Anorganische Innovation für die neuen Diesel-Spitzenmotorisierungen im BMW M550xd: Konstruktion und Gießtechnik des Alu-Kurbelgehäuses.

Inorganically Bonded Innovation for the New Top Diesel Engine of the BMW M550xd: Design and Casting Technology of the Aluminum Crankcase.

Wesentliche Ziele für die Entwicklung des Motors waren ein Leistungs-, Drehmoment- und Komfortangebot mindestens auf Niveau von Achtzylinder-Wettbewerbern, dabei jedoch gleichzeitig den für bisherige BMW Sechszylinder-Dieselmotoren typisch niedrigen Kraftstoffverbauch und das niedrige Leistungsgewicht beizubehalten. Die Vision, die BMW-Strategie „EfficientDynamics" im Bereich der Dieselmotoren durch Weiterentwicklung der BMW TwinPower Turbo-Technologie mit drei Abgasturboladern auf ein neues Niveau zu heben, führt natürlich auch für die triebwerksseitige Darstellung der Dauerhaltbarkeit zu der Notwendigkeit, neue Lösungsansätze zu entwickeln. Die Konstruktion des Kurbelgehäuses basiert auf dem Sechszylinder-Basismotor, optimiert mit einer Fülle von festigkeitssteigernden Maßnahmen für 200 bar-Spitzendruck und dem Einsatz eines Zugankerkonzeptes zur Vermeidung von Direktverschraubungen im Aluminium. Die BMW-Leichtmetallgießerei nutzt Erkenntnisse der anorganischen Sandkernfertigung und löst die gestiegenen Anforderung im Bereich des Lagerstuhles und speziell des Zylindersteges durch den Einsatz des neuartigen Zentralspeiserkonzeptes. Es basiert auf den Vorteilen der anorganischen Sandkernfertigung und bringt massive Funktions- und Kostenvorteile. Der neue Motor wird erstmals in den betont sportlichen BMW M-Performance-Automobilen der X5/X6- sowie der 5er und 7er-Baureihe eingesetzt.

Major goals for the development of the engine were the level of 8-clinder competitor engines for power, torque and comfort while keeping the existing low levels of fuel consumption and power/weight-ratio of the current BMW 6-cylinder diesel engines. The vision to push the BMW strategy "EfficientDynamics" for the Diesel engines to a new level by developing the BMW TwinPower turbocharger-technology applying three turbocharger leads to new targets for durability as well. The crankcase design is based on the current 6-cylinder engine using a large number of durability increasing features for 200 bar maximum pressure and a tension anchor concept to avoid direct screwing within the aluminum. The BMW light metal foundry is using its large expertise in the field of inorganically bonded sand cores to develop a new central feeding concept leading to functional and cost advantages. The new engine is launched with the new BMW M-Performance vehicles of the X5/X6 as well as the 5 and 7-series.

1. Einleitung

Die BMW Dieselmotoren sind ein fester Bestandteil der BMW-Strategie „EfficientDynamics" und stellen mit der erstmaligen Einführung der Stufenaufladung aus dem Jahr 2004 den Markstein im Wettbewerbsumfeld dar [1]. Die konsequente Weiterentwicklung der TwinPower Turbo-Technologie ermöglicht einerseits die Verbindung von achtzylindertypischer Leistung mit sechszylindertypischem Verbrauch und Gewicht, stellt aber andererseits durch die notwendige Erhöhung des Zünddruckes die Konstruktion des Triebwerks und die Gießtechnologieentwicklung für das Aluminium-Kurbelgehäuse vor neue Herausforderungen.

Der Entwicklungsprozess der Motorkernbauteile Zylinderkopf und Kurbelgehäuse fand stets in enger Abstimmung zwischen der Bauteilkonstruktion und der Gießprozessentwicklung statt. Die ursprünglich eher versuchsorientierte Geometrie- und Verfahrensoptimierung ist heute einer fast vollständig numerischen Produkt- und Prozessauslegung gewichen. Im Jahr 2005 wurden die bis dahin im Dieselmotor üblichen und teilweise heute noch verwendeten Graugusskurbelgehäuse von BMW erstmals durch deutlich leichtere Aluminiumbauteile aus der BMW-Leichtmetallgießerei ersetzt [2, 3].

Parallel zur leichtbauorientierten Produktentwicklung hat die BMW-Leichtmetallgießerei 2006 begonnen, systematisch und flächendeckend die Sandkernfertigung im Kokillenguss auf anorganisch gebundene Sandkerne umzustellen. Diese nachhaltige („sustainable") Prozessinnovation führte, passend zur BMW-Philosophie „CleanProduction", zu Vorteilen für Mitarbeiter und Umwelt sowie zu Qualitätsverbesserung und Kostenreduktion. In der folgenden Dieselmotorgeneration [4] ist diese Prozessinnovation im (dem klassischen Gießprozess) vorgelagerten Bereich der Sandkernfertigung erstmals auch die Basis für gießtechnologische Neuerungen in der Kokillenauslegung. Produktseitig führt die anorganische Sandkernfertigung zur Verbesserung der Bauteilqualität und ermöglicht Festigkeitssteigerungen der Motorkernbauteile Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse. Die Umstellung der Sandkernfertigung in der BMW-Leichtmetallgießerei auf nachhaltige Bindemitteltechnologie ist abgeschlossen. Der Schwerpunkt der

Autoren:
Dr. Emmerich Weissenbek [1], Bernhard Zabern [2], Dr. Andreas Fent [1], Johann Stastny [2], Christian Högl [1];
[1] BMW Werk Landshut, Leichtmetallgießerei
[2] BMW Steyr, Dieselmotorenentwicklung

Dieser Artikel basiert auf einem Vortrag am Magdeburger Symposium Gießtechnik im Motorenbau 2013 [12].

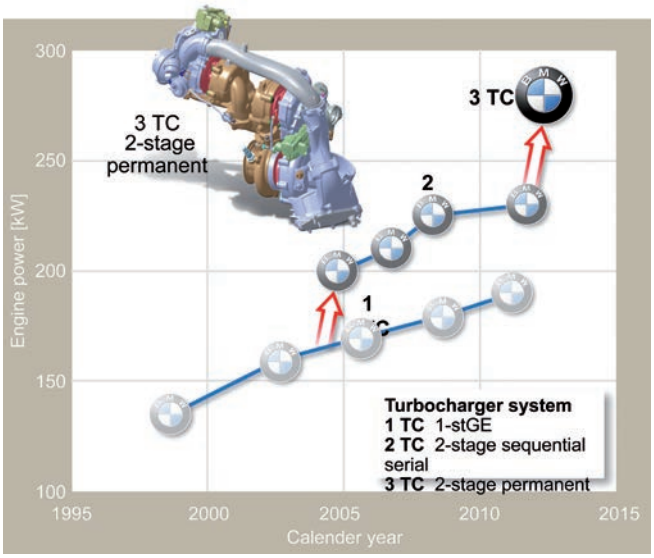

Bild 1: Entwicklung der Leistungsdichte von BMW-Dieselmotoren [5]

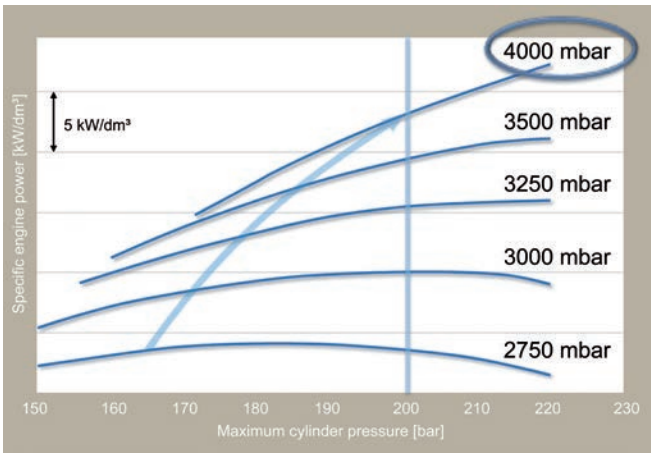

Bild 2: Hauptparameter zur Leistungssteigerung [5]

aktuellen Kokillenwerkzeug-, Prozess- und Bauteilentwicklung liegt nun auf der Nutzung der beschriebenen Vorteile des Vorprozesses Kernfertigung zur weiteren Hebung von Kosten- und Leichtbaupotenzialen im Folgeprozess Gießen innerhalb des Wertstromes Gießerei.

2. Beschreibung Motorkonzept

Zum weiteren Ausbau der Führungsposition im Premiumsegment wurde als Dieselspitzenmotorisierung eine neue BMW TwinPower Turbo-Variante entwickelt. Wesentliche Ziele waren ein Leistungs-, Drehmoment- und Komfortangebot mindestens auf dem Niveau von Achtzylinder-Wettbewerbern, jedoch gleichzeitig ein für bisherige BMW Sechszylinder-Dieselmotoren typisch niedriger Kraftstoffverbauch und ein niedriges Leistungsgewicht.

Aufladung, Einspritztechnik und die triebwerksseitige Darstellbarkeit hoher Zylinderdrücke sind Schlüsseltechnologien zur Leistungssteigerung. Der neue BMW TwinPower Turbo-Dieselantrieb basiert auf den Hauptabmessungen der bisherigen 3.0l Sechszylinder-Reihendieselmotoren [5]. Kernstück des neuen Motors ist ein zweistufiges Aufladesystem bestehend aus drei Abgas-Turboladern. Erstmals wird ein Common Rail-Einspritzsystem mit 2200 bar Systemdruck eingesetzt. Das Triebwerk wurde für einen maximalen Zylinderdruck von 200 bar ausgelegt, innovatives Merkmal ist ein Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse mit Zugankerverschraubung. Das Kühlsystem beinhaltet eine indirekte zweistufige Ladeluftkühlung [6].

Der neue BMW Sechszylinder TwinPower Turbo-Dieselmotor erreicht eine Nennleistung von 280 kW und ein maximales Drehmoment von 740 Nm. Mit einer spezifischen Leistung von 93,6 kW/l Hubraum nimmt er die Spitzenposition unter Seriendieselmotoren ein. Durch umfangreiche Reibleistungsmaßnahmen wird trotz höherer Zünddruckauslegung das Reibleistungsniveau bisheriger BMW Sechszylinder-Dieselantriebe erreicht. Der BMW X5 M50d erreicht in nur 5,4 s die 100 km/h-Marke und liegt mit einem Normverbrauch von 7,5 l/100 km um mindestens 18 % unter den Wettbewerbern. Der BMW M550d xDrive ist mit einer Beschleunigung 0–100 km/h in 4,7 s und einem Normverbrauch von 6,3 l/100km in seiner Kategorie konkurrenzlos. In der BMW 5er-Baureihe wird der neue Dieselantrieb ausschließlich mit der Abgasstufe EU6 angeboten, die Abgasanlage ist serienmäßig mit einem NOx-Speicherkatalysator ausgerüstet.

2.1 Herausforderungen Bauteilfestigkeit durch Aufladung

Hohe Fahrdynamik verbunden mit niedrigem Kraftstoffverbrauch war immer schon eine Domäne der BMW Dieselfahrzeuge. Mit diesen Eigenschaften stellen die Dieselantriebe wichtige Bausteine der BMW-Strategie „EfficientDynamics" dar. Neben einer Vielzahl direkter motorischer Verbrauchsmaßnahmen kommt dabei der Optimerung der Zylinderleistung je Hubraum eine zentrale Bedeutung zu (siehe Bild 1). Dadurch können Fahrleistungen großvolumiger Motoren erreicht werden, gleichzeitig wird der Verbrauchs- und Gewichtsvorteil kleinvolumiger Motoren bewahrt. Mit der Einführung des ersten zweistufig aufgeladenen Sechszylinder-PKW-Seriendieselmotors durch BMW im Jahr 2004 wurde diesbezüglich ein neues Kapitel aufgeschlagen [1]; BMW hat diesen Weg in den Folgejahren konsequent fortgesetzt: 2011 lief mit dem 640d bereits die vierte Generation der zweistufig aufgeladenen BMW Sechszylinder-Dieselmotoren an [5].

Mit steigenden Ladedrücken verschieben sich die Optima der Leistungsdichte zu höheren Zylinderdrücken, gleichzeitig nimmt die Sensitivität der Leistungsdichte auf den maximalen Zylinderdruck deutlich zu (Bild 2). Entsprechend dieser Zusammenhänge wurden die Schlüsseltechnologien für den neuen Motor ausgewählt:

- zweistufige Aufladung im nahezu gesamten Motorkennfeld für höchste Ladedrücke
- indirekte Ladeluftkühlung mit Zwischenkühlung zwischen Nieder- und Hochdruckstufe
- druckgesteigertes Common Rail-Einspritzsystem
- Triebwerksauslegung für erhöhte maximale Zylinderdrücke

3. Grundmotor und konstruktive Lösung Kurbelgehäuse

Das Triebwerk des neuen BMW Sechszylinder TwinPower Turbo-Dieselmotors basiert auf dem bekannten 2.0 l/3.0 l BMW-Baukasten mit einem einheitlichen Zylindervolumen von 499 cm³ [5]. Der Hub von 90 mm, die Bohrung von 84 mm und Zylinderabstand von 91 mm sind identisch [6], wodurch eine Integration in den existierenden BMW-Fertigungsverbund mit minimalem Aufwand möglich ist.

Bild 3: Zylinderkurbelgehäuse mit Zugankerkonzept [5]

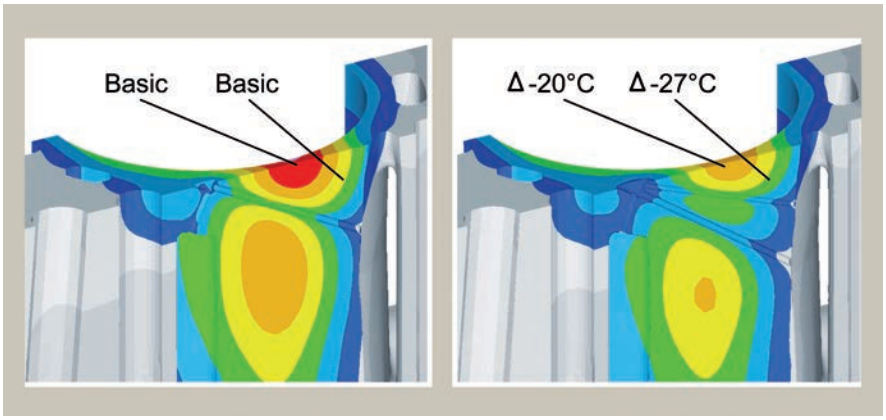

Bild 4: Vergleich Stegbohrung Basis- zu neuem TwinPower Turbo-Dieselmotor [5].

3.1 Zylinderkurbelgehäuse

Bei der Gestaltung des Zylinderkurbelgehäuses mussten folgende Konflikte gelöst werden:

- Darstellung in Vollaluminium-Bauweise bei einem Zünddruck von 200 bar
- Integration in den Fertigungsverbund mit vorgegebenen Hauptabmessungen
- Übernahme der Anbauteile vom Sechszylinder-Basismotor

Um das Vollaluminium-Zylinderkurbelgehäuse unter den o. a. Randbedingungen zu ertüchtigen, wurde eine Kombination aus Werkstoff- und Gestaltungsmaßnahmen umgesetzt. Analog zum BMW Basis-Sechszylindermotor wird als Werkstoff AlSi7MgCu0,5 mit einer T6-Wärmebehandlung verwendet. Der Wärmebehandlung ist ein sogenannter „HIP-Prozess“ (HIP = heiß-isostatisches Pressen) vorgeschaltet. Dadurch kann die Bauteilfestigkeit um durchschnittlich 12 % gesteigert werden, zusätzlich mussten die Vorspannkräfte der Zylinderkopf- und Hauptlagerschrauben erhöht werden. Um einen optimalen Kraftfluss zu erhalten und weil eine Direktverschraubung im Aluminiumwerkstoff nicht mehr möglich war, wurde ein Schraubverbund mit einem im Al-Kurbelgehäuse eingepressten Zugankerbolzen aus Stahl entwickelt (siehe Bild 3).

Für die Zylinderlaufbahn wurde die thermisch gefügte GG-Buchse mit 1 mm Wandstärke übernommen. Um den Stegbereich thermisch stabil zu halten bzw. eine ausreichende Wärmeabfuhr zu gewährleisten, wurde im Vergleich zum Basismotor eine zweite Steg-Kühlungsbohrung eingebracht. Als festigkeitsoptimale Lösung wird die obere Kühlungsbohrung mit geringerem Durchmesser ausgeführt. Diese konstruktive Lösung führt natürlich auch zu einer gesteigerten Anforderung an die Dichtheit und damit an das Gefüge. Die Stegtemperaturen auf der Brennraumfläche können damit um bis zu 27 °C reduziert werden. Ausführung und Temperaturverteilung sind in Bild 4 dargestellt.

4. Gießtechnik für Kurbelgehäuse

4.1 Aluminium-Kurbelgehäuse 1. Generation

Im Gegensatz zum Zylinderkopf, bei dem sich der Bereich schneller Erstarrung mit dem Bereich hoher Belastung im Brennraum beim Schwerkraftguss normalerweise deckt, sind der funktionsorientierte Ansatz „Maximierung der Lagerstuhlfestigkeit“ und der prozessorientierte Ansatz „Anschnitt in den dicken Lagerstuhlbereichen“ diametral gegenläufig.

Beim im Jahr 2005 eingeführten Sechszylinder-Diesel-Zylinderkurbelgehäuse im Kokillenguss hat die Leichtmetallgießerei den Anschnitt an die weniger belastete Ölwanne („Schürzenanguss“) verlegt, die Erstarrungsrichtung (Niederdruckerstarrung) von oben nach unten aber beibehalten. Für das deutlich höher belastete V8-Bauteil wurde bereits 2004 die Erstarrungsrichtung umgedreht und das Gießverfahren „Niederdruckbefüllung mit Schwerkrafterstarrung“ eingesetzt. Die Umsetzung dieser Innovation im Kleinserien-Sandgussverfahren (wegen der deutlich geringeren Stückzahlen des V8-Diesels) war werkzeug- und anlagentechnisch leichter möglich. Die Gewichtsentwicklung durch die Substitution GG auf Aluminium ist in Bild 5 dargestellt [3].

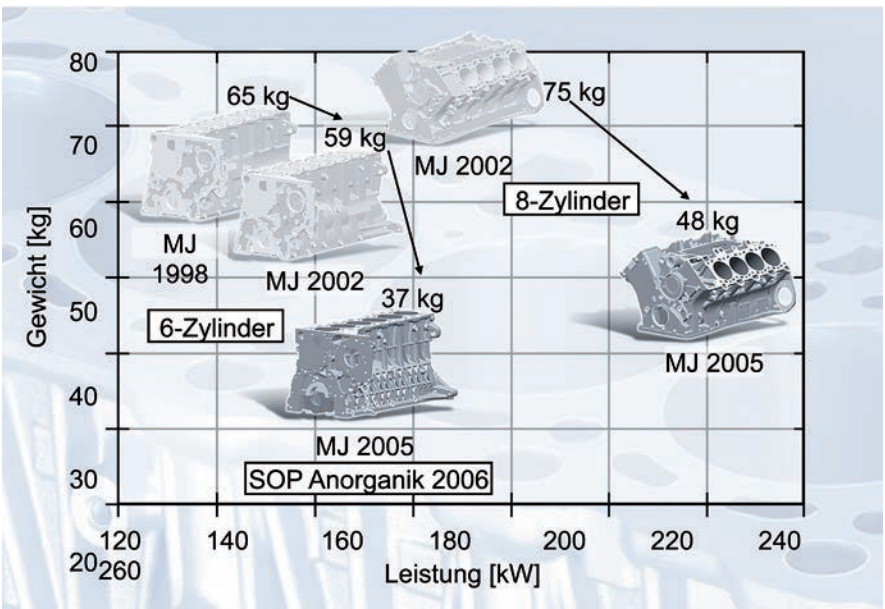

Bild 5: Entwicklung von Gewicht und Motorleistung des BMW Diesel-Kurbelgehäuses bis 2005 [3]

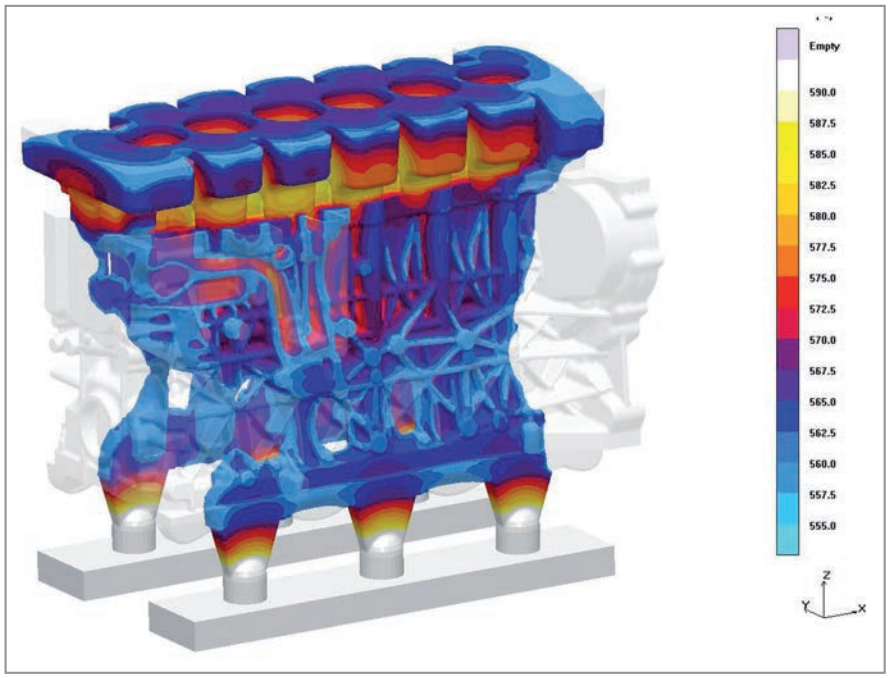

Bild 6: Temperaturverteilung bei der Erstarrung des Zylinderkurbelgehäuses [4]

4.2 Aluminium-Kurbelgehäuse 2.Generation

In der Gießkonzeptfestlegung der nachfolgenden Dieselmotorengeneration wurden diese Erkenntnisse hinsichtlich Bauteilfestigkeit und Erstarrungsrichtung erstmals im Kokillenguss umgesetzt [4, 7, 8]. Damit wurde die Basis für höhere Bauteilfestigkeitswerte im Bereich des (die Zünddruck- und Leistungsentwicklung) limitierenden Lagerstuhls gelegt. Die Verwendung einer Kokille ermöglicht auch in den anderen Bereichen des Bauteiles eine schnelle Erstarrung und damit gute Festigkeitswerte sowie geringe Porositäten.

Die „Niederdruckbefüllung mit Schwerkrafterstarrung“ kombiniert die Vorteile des Niederdruckgusses und des Schwerkraftgusses (Bild 6), die gesteuerte Füllung des Werkzeuges sowie die Erstarrung von unten nach oben (Schwerkrafterstarrung) zum Brennraum hin und konnte auch in den damals neuen Fertigungsstrukturen der Leichtmetallgießerei umgesetzt werden.

Die Änderung der Erstarrungsrichtung und die neuen Entwicklungen im Bereich der Aufladung lassen zusätzlich den Zylindersteg in den Fokus der Motor- und Gießentwicklung treten. Eine schnelle Erstarrung und ein geringer DAS im Lagerstuhlbereich führen zwangsweise zu einem höheren DAS im Stegbereich (siehe auch Bild 10, 1. Generation) und umgekehrt (2. Generation). Dieser dialektische Ansatz führt entweder zu inakzeptablen Einschränkungen der Motorenentwicklung oder der Substitution von Aluminium durch das dreimal schwerere Gusseisen, verbunden mit einer deutlichen Gewichtszunahme in Motor und Vorderwagen.

4.3 Anorganische Sandkernfertigung: Grundlagen

Die Herausforderungen für die Entwicklung eines neuen umweltfreundlichen Bindersystems bestanden in der großen Anzahl von Eigenschaften, die das System erfüllen muss [7, 8]:

- hohe Fließfähigkeit der Kernsandmischung
- gutes Festigkeitsniveau unmittelbar nach der Kernherstellung
- hohe Heißfestigkeit der Kerne
- gute Lagerstabilität der Kerne
- Produktivität mindestens auf dem Niveau der klassischen Verfahren
- Recyclingfähigkeit der Kernsande
- geruchlose Herstellung und geruchloser Abguss der Kerne
- keine Entstehung schädlicher Gase während der Kernherstellung und dem Abguss
- guter Kernzerfall nach Abguss der Bauteile
- möglichst keine Kondensatbildung an der Gießkokille

Das anorganische Bindemittel der ASK Chemicals (INOTEC®) ist ein Bindemittel auf Silikatbasis, vereinfacht gesagt in Wasser gelöster Quarzsand. Es ist daher mit den Wassergläsern verwandt, die im Wasserglas-CO_2-Prozess genutzt werden, jedoch findet anders als im bekannten CO_2-Prozess die Aushärtung nicht rein chemisch statt, sondern beruht auf einer Kombination aus physikalischem Trocknungsprozess und chemischer Reaktion. Deshalb werden beim INOTEC®-Prozess beheizte Kernkästen eingesetzt. Mit der Wärme des Kernkastens (150–200 °C) wird zum einen das Wasser, das als Lösungsmittel für die Silikate dient, aus dem Kern ausgetrieben, zum anderen wird eine chemische Reaktion initiiert, die zu einer Vernetzung der Silikatmoleküle führt. Als Nebenprodukt dieser Vernetzung entsteht ebenfalls Wasser (chemisch findet eine sogenannte Kondensationsreaktion statt; damit bezeichnet man eine Reaktion, bei der sich zwei Moleküle unter Abspaltung eines kleineren Moleküls, in diesem Fall Wasser, miteinander verbinden). Es wird daher Wasser aus zwei unterschiedliche Quellen (Lösungsmittel + Reaktionsnebenprodukt) bei der Aushärtung des Sandkernes frei. Idealerweise wird dieser chemisch-physikalische Aushärtungsprozess mit heißer Spülluft (ca. 150 °C) unterstützt, um Taktzeiten bei der Kernherstellung zu verringern und so ein Maximum an Feuchte aus dem Kern auszutreiben. Die Restfeuchte verbleibt im Kern und ist beim Abguss als Wasserdampf zu sehen.

Die Aushärtungsreaktion des reinen Silikats ist zum Teil reversibel (Gleichgewichtsreaktion), d. h. bei Eintrag von Energie und Wasser (z. B. bei hoher Luftfeuchtigkeit und hohen Temperaturen) kann die Rückreaktion erfolgen und die Vernetzung der Silikate aufgehoben werden – die Kerne würden an Festigkeit verlieren und zerbrechen. Dies kann verhindert werden, indem Wasser aus diesem Gleichgewicht entfernt wird, also durch trockene Lagerung. Um eine industrielle Nutzung zu ermöglichen, werden daher Additive (sogenannte Promotoren) eingesetzt, die diese Rückreaktion deutlich verzögern und somit ein prozesssicheres Handling der Kerne auch bei „normaler“ Lagerung zulassen.

4.4 Anorganische Sandkernfertigung: Zusammenfassung und Vorteile

Die Vorteile der anorganischen Sandkernfertigung sind zwischenzeitlich umfangreich publiziert [7, 8, 9] und innerhalb der BMW AG nicht nur Teil der Gießereistrategie, sondern auch Teil der Konzernstrategie „CleanProduction“ (siehe auch Nachhaltigkeitsbericht der BMW AG [10]). Daher an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung:

Bisher beruhte die Aushärtung von Sandkernen mit handelsüblichen organischen Bindersystemen auf katalytisch (Coldbox durch

Amin) oder thermisch (Warmbox, Hotbox) eingeleiteten Vernetzungsreaktionen (Polymerisation). Die harzumhüllten Quarzsandkörner werden durch kleberähnliche Binderbrücken bei der Sandkernfertigung miteinander verbunden. Beim Gießen kommt es zum Kontakt mit der heißen Schmelze und daher zu Zersetzungsreaktionen der organischen Binderanteile, ähnlich einer Verbrennung unter Sauerstoffmangel mit entsprechender Rauchentwicklung.

Die neuen wasserglasbasierenden Silikatbinder sind von ihrer chemischen Struktur dem Quarzsand sehr ähnlich. Die Aushärtung des Kernes erfolgt über eine Polykondensationsreaktion, bei der Wasser abgespalten wird. Der Kernsand muss also „nur" durch das heiße Kernschießwerkzeug mit Heißluftspülung getrocknet werden [11].

Die organische Rauch- und Kondensatentwicklung wirkt sich negativ auf

- die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter,
- die Bauteilfestigkeit,
- die Taktzeit,
- die Anlagen- und Werkzeugverfügbarkeit sowie
- die Abluftreinigung und den daraus resultierenden Energieverbrauch aus.

Der Wegfall dieser Verbrennungsprodukte führt zu vielen Vorteilen, die sich in drei Aspekte zusammenfassen lassen, hinsichtlich der

- Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter,
- der Qualität und Festigkeit der Bauteile sowie
- der Kosten.

Die großen technologischen Anstrengungen mussten bisher im Feld der vorgelagerten Kernfertigung erbracht werden um die Serieneinführung dieser anspruchsvollen Technik überhaupt zu ermöglichen. Die Vorteile basierend auf der neuer Bindertechnologie haben sich im ersten Ansatz natürlich auch auf die nachfolgende Kokillengieß- und Werkzeugtechnologie ausgewirkt. Daher eine kurze Zusammenfassung der zu diesem frühen Zeitpunkt bereits erzielten Optimierungspotenziale im Gießprozess, basierend auf dem Einsatz von anorganisch gebundenen Sandkernen:

- Taktzeit - 15 %
- Produktivität +15 %
- Werkzeuginstandhaltung - 50 %
- Werkzeugstandzeit + 25 %

Erst nach einer umfassenden Serienerfahrung über mehrere Millionen Bauteile sowie viele unterschiedliche Bauteil- und Werkzeugkonstruktionsstände (Kurbelgehäuse, Zylinderköpfe für Otto- und Dieselmotoren, Fahrwerksteile) ist eine zusammenfassende Bewertung dieser Technologie und ihrer Potenziale möglich. Nun können auch alte, eingefahrene Grenzen der Werkzeug- und Gießkonzeptentwicklung neu bewertet und ggf. überschritten werden.

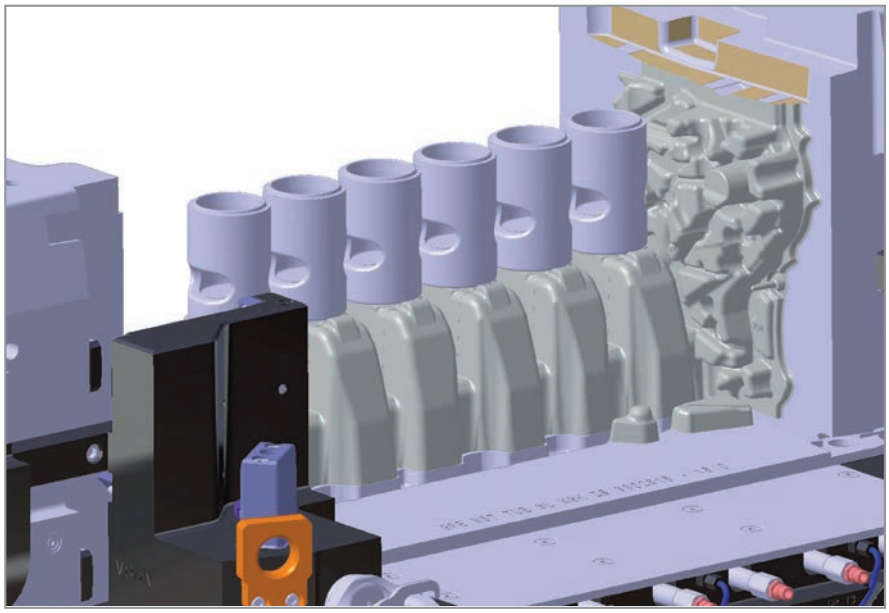

Bild 7: Speiserkerne in der Kokille

5. Gießtechnik für Kurbelgehäuse 3.Generation

Die bereits dargelegten Entwicklungen in der Motorentechnik haben eine neue Betrachtung der Gießtechnik für Kurbelgehäuse erforderlich gemacht. Die strategische Ableitung eines Zielekataloges für ein neues Gieß- und Werkzeugkonzept führt zu folgenden Prämissen:

1. deutliche Steigerung der Festigkeit im Zylindersteg (Aufladung)
2. leichte Steigerung der Festigkeit im Lagerstuhl
3. LDS-Tauglichkeit des Gefüges (Laufflächenbeschichtung)
4. Absenkung der Taktzeit
5. Reduktion des Kreislaufmaterials
6. hohe Dichtheitsanforderung nach Bearbeitung Zylindersteg/Zuganker
7. Reduzierung des Kokillenverschleißes (Standzeit, Wartungskosten)
8. Nutzung vorhandener Strukturen und Werkzeugkonzepte

Nach verschiedenen, umfangreichen Konzeptuntersuchungen stellte sich nur eine Lösung als zielführend heraus:

Die Basis ist die Speisung im thermischen Zentrum

Dies ist der Bereich, wo ohne massive Werkzeugbeeinflussung der Hotspot am Ende der Erstarrung entsteht. Das thermische Zentrum liegt in der Mitte des Zylindersegments im Bereich Lagerstuhl/unterer Totpunkt des Kolbens. Alle bisherigen Lösungen waren durch die langen Nachspeisewege (wegen der Bauhöhe) von oben nach unten oder von unten nach oben kompromissbehaftet. Speziell die Anforderung „Dichtheit der Zugankerbohrungen" führte immer wieder zu prozessualen Einschränkungen, wie etwa lange Erstarrungszeiten oder beheizte Bereich des Werkzeuges. Damit steigt natürlich der Verschleiß und die Wartungsintensität der Gießkokillen. Erst die umfangreiche Erfahrung im Kokillenguss mit anorganisch gebundenen Sandkernen (z. B. Fahrwerksteile mit Kernen und innenliegenden Speisern) und die konsequente Nutzung von deren Vorteilen, speziell der

- hohen thermischen Stabilität,
- der hohen chemischen Stabilität sowie der
- „Rauchfreiheit" bzw. sehr geringen Kondensatbildung

zeigten diesen Weg als gangbar auf.

5.1. Zentralspeiserkonzept: Technische Umsetzung

Bild 7 zeigt die Anordnung der Speiserkerne in der geöffneten Gießkokille. Die Einzelspeiser werden in einer hochautomatisierten Kernschießanlage mit Mehrfachwerkzeug gefertigt, anschließend manuell in die Kokille eingelegt und sind im vergossenen Zustand nur 500 g schwer. Dieser ferti-

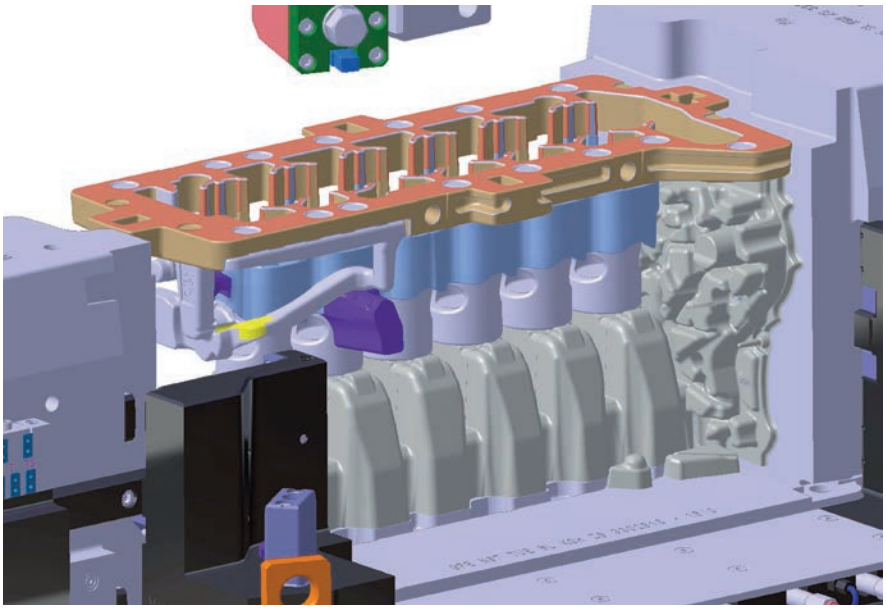

Bild 8: Speiserkerne und Wassermantel-Wasserpumpenkernpaket in der Kokille

gungstechnische Mehraufwand geht natürlich in die Gesamtbetrachtung des Systems ein. Bild 8 zeigt den nächsten Arbeitsschritt in der Kerneinlegereihenfolge: Das mit dem Wasserpumpenkern (Funktionsintegration Wasserpumpengehäuse ins Kurbelgehäuse) vormontierte Wassermantelkernpaket kann wegen des geringen Gewichtes auch beim Sechszylindermotor manuell in die Kokille eingelegt werden. Aufwendige Kerneinlegevorrichtungen, die die Zugänglichkeit der Kokille erschweren und die Platzsituation für den Mitarbeiter verschlechtern, müssen nicht eingesetzt werden. Die Kokille schließt, der Kokillenhohlraum wird mit Aluminium gefüllt. Die an der Stahlkokille anliegenden Bereiche erstarren zuerst (dies gilt speziell für den Lagerstuhl, den Zylindersteg und den Zugankerbereich), was zu kurzen Erstarrungsintervallen und einem geringem Dendritenarmabstand (DAS) führt. Natürlich kommt der Kokillenentlüftung eine entscheidende Rolle zu: Die erwärmte Luft aus dem Kokillenhohlraum und die zwischen den anorganisch gebundenen Sandkernen eingelagerte Luft muss entweichen können, das Risiko der Versottung der Entlüftungskanale ist allerdings durch die „Rauchfreiheit“ massiv reduziert.

Der Erstarrungsbeginn an der Oberfläche der Stahlkokille führt zu geringen Oberflächentemperaturen des Gießwerkzeugs und damit zu größeren Wartungsintervallen, geringerem Wartungsaufwand und einer längeren Kokillenlebensdauer. Die Erstarrung von außen nach innen führt ebenso zu einer „Halbierung der Speisungswege“ – von oben zum Zentralspeiser sowie zeitgleich von unten zum Zentralspeiser – und damit zu einer deutlich Absenkung der Erstarrungszeit. Die Bauteilkonstruktion ist in weiten Bereichen vom Basismotor abgeleitet, auch die Kokillenkonstruktion kann trotz stark veränderter Erstarrungsmorphologie vom Basismotor konzeptionell übernommen werden, die Anschlüsse und Gestellmaße sind unverändert. Das neue Werkzeug- und Erstarrungskonzept „Zentralspeiser“ kann also in bestehende Strukturen integriert werden.

5.2. Zentralspeiserkonzept: Festigkeits- und Kostenvorteile

Die weit verbreitete, klassische Niederdruckerstarrung (von oben nach unten, vom Brennraum zur Ölwannenfläche) führt zu einem sehr guten DAS im Stegbereich, aber zu deutlich langsamerer Erstarrung im Lagerstuhl (siehe Bild 9, Kokillenguss 1. Generation). Die Drehung der Erstarrungsrichtung (Kokillenguss 2. Generation) verbessert die Lage im Lagerstuhl drastisch, führt aber zu einem Ansteigen des DAS im Bereich des Zylinderstegs. Das neue Zentralspeiserkonzept verbindet die Vorteile der beiden und führt sowohl im Lagerstuhl, aber speziell im Zylindersteg zu deutlich reduzierten DAS-Werten. Durch die konstruktiven Einschränkungen (Zylindersteg, Lagerbreite) hat die Motorkonstruktion in diesen Bereichen nur wenig Spielraum und ist daher auf ein extrem gutes Gussgefüge angewiesen.

Die DAS-Verteilung der drei Konzepte ist in Bild 10 dargestellt (links oben 1. Generation, rechts oben 2. Generation, Mitte unten 3. Generation mit Zentralspeiser). Es ist erkennbar, dass das neue Zentralspeiserkonzept zu DAS-Vorteilen in allen Bauteilbereichen führt. Die wärmste Stelle (thermisches Zentrum, Anbindung des Speisers) und damit die Stelle mit dem lokal höchsten DAS liegt im Bereich des unteren Totpunktes des Kolbens, eine Stelle, die sowohl mechanisch als auch thermisch nicht übermäßig belastet ist. Auch der Zugankerbereich erstarrt sehr schnell und kann von außen über die Kokille beeinflusst werden. Die Neigung zur Undichtheit nach der mechanischen Bearbeitung sinkt drastisch, die Abdichtquoten sind verschwindend gering. Die Beschichtungstauglichkeit (LDS analog neuer Vierzylinder-Ottomotor) wurde anhand von Schliffen und Stichversuchen bestätigt, auf eine Umsetzung innerhalb der aktuellen Dieselmotorenfamilie wurde verzichtet.

Die aus der strategischen Ableitung des Zielkataloges stammenden Punkte können zusammenfassend positiv bewertet werden:

- deutliche Steigerung der Festigkeit im Zylindersteg (Aufladung) erl.
- leichte Steigerung der Festigkeit im Lagerstuhl erl.
- LDS-Tauglichkeit des Gefüges (Laufflächenbeschichtung) erl.
- Absenkung der Taktzeit - 20 %
- Reduktion des Kreislaufmaterials - 85 %
- hohe Dichtheitsanforderung Zylindersteg/Zuganker erl.

Bild 9: Vergleich des DAS in kritischen Bereichen des Kurbelgehäuses

	Kokillenguss 1.Generation	Kokillenguss 2.Generation	Kokillenguss 3.Generation
	DAS [µm]	DAS [µm]	DAS [µm]
Zylindersteg	30	45	20-25
Lagerstuhl	45-50	30	25

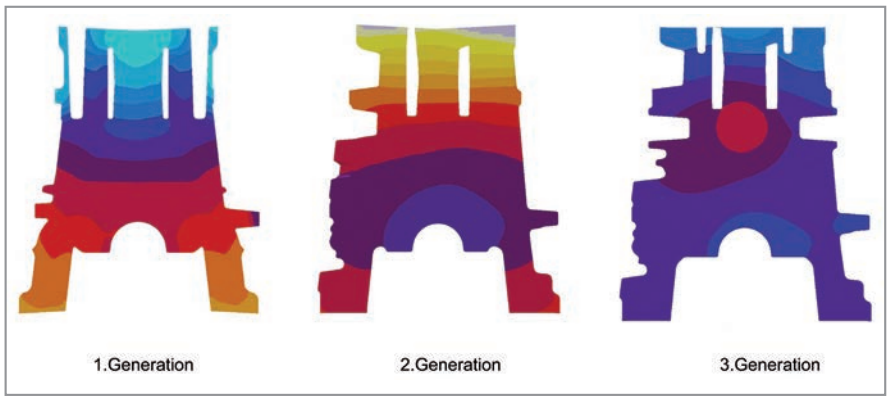

Bild 10: Vergleich des DAS im Querschnitt des Kurbelgehäuses

- Reduzierung Kokillenverschleiß erl.
- Nutzung vorhandener Strukturen und Werkzeugkonzepte erl.

6. Zusammenfassung

Der neue BMW Dieselantrieb besitzt eine Nennleistung von 280 kW und ein maximales Drehmoment von 740 Nm. Durch umfangreiche Reibleistungsmaßnahmen wird trotz höherer Zünddruckauslegung das Reibleistungsniveau bisheriger BMW Sechszylinder-Dieselantriebe erreicht und damit die Basis für einen deutlichen Vorteil in der Disziplin Kraftstoffverbrauch gegenüber Wettbewerbern im Segment „großer“ Dieselmotoren gelegt. Der neue BMW Sechszylinder TwinPower Turbo-Dieselantrieb ist durch sein hohes Maß an Sportlichkeit, kombiniert mit einem in diesem Segment bislang unerreicht niedrigen Kraftstoffverbrauch ein weiteres Paradebeispiel für die BMW Strategie „EfficientDynamics”.

Die nachhaltige Neuentwicklung der Gießtechnik für Kurbelgehäuse, basierend auf den Vorteilen der in der BMW-Leichtmetallgießerei erstmals weltweit vollständig eingeführten anorganischen Sandkernfertigung, führt zu den für die Motorentwicklung notwendigen Festigkeitssteigerungen im Bereich Lagerstuhl und Zylindersteg. Die Festigkeitssteigerung spiegelt sich auch in deutlich abgesenkten Erstarrungszeiten wider und zeigt zudem massive Kostenvorteile.

Diese nachhaltige Technologie ist Teil des Fertigungsbaukastens Kurbelgehäuses und wird in zukünftigen Motorgenerationen angewendet. ◄

7. Literaturhinweise

[1] Der neue BMW Sechszylinder-Dieselmotor mit Stufenaufladung, MTZ 66 (2005) Nr. 5, S. 334–344.
[2] Neu überarbeitete Dieselmotoren für die BMW 7er Reihe, 26. Internationales Wiener Motorensymposium 2005.
[3] Die neuen Sechs- und Achtzylinder-Leichtbau-Dieselmotoren von BMW mit Aluminium-Kurbelgehäuse, 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2005.
[4] Anorganische Kernfertigung für hochbelastete Zylinderköpfe am Beispiel des neuen BMW Sechszylinder-Dieselmotors, Magdeburger Symposium Gießtechnik im Motorenbau 2009.
[5] Die neuen BMW 4-/6-Zylinder Dieselmotoren mit 2-stufiger Aufladung 20. Aachen Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2011.
[6] Die neuen Diesel Spitzenmotorisierungen von BMW, 33. Internationales Wiener Motorensymposium 2012.
[7] Nachhaltiger Leichtmetallkokillenguss durch Anorganische Sandkernfertigung, ATZ Produktion 3 (2010), Nr. 03/04, S. 62–67.
[8] Zylinderkopffertigung der Zukunft:, MTZ 72 (2011), Nr 06, S. 484–489.
[9] BMW Leichtmetallgießerei setzt auf anorganisch gebundene Kerne, Gießerei 95 (2008) Nr. 6, S. 30–33.
[10] BMW Sustainable Value Report 2005/2006 ff.
[11] Inotec bewährt sich in der Praxis, Gießerei 95 (2008) Nr. 1, S. 44–48.
[12] Anorganische Kernfertigung für hochbelastete Zylinderköpfe am Beispiel des neuen BMW Sechszylinder Dieselmotors, Anorganische Kernfertigung für hochbelastete Zylinderköpfe am Beispiel des neuen BMW Sechszylinder Dieselmotors, Magdeburger Symposium Gießtechnik im Motorenbau 2009.