrie bleiben. Ändern werden sich das Umfeld und die Rahmenbedingungen, unter denen diese Motoren betrieben werden. Der Ruf nach CO₂ Neutralität erfordert neue Ansätze für etablierte sowie auch für zukünftige alternative Kraftstoffe.

AVL zeigt mit einer neu entwickelten Zylindereinheit einen Lösungsweg auf, allen Anforderungen gerecht zu werden. Das Kernelement bildet ein modularer Zylinderkopf. Durch eine patentierte Zylinderkopfstruktur kombiniert mit einer hervorragenden Top-Down Kühlung gelingt es höchste thermische Effizienz bei gleichzeitig hohen Mitteldrücken bis 35bar zu realisieren, die sehr hohe Spitzendrücke von 300bar und darüber erfordern.

Welche Kraftstoffe oder Brennverfahren sich letztendlich durchsetzen werden, kann derzeit noch nicht vorhergesagt werden. Mit dem modularen Konzept können sowohl derzeitige Kraftstoffe hoch effizient verbrannt als auch zukünftige alternative Kraftstoffe bedient werden. Bei geeigneter Materialwahl werden einerseits das Kosten getriebene Dauerleistungssegment und andererseits das weniger preissensitive Spitzenleistungssegment abgedeckt.

Es zeigt sich, dass fortgeschrittene Konstruktionsmerkmale, vorgelagerte Simulationsmethoden und moderne Fertigungsmethoden unverzichtbar sind, um die künftigen Herausforderungen meistern zu können.

Abkürzungen:

3D	Drei-Dimensional	H2 HP-DI	High Pressure Direct Injection
BMEP	Brake Mean Effective Pressure	H2 LP	Low Pressure Hydrogen
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption	HS	High-speed
CAE	Computer Aided Engineering	INT	Intake
CFD	Computational Fluid Dynamics	IVT	Intake Valve Timing
CGI	Compact Graphit Iron	kW	kilo Watt
CH	Cylinder Head	LPG	Liquified Petroleum Gas
CH2OH	Methanol	MW	Mega Watt
CO2	Kohlenstoffdioxid	NH3	Ammoniak
DF	Dual Fuel	NOx	Sickoxide
DOC	Diesel Oxidation Catalyst	PC	Pre-Chamber
DPF	Diesel Particulate Filter	PCSI	Pre-Chamber Spark Ignition
EAR	Excess Air Ratio	PFP	Peak Firing Pressure
EAS	Emission Aftertreatment System	PN	Particulate Number
ECU	Engine Control Unit	SCR	Selective Catalytic Reduction
EGR	Exhaust Gas Recirculation	SI	Spark Ignition
EXH	Exhaust	TC	Turbo Charger
FEM	Finite Element Method	TDC	AVL Top Down Cooling system
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit	VIVT	Variable Intake Valve Timing
GJV	Gusseisen mit Vermiculargraphit		

Referenzen:

- [1] G. Figer, K. Schmidleitner, T. Kammerdiener, M. Schönbacher, "Next Generation High-speed Engines Paving the Road for Highest Engine Efficiency": Köln, ATZlife Heavy-Duty, On- und Off-Highway Motoren 2018
- [2] K. Schmidleitner, C. Huber, S. Murakami, „Power unit design for next generation high peak firing pressure gas engines": Dessau, wtz-Rosslau Gas Motoren Konferenz 2019
- [3] G. Figer, K. Schmidleitner, T. Kammerdiener, M. Schoenbacher, „Next Generation High Speed Engines – Advanced Design Features Enabling Highest Engine Efficiency": Vancouver, 29th CIMAC World Congress, 2019
- [4] Simon W. Geib, T. Masuch, “” <https://fon-mag.de/highlight-stories/2021-02-gienanth/?L=1>, FON formnext magazine, 2021
- [4] Kang-Ki Lee, G. Figer, R. Hoogerbrugge, T. Kammerdiener, R. Strasser, „Evaluation von LNG als alternativer Kraftstoff für große Schiffsmotoren mit Hilfe von prädiktiven Emissionsmodellen“: Graz, LEC 18th. Symposium „Sustainable Mobility, Transport and Power Generation“, 2021

Die Zylinderköpfe des neuen Boxer-Saugmotors von Porsche im Dünnwandguss

The cylinder heads of the new Porsche Boxer naturally aspirated engine in thin wall casting

Dipl.-Ing. (FH) **G. Vogelezang**, Dip.-Ing. **C. Pleuß**,

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach;

Dipl.-Ing. (FH) **M. Rafetzeder**, Nemak Europe GmbH, Frankfurt;

DI Dr. mont. **B. Stauder, H. Kirchmeir**, Nemak Linz GmbH, Linz,
Österreich

Kurzfassung

Nachdem 2015 der neue 9A2-Boxermotorenbaukasten mit Vier- und Sechszylinder Turbomotoren für die Anwendung in den Porsche 911 und 718 Modellen eingeführt und 2018 für die achte Generation des 911 (Typ 992) weiterentwickelt wurde, ergänzt jetzt ein neu entwickelter Sechszylinder-Saugmotor die 9A2 Boxermotorenfamilie von Porsche [1]. Die Grundkonzeption des Brennverfahrens mit zentral angeordnetem Injektor sowie die komplette Neuauslegung von Zylinderkopf und Ventiltrieb sind die wesentlichen Differenzierungen dieses Aggregates. Durch den Einsatz der Zylinderköpfe in 718 Boxster/ Cayman GTS 4,0 Liter, Spyder und Cayman GT4 ergeben sich gegenüber dem Vorgänger in Bezug auf die Belastungen und das Gewicht gestiegene Anforderungen [2]. Um die hohen Quer- und Längsbeschleunigungen in allen Betriebsbereichen sicherzustellen, wurden der Öldurchsatz und das Totvolumen im drucklosen Ölraum reduziert. Die Realisierung des Dünnwandgusses erforderte sowohl die simulative Optimierung der Kühlungsfunktion und Struktur der Zylinderköpfe als auch die Umsetzung von umfangreichen Gießsimulationen.

Hinsichtlich der Werkzeugentwicklung bestanden besondere Anforderungen bezüglich der Toleranzen, die mittels richtungsabhängiger Schwindungsfaktoren und eines optimierten Erstauflagekonzepts berücksichtigt wurden. Die Maßhaltigkeit der mehrteiligen verklebten Kernpakete wird mittels einer eigens dafür intern entwickelten Klebe- und Prüfstation sichergestellt. Mithilfe der Gießsimulation, die mit hoher Netzfeinheit umgesetzt wurde, sind Vorsorgemaßnahmen zur Gussfehlervermeidung entwickelt worden. Besonderes Augenmerk musste auf Bereiche tiefer Rippen und die großflächige Kettenkasten- und Ölraumwände gelegt werden.

Als Ergebnis liegen Kokillen mit einer aktiven Temperaturregulierung, aufwändigen Einsätzen zur Entlüftung, Oberflächenstrukturen und Füllkanälen vor. Während der Prozessentwicklung war insbesondere die 3D-CT-Methode eine sehr wirksame Unterstützung. Mittels der weiträumig anpassbaren Drehparameter des Rotacast-Verfahrens und der vorhandenen aktiven Formtemperierung wurde die Gießbarkeit der gewünschten Legierung sichergestellt. Die über stark wirkende Brennraumkühleinsätze erhaltene feine Mikrostruktur ist für die hohe dynamische Belastbarkeit sehr positiv.

Die Inline-Überwachung der Produktionsprozesse, die intern über die NORIS®-Prozessdatenerfassung organisiert wird, ist ein wesentlicher Qualitätssicherungsbeitrag. Die finale Bau-teilfreigabe erfolgt neben üblichen Abläufen nach einer CT-Prüfung hinsichtlich der Integrität des Wasserraumbereiches.

Jede Fachabteilung hat durch Weiterentwicklung eigener Standards zum Projekt beigetragen und somit eine Basis für zukünftige weitere Dünnwandguss-Serienprojekte in Kokillenguss geschaffen.

1. Kurzvorstellung Porsche 4,0 Liter Boxermotor

Die für den Zylinderkopf relevanten Anforderungen an einen neuen Boxermotor für den Einsatz in den genannten 718 Modellen sind:

- hohe Emotionalität
- Steigerung der Fahrleistungen
- geringes Gewicht
- Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs
- Erfüllung der neuesten Gesetzesanforderungen

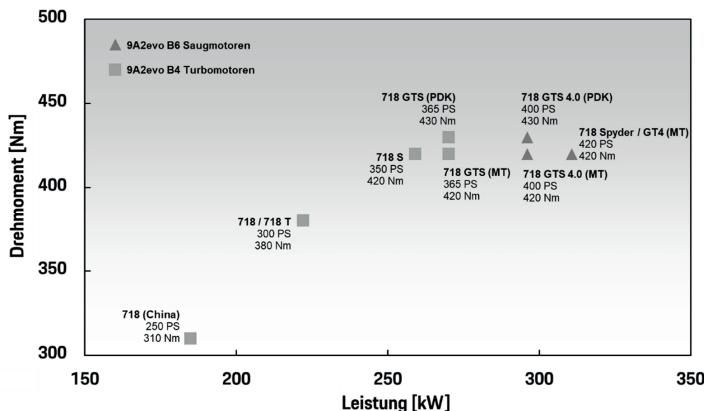


Bild 1: Leistungsstaffelung der 9A2-Motoren in der Modellreihe 718

Da die Leistungs-Charakteristik des Motors einen wesentlichen Einfluss auf das Fahr-Erlebnis hat, setzt Porsche bei diesen Modellen auf Sechszylinder-Saugmotoren und legt so den Schwerpunkt konsequent auf Eigenschaften wie unmittelbares Ansprechverhalten, lineare Kraftentfaltung und den typischen Klang eines Sechszylinder-Boxermotors. Zur emotionalen Steigerung des Fahr-Erlebnisses wurde die Drehfreudigkeit weiter verbessert und die Nenn-drehzahl auf 7.600 1/min sowie die Maximaldrehzahl auf 8.000 1/min erhöht.

Der Grundmotor wurde innerhalb des bestehenden 9A2-Baukastens abgeleitet und gezielt für die Anforderungen eines hochdrehenden Saugmotors optimiert. Wesentliche Bestandteile des Baukastens sind:

- zwei Bohrungsvarianten: 91 mm und 102 mm
- zwei Hubvarianten: 76,4 mm und 81,5 mm
- closed-Deck AISI7-Kurbelgehäuse mit Eisen (Fe)-Laufbahnenbeschichtung
- Vier-Ventil-Technik mit Ein-/Auslassnockenwellenverstellung
- Benzindirekteinspritzung mit zentraler Injektorlage
- integrierter Trockensumpf mit vollvariabler Ölpumpe
- Thermomanagement mit schaltbarer Wasserpumpe und Kennfeldthermostat
- Erfüllung der Abgasnorm EU6 AP

Für die Anwendung als Saugmotor wurden im Wesentlichen der Ventiltrieb, der Zylinderkopf mit Querstromkühlung sowie die Sauganlage und die Abgasführung komplett neu entwickelt. Bewährte Systeme wie der integrierte Trockensumpf mit Kunststofffolwanne, der Steuer- und Riementrieb sowie das Thermomanagement mit schaltbarer Wasserpumpe wurden vom

9A2evo-Turbomotor mit geringen Anpassungen übernommen. Der Einbau ins Fahrzeug erfolgt wie beim Vorgänger als Mittelmotor mit einer Dreipunkt-Lagerung.



Bild 2: 4,0 Liter Boxer-Saugmotor (interne Bezeichnung: 9A2evo)

Das Baukasten-Design ermöglicht die Verwendung von Gleichteilen. Mit diesen Ansätzen ist eine optimale Variantenbildung unter Berücksichtigung der technischen Ausprägung einzelner Derivate auch unter wirtschaftlichen Aspekten darstellbar [3].

2. Anforderungen an die Zylinderköpfe

Die wesentlichen Faktoren für eine hohe Leistung eines Saugmotors sind eine hohe Zylinderfüllung, hohe Drehzahlen und geringe Reibung.

Die hohe Füllung bedingt einen drosselarmen und schwingungsoptimierten Gaspfad. Der Beitrag des Zylinderkopfes liegt dabei vor allem in einem Einlasskanal mit einem hohen Durchflussbeiwert α_k .

Der gute Durchflussbeiwert ergibt in Kombination mit einem großen Zeitquerschnitt eine hohe Zylinderfüllung. Um die Länge der Ventilerhebungskurve bei einem großen Ventilhub akzeptabel kurz zu halten, müssen der Ventiltrieb und die Nockenwellenlagerung hohen Ventilbeschleunigungen gewachsen sein. Die Länge der Hubkurven und damit die Kräfte und Pressungen im Ventiltrieb sind entscheidend für einen möglichen Entfall der Schaltbarkeit des Ventilhubes.

Zu den gegenüber den Saugmotor-Vorgängern gestiegenen Leistungen und Drehzahlen sind für einen weiteren Ausbau des Baukastens höhere Leistungen und Drehzahlen vorzuhalten. Damit verbunden sind neben gesteigerten Ventilhüben und höheren Beschleunigungen noch-

mals höhere thermische und mechanische Belastungen des Zylinderkopfes zu berücksichtigen. Um weiterhin die bewährte Legierung AlSi7MgCu0,5 T6 mit Luftabschreckung verwenden zu können, gilt es die Bauteiltemperaturen und Spannungen mittels optimierter Kühlung und Bauteilstruktur niedrig zu halten.

Der Ölkreislauf von Boxermotoren steht vor der Herausforderung das Öl auch unter hohen Quer- und Längsbeschleunigungen aus den Zylinderköpfen, trotz der liegenden Einbaueinlage, rasch in den Ölumpf zurückzuführen. Die Basis dazu bildet ein geringer Öldurchsatz in den Zylinderköpfen und eine leistungsfähige Ölabsaugung. Damit die Absaugung auch unter hohen Querbeschleunigungen von 1,4 g bestmöglich arbeiten kann, muss das Öl im drucklosen Ölraum sicher zu den Ölabsaugstellen geführt werden. Ein niedriger Öldurchsatz reduziert außerdem grundsätzlich die Reibleistung.

Für den supersportlichen Einsatz ist Leichtbau aller Baugruppen im Hinblick auf hohe Quer- und Längsdynamik von besonderer Bedeutung. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist Leichtbau über reduzierten Materialeinsatz anzustreben.

3. Umsetzung der Anforderungen

Die gegenüber den Turbomotoren stark abweichenden Anforderungen bedingen eine komplettene Neuauslegung der Zylinderköpfe.

Die Entwicklung der Zylinderköpfe beginnt mit der Positionierung der zentralen Einspritzdüse und der Zündkerze. Zugunsten von großen Einlassventilen kommt die im 918 Spyder bewährte, kompakte Zündkerze mit M10-Gewinde anstelle der 14 Millimeter aus dem Vorgänger zum Einsatz. Um ein Benetzen der Einlassventile beim Einspritzvorgang auszuschließen, wird die von den Turbomotoren übernommene Piezo/A-Düse auslassseitig angeordnet [4].

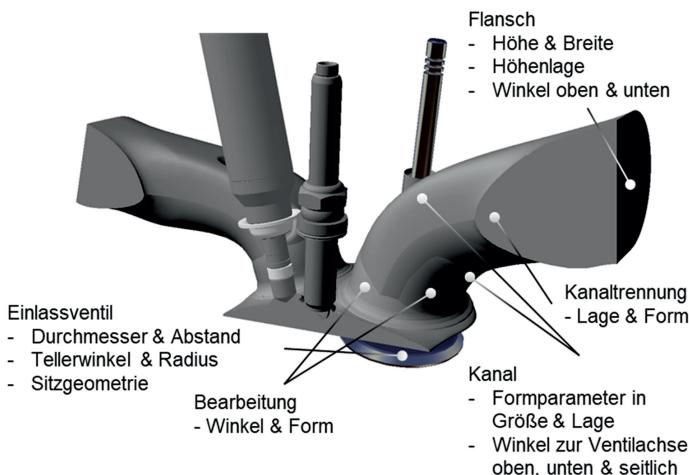


Bild 3: Anordnung Bauteile und Parameter der numerischen Einlasskanaloptimierung

Die Zündkerze hat damit eine nahezu mittige Lage. Ferner wird die Massenelektrode der Zündkerze mit einer engen Winkeltoleranz in Richtung Einlass verbaut, um die Kerzentemperatur gezielt abzusenken und eine lange Bauteillebensdauer zu gewährleisten.

Auf der Grundlage des neuen Layouts, mit der im Vergleich zu den Turbomotoren gedrehten Injektorlage, wurden die Einlasskanäle, Einlassventile und der ventilnahe Bereich im Brennraum mit einem bewährten CAD-Modell numerisch optimiert.

Für eine gute Füllung darf die Strömung auch bei Vollhub am Übergang des Kanals zum Sitzring auf der Unterseite nicht ablösen. Wenn dies geschieht, wird der Ventilspalt nicht mehr vollumfänglich durchströmt und die Strömungsenergie wird in Ladungsbewegung statt Füllung verwandelt.

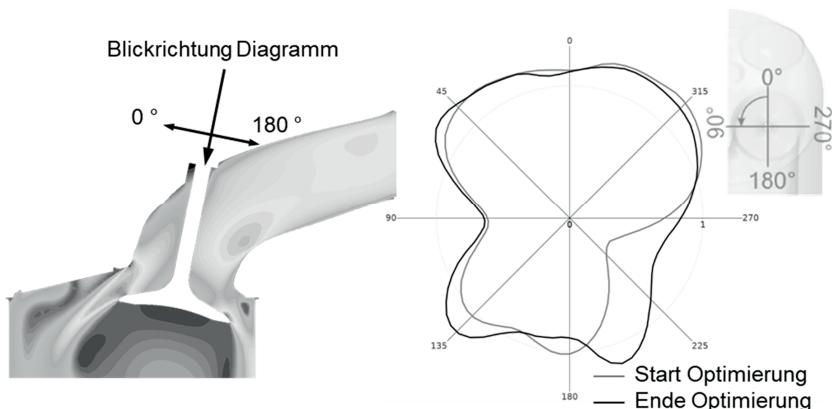


Bild 4: Simulierte Geschwindigkeit im Einlasskanal und Ventilspalt bei 12 Millimeter Ventilhub

Für eine maximale Füllung sind aber nicht nur der Kanal und Sitzbereich zu betrachten, sondern auch das Ausströmen in den Zylindern. Dazu wurde der Strömungsanteil am Umfang des Sitzringes in einem Polardiagramm ausgewertet und mittels Abgleich der Ventildurchmesser, der Abstände der Einlassventile zueinander und der Ventile zur Zylinderwand bestmöglich vergleichmäßiggt. Die Simulation fand mit einem Durchmesser der Einlassventile von 42,3 Millimeter ein Optimum.

Da die Geometrie vor, im und nach dem Ventilspalt ein mit dem Ventilhub veränderliches Optimum aufweist, war hier die Herausforderung die integral bestmögliche Geometrie zu ermitteln.

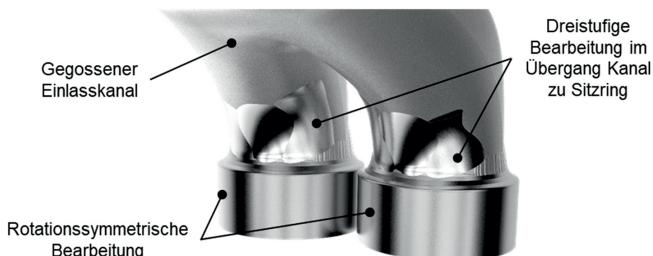


Bild 5: Einlasskanalbearbeitung

Die gegossene Oberfläche der Einlasskanal-Innenkontur wird nach der Sitzringbearbeitung lokal in drei Bahnen bearbeitet, damit im entscheidenden Bereich des Kanals die Toleranzen und die Varianz der Strömung in der Serienfertigung minimiert werden können.

Gegenüber dem Vorgängermotor konnte so eine deutliche Steigerung der Einlasskanal-Durchflusskoeffizienten erreicht werden. In Verbindung mit dem ebenfalls vergrößerten Einlassventilhub ergeben sich deutliche Füllungsvorteile für den neuen Saugmotor. Im nachstehenden Diagramm ist das über den Ventilhub von 12 Millimeter hinausgehende, weiter ansteigende Potential für Ausbaustufen gegenüber dem Vorgänger zu sehen.

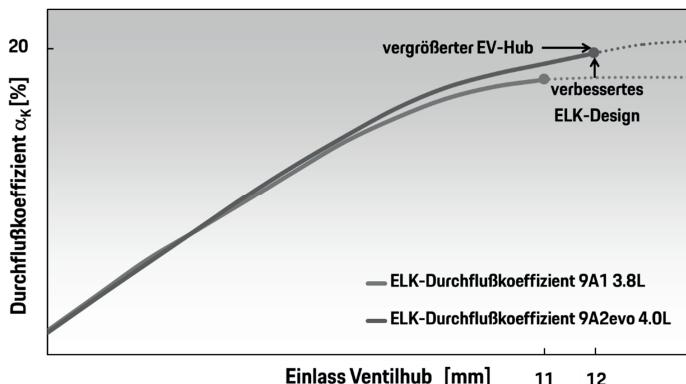


Bild 6: Vergleich Durchflussgüte Einlasskanal 9A2evo 4,0 Liter zu 9A1 3,8 Liter

Die Auslasskanäle und Auslassventile wurden in einer transienten Simulation des Auslassvorganges ebenfalls optimiert. Dabei wurden vor allem die Ventilteller und der dem Ventilsitz nahe Bereich des Zylinderkopfes weiterentwickelt.

Mit dem Wechsel von einlassseitigen Schalttassen und auslassseitigen 3CF-Tassen auf Rollenschlepphebel konnten die Reibung reduziert und die Ventilbeschleunigungen erhöht werden. Damit das volle Potential der Rollenschlepphebel genutzt werden konnte, wurde für eine geringere Masse und höhere Steifigkeit ein Feinguss-Hebel entwickelt. Diese Konfiguration des Ventiltriebs, mit den verhältnismäßig kurzen Steuerzeiten bei großen Hüben infolge der hohen Beschleunigungen, ermöglichte schließlich den Verzicht auf eine Schaltbarkeit. Dank des hydraulischen Ventilspielausgleichs ist der Ventiltrieb trotz des Hochdrehzahl-Einsatzes wartungsfrei.

Die mit der Auslegung des Ventiltriebs auf über 8000 1/min und Ventilhüben bis 14 Millimeter einhergehende Verdoppelung der Lagerkräfte zwang zu einer besonders steifen Lagerung der Nockenwellen, die über eine sogenannte Leitrahmenkonstruktion erzielt werden konnte.



Bild 7: Ventiltrieb des 718 4,0 Liter Saugmotors

Der Ölkreislauf in den Zylinderköpfen musste in den zwei Punkten Öldurchsatz und Totvolumen verbessert werden. Der Öldurchsatz eines Zylinderkopfes ergibt sich aus der Anzahl der Verbraucher und deren Öldurchsatz. Die wesentlichen Maßnahmen sind:

- der Wechsel von Schalttassen auf Rollenschlepphebel
- die Verlegung der Öl einspeisungsstelle in den Bereich eines lokal geringen Lagerspiels von unten kurz vor den hydrodynamischen Druckberg im Nockenwellenlager unter Berücksichtigung der Drehrichtungen und Verlagerungsbahnen

Die Bestimmung der optimalen Lage der Öl einspeisungsstelle in die Nockenwellenlager wird mittels Simulation für alle vier Nockenwellen berechnet. Trotz des erhöhten Bearbeitungsaufwands wurden die Öl einspeisungsstellen vom Zylinderkopf in den Leiterrahmen verlegt, um den Ölverbrauch je Lager auf ein Sechstel des Ausgangswertes zu reduzieren.

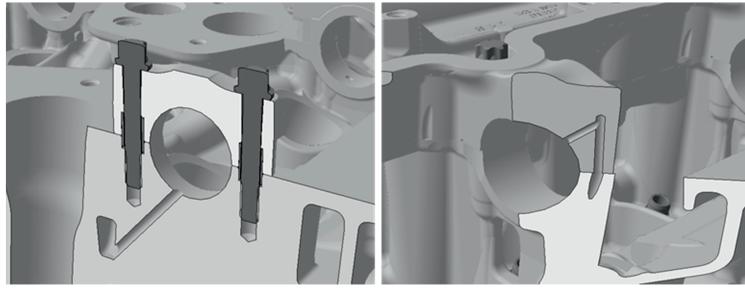


Bild 8: Öl einspeisungsstelle im 9A2evo und 718 4,0 Liter Leiterrahmen

Die Gestaltung der Ölkerne stand unter dem Fokus das zurücklaufende Öl sicher und rasch zu den Saugstellen auch unter 1,4 g Querbeschleunigung zurückzuführen. Dazu wurde auf ein glattflächiges Design mit möglichst vertikalen Wänden in Einbaulage wertgelegt. Das Volumen des drucklosen Ölraums konnte mittels zusätzlicher Kerne zwischen den Zylindern um 0,7 und 0,8 Liter je Zylinderkopf reduziert werden. Diese Bereiche sind ölfrei und werden mit einer kleinen Bohrung zur Auslassseite hin entlüftet.

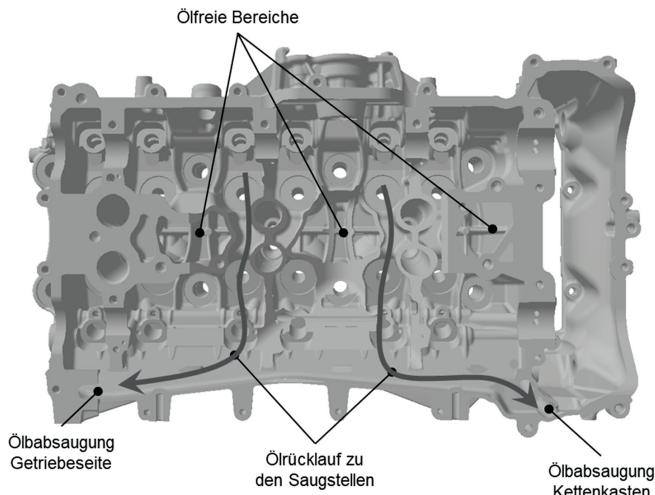


Bild 9: Ölrücklauf im drucklosen Ölraum

Die bekannte Querstromkühlung konnte in Bezug auf die Wärmeübergangszahlen ohne nennenswerte Steigerung der Druckverluste so weit verbessert, dass auch bei den Ausbaustufen die maximalen Temperaturen im Brennraum unter 250 Grad Celsius bleiben.

Der Dünnwandguss ergab sich durch die Anforderung große Gaskanäle mit der zentralen Zündkerzen- und Injektorlage zu kombinieren und den Seitenblick auf die im Sandguss hergestellten GT3 Zylinderköpfe. Analog den GT3 Zylinderköpfen wurden die 718 Sandguss-Prototyp-Zylinderköpfe mit einer allgemeinen Wandstärke von 3 Millimeter konstruiert. Die Anfragen wurden ohne Festlegung auf das Gießverfahren Sand- oder Kokillenguss gestellt. Gießversuche von Nemak im Rahmen der Vergabe haben die Realisierbarkeit eines Dünnwandgusses in Kokille mit Rotacast ohne großen Zusatzaufwand aufgezeigt. Die kontrollierte Rotation und die stets hohe Schmelztemperatur an der Gießfront ermöglicht eine vollständige Formfüllung und der hohe Temperaturgradient unterstützt die Speisung sehr gut.

Die seit 2008 in zwei Motoren generationen bewährte Legierung AlSi7Cu0,5Mg konnte problemlos angewandt werden und führt mit einer T64-Luftabschreckung zu sehr guten statischen und dynamischen Kennwerten bei hoher thermischer Stabilität, geringer Dichte und guter Korrosionsbeständigkeit.

Mit den Erfahrungen der Gestaltung der 9A2 Zylinderköpfe und den zusätzlichen Verdrängerkerne konnten die Spannungen reduziert und die Steifigkeiten erhöht werden. Das Gewicht der beiden Zylinderköpfe sank in Summe um 3,2 Kilogramm gegenüber dem Vorgänger während gleichzeitig der zu ertragende Verbrennungsdruck um 24 Prozent anstieg. Neben den offensichtlichen Vorteilen bei der Fahrdynamik berücksichtigt diese Gewichtsreduktion aufgrund des reduzierten Materials und damit Energieeinsatzes ebenfalls den Aspekt der Nachhaltigkeit.

Die Zylinderköpfe dienen sowohl in Bezug auf das grundsätzliche Layout als auch auf den Dünnwandguss als Basis für nächste Motoren generationen.



Bild 10: Zylinderkopf mit Lagerung der Nockenwellen

4. Anforderungsmanagement Gussteil

Die erste Machbarkeitsbewertung der Anfragedaten zum B6-S (9A2evo) Zylinderkopf verlief auf Basis der langjährig gewonnenen Erfahrungen in diesem Produktsegment sehr positiv. Die hauptsächliche neue Anforderung bestand in den mit 3 Millimeter Nominalwandstärke konstruierten Bauteilbereichen, sowohl um die gasführenden Kanäle zum Wasserraum, dem Ölraum mit Verdrängungsbereichen und dem angegossenen Kettenkasten.

Gegenüber bisherigen anspruchsvollen Nominalwandstärken von 4 bis 4,5 Millimeter im Kokillenguss wurde diese nochmal um 25 Prozent reduziert. Das erforderte zusätzliche Untersuchungen und Maßnahmen in der Werkzeugauslegung, der Prozessführung und der Prüfabläufe, um die Herstellbarkeit abzusichern. Wichtig für das Gelingen war die Qualitätsorientierung und Offenheit für Prozessverbesserungen über alle Abteilungen. Auf Basis dieser Festlegungen hieß es, für das vorliegende Bauteildesign die lokalen Spezifika zu analysieren, beginnend mit der Anpassung der Gießsimulation.



Bild 11: Abbildung des thermischen Füllzustandes am 3 Millimeter starken Kettenkastenbereich mit illustriertem Querschnitt aus der Simulationsvernetzung, sowie Ausschnitt der Ansicht eines realen Gussteiles.

Für die in Bild 11 gezeigte Gießsimulation musste eine um einen Faktor 4 erhöhte Zellenanzahl verwendet werden, um die Wandstärke ausreichend aufzulösen, was die Rechenzeit um den Faktor 10 erhöhte. Die Dünnwandigkeit des Bauteiles ist insbesondere in Bereichen hoher Rippen, der Ölraumwände und des Kettenkastens ausreichend genau abzubilden. Diese Verfeinerung war gerade in der Entwicklungsphase wesentlich, um neuralgische Bauteilbereiche zu identifizieren und die notwendigen Maßnahmen für das Werkzeugkonzept einzuplanen.

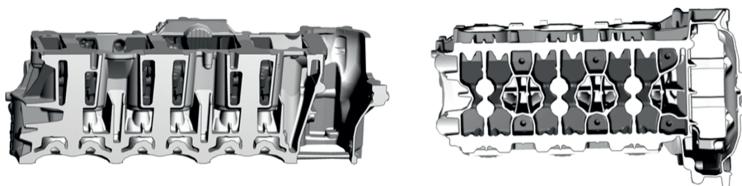


Bild 12: Bauteil in Schnittdarstellung, längs und horizontal geschnitten.

5. Werkzeugkonzept

Das Werkzeugkonzept umfasst insbesondere die Gießkokille, die Kernkastenbelegung und deren Schwindungsfestlegungen und die, im vorliegenden Projekt sehr wesentliche, Tolerierung der Kernmarken und der Fixierung der Kerne.

Die Kokille wurde mit aktiver Temperaturregelung über Heizungen und Kühlungen, Oberflächenriffelung und zusätzlichen Entlüftungsmaßnahmen über Einsätze entsprechend auf die erarbeiteten Prozessanforderungen ausgelegt (Bild 13). Nach ersten Gießlosen wurden diese Aspekte weiter verfeinert.

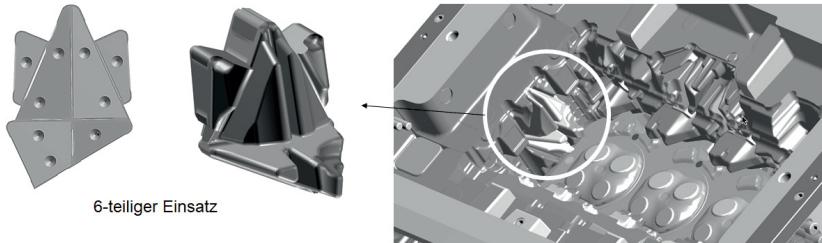


Bild 13: Aufbau der Gießkokille mit Darstellung von Entlüftungseinsätzen für außenliegende Verrippling.

Die Kühlwirkung der Brennraumeinsätze führt zu DAS-Werten im gesamten Brennraumdachbereich unter 20 Mikrometer. Bezuglich Maßhaltigkeit sind diese Einsätze im Bereich von 50 Mikrometer feinjustierbar. Zudem werden die Kanalkerne über ein spezielles Niederhaltekonzept spielfrei in der Kokille fixiert.

Die Schwindungsfaktoren der verwendeten Warmbox- und Coldboxkerne wurden auf Basis ähnlicher Produktfamilien vorab festgelegt. Insbesondere ist im Wassermantel- und Strömungskanalbereich auf ideale Maßhaltigkeit geachtet worden, was sich in dreidimensional unterschiedlichen Schwindungsfaktoren niederschlug. Damit konnte, im Zusammenhang mit detailliert eingestellten Kernmarken die relative Lagetoleranz dieser funktionell wichtigen Kerne minimiert werden und eine absolute Mindestwandstärke von 2,3 Millimeter garantiert werden. Die Herausforderung, den durchgehend dünnwandigen Kettenkasten verzugsfrei darzustellen, bedurfte unter anderem eines im Kokillschieber integrierten Rückhaltesystems, temporärer Versteifungsrippen, und Haltelaschen innerhalb der Vorbearbeitungsumfänge. Damit bleibt in Kombination mit der Wärmebehandlung mit Luftabschreckung der Kettenkasten innerhalb der geforderten Toleranz, wie in Bild 14 illustriert.

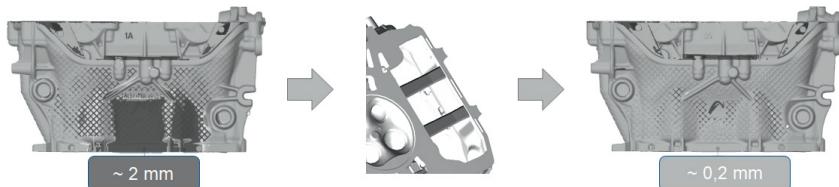


Bild 14: Verzugsminderung Kettenkastenbereich durch optimiertes Rohteilkonzept. Die Versteifungsrippe wird im Zuge der internen Vorbearbeitung wieder entfernt.

6. Prozessauslegung

Die Prozessauslegung dieses dünnwandigen Bauteils erfordert ein besonderes Augenmerk auf potenzielle Füll- und Kaltlaufprobleme. Ferner galt es, Porositätsrisiken von Knotenpunkten (z.B. Anschraubbutzen) in Insellagen, die durchgehend von dünnwandigen Bereichen umgeben sind, zu minimieren.

Zur Erzielung einer kontinuierlichen Produktion wird die Fertigung der Köpfe für die Zylinderbänke 1-3 und 4-6 an einer Rotacast-Tandemgießanlage gleichzeitig mittels zweier Kokillen durchgeführt. Mittels der damit einhergehenden flexiblen Wahl der Formfüllgeschwindigkeit konnte ein kontinuierliches Füllen der dünnwandigen Bereiche abgesichert werden. Die Kokillenschiebertemperaturen erforderten erwartungsgemäß Einschränkungen des Temperaturbereiches auf 50 bis 80 Prozent einer sonst üblichen Bandbreite zur Gießfreigabe. Im Zuge von bauteilbezogenen Versuchsgießlosen wurden abgesicherte Serienparameter während des Entwicklungsablaufs festgelegt, wie z.B. aus Bild 15 ersichtlich.

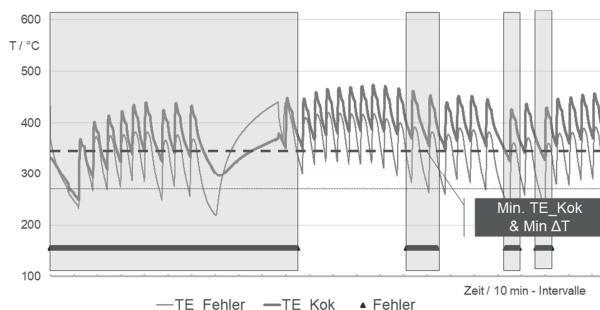


Bild 15: Ausschnitt einer inline Prozessdatenerfassung von Temperaturen über mehrere Gießzyklen (einer je Peak). Teile mit dem Fehlerbild Lunker wurden schattiert gekennzeichnet.

Die Aufzeichnung einer Kokillen-Seitenteiltemperatur sowie einer Vergleichsmessstelle in Bild 15 zeigt die empfindliche Reaktion des Temperaturzustandes auf die Gussqualität. So ist neben einer absoluten Mindesttemperatur der Kokille allgemein auch ein stabiler thermischer Zustand nötig. Daraus ergeben sich mehrdimensionale Zusammenhänge, welche mittlerweile auch zum Einsatz automatisierter Datenanalysetools führten, um Qualitätsrisiken vorbeugend zu identifizieren.

7. Qualitätskonzept / Serienfähigkeit

Das Qualitätssicherungskonzept wurde analog zu anderen Produkten in der Zylinderkopffertigung umgesetzt, ebenso die verwendeten Methoden. Während der Bemusterung ist insbesondere die Anwendung von CT für die 3D-Volumenabbildung des Wasserraums hervorzuheben. Sie ergab in Kombination mit GOM-Konturscans eine nahezu lückenlose 3D-Vermessung des Bauteils.

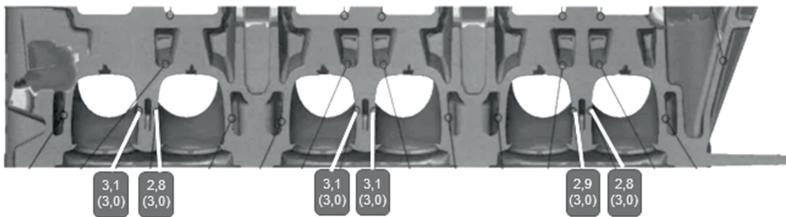


Bild 16: Auslasskanal-Zwickelbereich über einen gesamten Bauteilschnitt mit Angabe Ist-zu Soll-Wandstärke.

Wandstärkenschnitte belegen die durch das Werkzeugkonzept erhaltene präzise Kernausrichtung. Die Wasserkühlkanäle im thermisch-mechanisch höchstbelasteten Zwickelbereich weisen 3 Millimeter Wandstärke zum Kanal auf (siehe Bild 16).

In der Fertigungspraxis sind ein hohes Qualitätsbewusstsein der Produktion und ein konsequent gelebtes Verbesserungswesen erforderlich. Daraus resultiert, dass die Produktionsabläufe mit höchster Aufmerksamkeit und mit hoher Kontinuität durchgeführt werden müssen.

Zur qualitativen Serienüberwachung dieser Bauteile wird die Durchgängigkeit des Wasserraums über eine At-line CT-Prüfanlage in kürzester Zeit automatisiert sichergestellt, nachdem für die vorhandene Wassermantelgeometrie keine alternativen Prüfmethoden anwendbar sind. Diese Untersuchung wird bereits am Rohteil vor der Wärmebehandlung angewandt, damit eine rasche Rückmeldung an die Produktion erfolgt. Der Volumendatensatz bietet generell die Möglichkeit, das Bauteil auf Integrität, wie zum Beispiel Verschiebungen von Kernen, zu prüfen.

Im Lauf der weiteren Prozesskette erfolgt die Wärmebehandlung mit Härteprüfungen, CNC-Bearbeitung mit Kontrollen, Dichtprüfung und Verpacken zum Versand nach erfolgtem positivem Nachweis aller Prüfmerkmale anhand des NORIS®-Prozessdatenerfassungssystems. Mit diesem Konzept können sowohl kundenseitig als auch intern gewohnte Qualitätskennzahlen eingehalten werden.

8. Erkenntnisse und Ausblick

Die ersten Prototypen haben gezeigt, dass Dünnwandguss auch bei Sandguss eine Herausforderung ist. Flächig dünnwandige Bereiche der Zylinderköpfe sind im Sandguss mit Schwerkraftfüllung häufig auch nur mit Zusatzmaßnahmen wie Riffelung in den Kernen und höheren Gießtemperaturen vollständig zu gießen.

Mit der drehenden Formfüllung des Rotacast-Verfahrens verringert sich die Neigung zu Kaltlauf selbst im Kokillenguss bedeutsam. In weiten Bereichen sind die dünnen Wandstärken im normalen Gießprozess sehr gut darstellbar. Nur bei längeren Stillstandszeiten droht Kaltlauf, insbesondere für außenliegende Rippen. Deren gießgerechte Gestaltung, namentlich Dicke, Form und Lage, als auch deren Entlüftung sind für eine sichere Formfüllung wesentlich. Der Kettenkasten stellt mit seinen großen und dünnen Flächen ebenfalls große Anforderungen an einen stabilen Gießprozess.

Im Kokillenguss kommt es für dünnwandige Bauteile noch mehr auf die Erstarrungslenkung durch aktive Formtemperierung (Heizung und Kühlung) zum Auflösen von Schwindungsdefiziten an isolierten Knotenpunkten an.

Die Schwindungsfaktoren für die Sandkerne sind bezüglich aller Achsen noch differenzierter auszulegen und die Kernlagerung in der Kokille bezüglich der Lagetoleranz robust zu gestalten.

Auf Basis des robusten Rotacast-Gießprozesses mit Anwendung einer intensiv wirkenden Brennraumkühlung wurden mit der Legierung AlSi7Cu0,5Mg und einer Wärmebehandlung mit Luftabschreckung erneut hohe mechanische Kennwerte bestätigt.

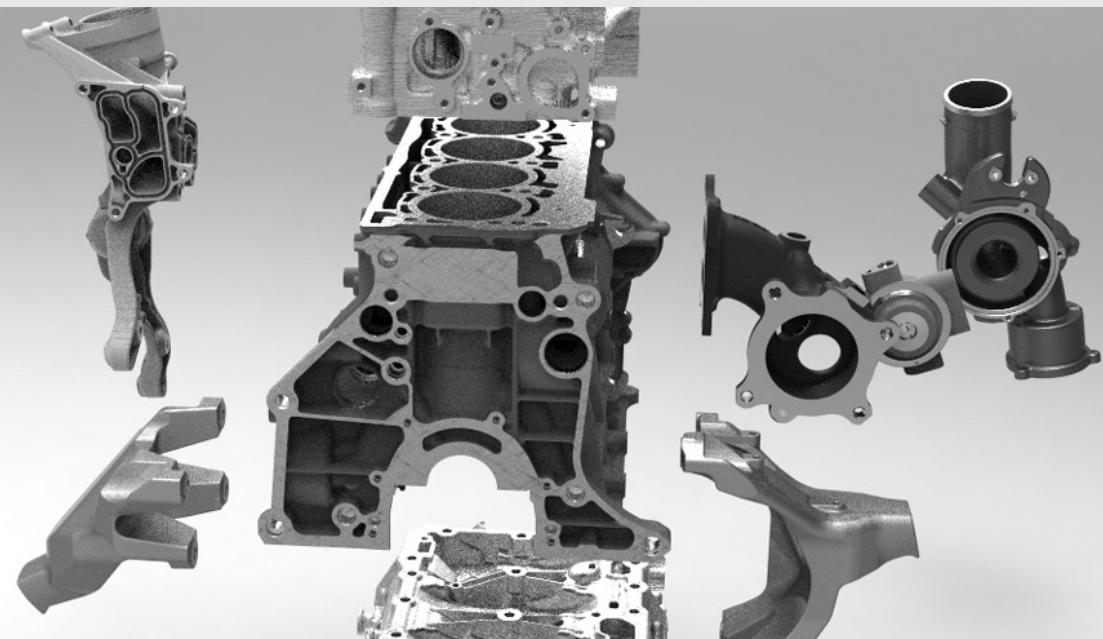
Aufgrund der guten Struktur und des sicheren Prozesses bilden die 718 4,0 Liter Zylinderköpfe in Dünnwandguss die Basis für kommende Zylinderköpfe in höheren Stückzahlen.

Zur Erhöhung der Prozesssicherheit künftiger Zylinderköpfe sind diese außen möglichst glattflächig zu gestalten und Versteifungsrippen nach innen in die Sandkerne zu verlegen. Leichte Wandstärkenanpassungen oder spezielle Fließhilfen sind nur im Bereich der großflächigen Kettenkästen zur Prozessstabilisierung vonnöten.

Eingedenk weiterer Leistungssteigerungen und anspruchsvollerer, auch aufgeladenen Brennverfahren wird die Kühlung zur Beherrschung der maximalen Temperaturen, Thermospannungen und Sicherheiten weiterentwickelt werden müssen, um auch die Kombination von Dünnwandguss und Turbomotoren zu realisieren [5].

Quellenverzeichnis

- [1] KERNER, Jörg, WASSERBÄCH, Thomas, BAUMANN, Markus, BRANDL, Thomas, KISTNER, Bruno, WERNER, Martin, SCHMIDT, Ralf, 2016
The New Family of Flat Engines by Porsche
37th International Vienna Motor Symposium
- [2] Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Presseinformation "Porsche Boxster Spyder", Juni 2015
- [3] WASSERBÄCH, Thomas, 2016.
VDI Nachrichten, Ausgabe 39
- [4] WASSERBÄCH, Thomas, BRANDL, Thomas, WESSELS, Michael, MARTINY, Moritz, SCHMIDT, Ralf, 2019
The 6-Cylinder Boxer Engines in the New Porsche 911
40th International Vienna Motor Symposium
- [5] WASSERBÄCH, Thomas, KERNER, Jörg, BAUMANN, Markus, 2017
Challenges Facing Future High-Performance Combustion Engines Using Porsche Boxer Engines as an Example
4th international engine Congress, Baden-Baden, 2017



ISBN 978-3-18-092386-4

Bildquelle: Volkswagen AG