

# Das Zylinderkurbelgehäuse der neuen R4-TFSI- Motorengeneration von Audi

Die Markteinführung des neuen 1,8-l-4V-TFSI-Motors der Motorenbaureihe EA888 war der Anfang einer umfassenden Erneuerung der R4-Ottomotoren-Palette von Audi im Bereich von 1,8 bis 2,0 l Hubraum. Die neue Motorenbaureihe EA888 wird in den nächsten Jahren die EA113-Baureihe im gesamten VW-Konzern sukzessive ersetzen, noch in diesem Jahr folgt dem 1,8-l-Motor bereits eine 2-l-Variante. Dieser Beitrag widmet sich dem Zylinderkurbelgehäuse der neuen EA888-Motoren, das in enger Zusammenarbeit mit Eisenwerk Brühl als völlige Neuentwicklung entstanden ist.

## 1 Einleitung

Um für die neue EA888-Motorengeneration die von Audi selbst gesteckten Ziele hinsichtlich erhöhtem Leistungspotenzial, besserem Komfort, erhöhter Robustheit und verbesserter Wartungsfreundlichkeit zu erreichen, wurden der Grundmotor sowie die Anbauteile komplett neu entwickelt [1, 2]. Da durch das Design des Zylinderkurbelgehäuses (im Folgenden mit ZKG abgekürzt) das Gesamtkonzept eines Motors entscheidend beeinflusst wird, wurde bei der Entwicklung des ZKGs ein entsprechend hoher Aufwand betrieben.

## 2 Entwicklungsziele und Konzept des EA888-ZKGs

Wesentliche Ziele bei der Entwicklung der EA888-Motorenbaureihe und insbesondere des EA888-ZKGs waren:

- Erhöhung des Fahrkomforts
- Reduzierung der Herstellkosten
- Verbesserung der Wartungsfreundlichkeit
- Robustheitssteigerung durch Funktionsintegration
- Reduzierung des Gewichts
- Kompakte Abmessungen für die Verwendung als Plattform-Motor
- Weltweite Produzierbarkeit im Konzernverbund
- Verringerung des Verbrauchs und Erhöhung der Leistungsfähigkeit.

Die Umsetzung dieser Ziele ergab folgende Merkmale für das EA888-ZKG:

Zur Verbesserung des Fahrkomforts besitzt die neue EA888-Motorenbaureihe einen Massenausgleich 2. Ordnung, dessen Ausgleichswellen (AGW) erstmalig im VW-Konzern mit Höhenversatz direkt im ZKG gelagert sind. Durch dieses Motorkonzept kann die aufwändige und teure Add-On-Lösung eines AGW-Getriebes im Bereich des Ölsumpfs entfallen. Zusätzlich erhöht sich durch die seitlichen AGW-Tunnel die Gesamtsteifigkeit des ZKGs.

Durch die funktions- und kostenoptimierte Konzeption des Gesamtmotors (Funktionsintegration) sowie durch die Verwendung von Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) für das ZKG konnten die Herstellkosten im Vergleich zu den Vorgängermotoren der EA113-Baureihe deutlich verringert werden. Weiterhin ergeben sich aufgrund der hohen Stückzahlen durch die strategische Ausrichtung des EA888-Motors als Plattformmotor („Global engine“) weitere Kosten-Synergieffekte.

Die Wartungsfreundlichkeit des Motors wird durch die auf Lebensdauer ausgelegten Kettentriebe für Steuertrieb, AGW-Trieb und Ölpumpentrieb deutlich verbessert. Die Kettentriebe sind alle an der Vorderseite des ZKGs angeordnet, wobei die Einhausung der Ketten zum Großteil direkt an das ZKG angegossen ist. Diese Konstruktion eliminiert das ungünstige „Dreiländereck“ im Bereich der Zylinderkopf-dichtung. Durch die Integration diverser Funktionen im ZKG (AGW-Lagerung, Kettenkasten, zusätzliche Drucköl-, Ölrücklauf-, Blowby- und Wasserkanäle) konnte insgesamt die Anzahl der Komponenten reduziert und dadurch eine Erhöhung der Wartungsfreundlichkeit und eine Robustheitssteigerung des Gesamtmotors erreicht werden.

Das Spanvolumen am EA888-ZKG-Roh-teil konnte trotz zusätzlicher zu bearbeitender Funktionsflächen gegenüber dem Rohteil des Vorgängermotors (EA113 2-l-TFSI) um über 25 % reduziert werden. Zur Senkung des ZKG-Gewichts wurde weiterhin die Nominal-Wandstärke auf 3,5 mm verringert (Vorgängermotor > 4,0 mm), so dass trotz integrierter AGW-Lagerung eine Gewichtsreduzierung am ZKG-Fertigteil von mehr als 2 kg erreicht werden konnte. Bereiche ohne strukturellen Nutzen wie das Wasserpumpen- und Thermostatgehäuse wurden aus Gewichts- und Funktionsgründen aus dem ZKG ausgegliedert und in Kunststoff ausgeführt. Auf diese Weise ist es gelungen, das Gesamtgewicht des 2-l-EA888-Motors im Vergleich zum Vorgängermotor um 3,2 kg zu reduzieren (DIN 70020GZ).

Wie bei allen Audi-Motoren üblich, wurden für das ZKG und damit auch für den Gesamtmotor äußerst kompakte Abmessungen umgesetzt. Durch die geschickte Anordnung des AGW-Triebs nicht vor, sondern direkt unterhalb des Wassermantels (der erste Lagerstuhl wurde hierfür um 10 mm nach innen gerückt), konnte die Baulänge des -2-l-Vorgängermotors um 12 mm unterboten werden. Die Motoren der EA888-Baureihe eignen sich daher ideal für die Verwendung in den Quer- und Längs-Plattformen des VW-Konzerns. Durch die Beibehaltung von Stichmaß (88 mm) und Blockhöhe (220 mm) sowie durch die Übernahme der meisten Spann- und Aufnahmepunkte wurde zudem die weltweite Produzierbarkeit des Zylinderkurbelgehäuses im Konzernverbund gewährleistet.

Strukturelle Maßnahmen im Bereich der Lagerstühle und der Zylinderrohre ermöglichen auch zukünftig eine weitere Ausreizung des TFSI-Brennverfahrens [3].

## Die Autoren



**Dr. Frank Grunow**  
ist Mitglied der Geschäftsführung für den technischen und operativen Bereich der Eisenwerk Brühl GmbH.



**Dipl.-Ing. Wim Görtz**  
ist Leiter Produktentwicklung bei der Eisenwerk Brühl GmbH.



**Dr.-Ing. Rolf Weber**  
ist Leiter Vorausentwicklung bei der Eisenwerk Brühl GmbH.



**Dr.-Ing. Joachim Böhme**  
ist Leiter der Entwicklung Grundmotor Reihenottomotoren bei der Audi AG in Ingolstadt.



**Dr.-Ing. Joachim Doerr**  
ist Motorverantwortlicher Konstruktion R4-Grundmotor und Bauteil verantwortlicher Konstrukteur für das EA888-ZKG bei der Audi AG in Ingolstadt.



**Dipl.-Ing. Achim Lembach**  
ist Mitarbeiter in der Abteilung Berechnung Grundmotor R4-/V6-Ottomotoren bei der Audi AG in Ingolstadt.



**Tabelle:** Designmerkmale des EA888-ZKGs

**Table:** Design features of the EA888 crankcase

<b>Rohteil</b>	
Anzahl der Kerne	14
Wandstärke nominal	3,5 mm
Erstjustagefläche	Getriebeseite
Gewicht Rohteil (justiert)	42,75 kg
<b>Fertigteil</b>	
Stichmaß	88 mm
Blockhöhe	220 mm
Wassermantelhöhe	62 mm
Zylinderkopf-Schrauben	M10 10.9
Schraubenabstand	83 mm
Hauptlager-Schrauben	M10 10.9
Schraubenabstand	83 mm
Lagerstuhlbreite Nr. 1, 2, 3, 4, 5	[mm] 17/19/19/19/19,75 Lagerstuhl 1 um 10 mm nach innen gerückt
Gewicht Fertigteil	33,4 kg
<b>ZSB-ZKG</b>	
Gewicht ZSB-ZKG inkl. Lagerdeckel, Hauptlager- schrauben und Verschlussdeckel	36,0 kg

Durch die gesteigerte Belastbarkeit des Zylinderkurbelgehäuses und der damit verbundenen erhöhten Leistungsfähigkeit der Motoren können die Verbrauchsvorteile ideal genutzt werden.

### 3 Zylinderkurbelgehäusedesign

Das Zylinderkurbelgehäuse der neuen EA888-TFSI-Motorengeneration ist als Einheitsteil für die 1,8-l- und 2-l-Variante konzipiert. Das größere Hubvolumen beim 2-l-Motor wird durch einen größeren Hub der Kurbelwelle erreicht, der Bohrungsdurchmesser beträgt bei beiden Aggregaten 82,5 mm. Als ZKG-Werkstoff wurde ebenso wie für die Vorgänger-Turbomotoren der EA1113-Baureihe der bewährte Werkstoff GJL-250 gewählt [4].

Das ZKG ist eine klassische Schürzenkonstruktion in Closed-Deck-Ausführung. Die Kurbelwellen-Lagerdeckel (KWLD) an Lagerstuhl 2, 3 und 4 sind zusätzlich seitlich verschraubt. Dies erhöht die Festigkeit der Lagerstühle und verbessert die Akustik. Das Top-Deck-Design kennzeichnet sich dadurch, dass die auslasseitigen Verbindungsstege zwischen den Zylinderrohren und der Kopfplatte für eine optimale Kühlwasserzuströmung zum Zylinderkopf um 6 mm nach unten versetzt sind. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass die Kolbenseitenkraft, deren Maximum einige Millimeter unterhalb des oberen Totpunkts auftritt, auf der Auslassseite (Druckseite) besser abgestützt wird.

Das Kernpaket zur Herstellung des ZKGs besteht aus vier Kurbelraumkernen, sechs Kernen für die interne Medienführung (zweimal Wasser, einmal Drucköl, zweimal Ölrücklauf und einmal Blow-By), zwei Ker-

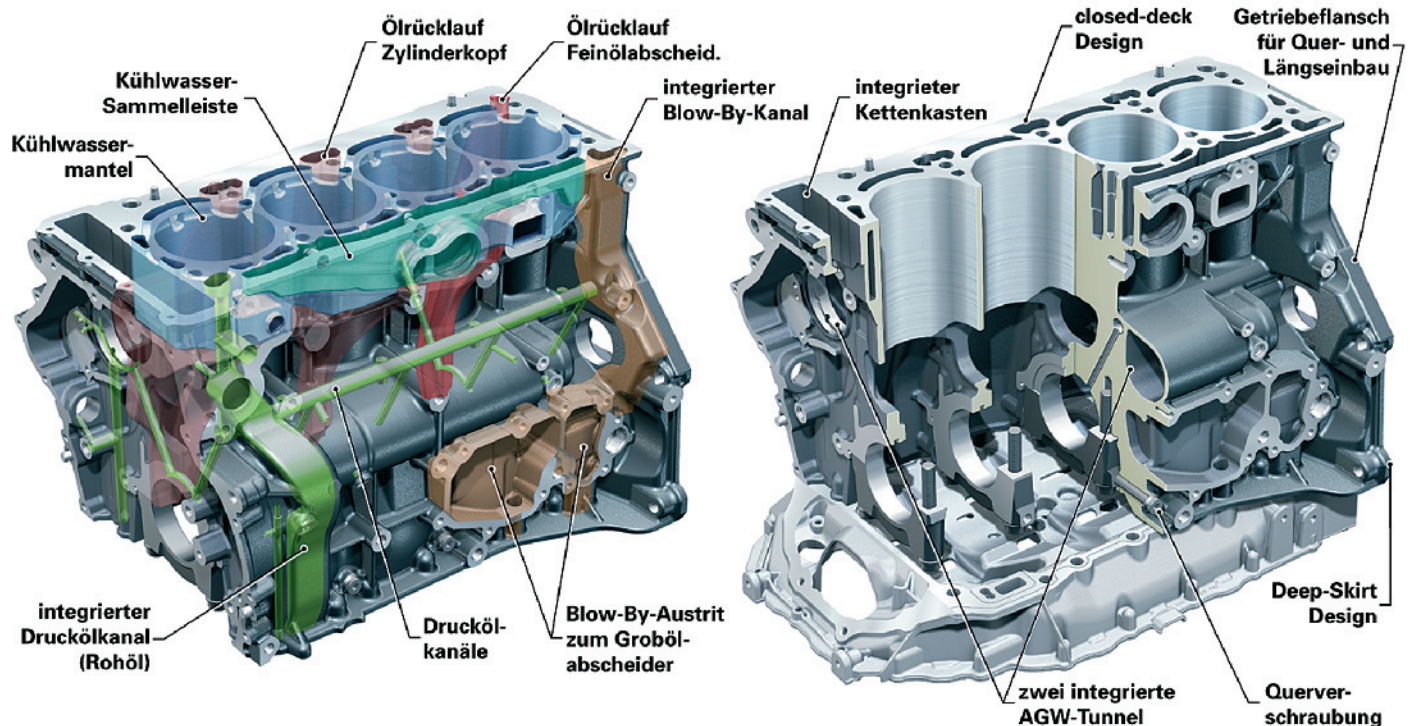
nen für die Stirn- und Rückseite und einem Ober- und Unterkasten für die Seitenwände (abgeformt in Grünsand). Die Kerne für die Medienführung sind in **Bild 1** farblich hervorgehoben.

### 3.1 Medienführung

Wie in [1] bereits beschrieben, wird das Kühlwasser durch die einlassseitig angeflanschte Kühlmittelpumpe zunächst in den Kühlwassermantel des ZKGs (blau) und dann über den Zylinderkopf zurück in eine Sammelleiste (hellgrün) gepumpt. Von dort gelangt es über den Thermostat zum Hauptkühler respektive zurück zur Wasserpumpe.

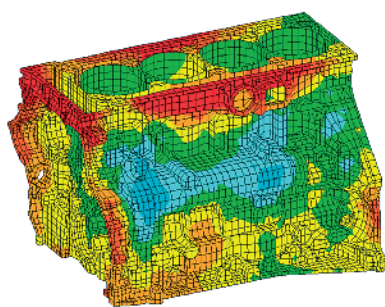
Das Drucköl gelangt von der Ölpumpe über das Ölwannen-Oberteil, Bild 1, in einen im ZKG auf der Einlassseite vorgegossenen Ölkanal (dunkelgrün). Zum Zwecke der Kühlung und Filterung wird es aus dem ZKG ausgeleitet (Ölkühler und -filter sind am Nebenaggregatehalter montiert) und gelangt danach wieder zurück in das ZKG von wo es über eine gebohrte Hauptölgalerie (dunkelgrün) zu den Verbrauchern gelangt.

Die Ölversorgung des Kurbeltriebs und der einlassseitigen AGW erfolgt direkt durch Anbohren der Hauptölgalerie. Die Versorgung der Auslass-AGW erfolgt über eingestochene Nuten in den Lagerstühlen. Die AGWs sind um 42,9 mm höhenversetzt und jeweils auf Mitte der Lagerstühle 1, 2 und 4 gelagert. Der Höhenversatz gleicht

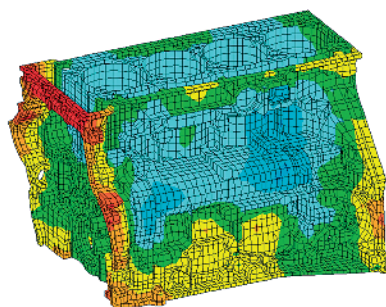


**Bild 1:** ZKG-Fertigteil mit medienführenden Kanälen / Längsschnitt mit Ölwanneoberteil

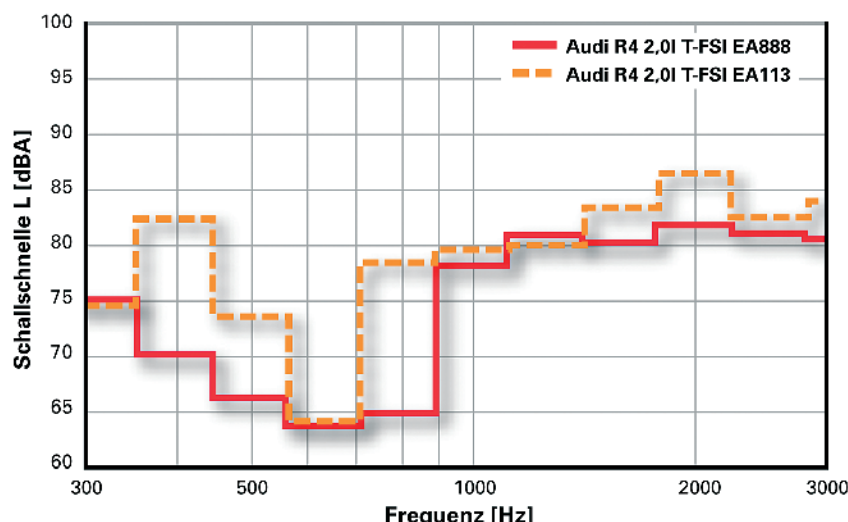
**Figure 1:** Finished crankcase with fluid channels / longitudinal section with upper section of oil sump



Ausgangszustand



optimierte Variante



**Bild 2:** Oben: Schallschnelleverteilung auf der Oberfläche des ZKGs vor und nach der Optimierung, unten: Terzspektrum des neuen EA888-ZKGs im Vergleich zum Serien-EA113-ZKG

**Figure 2:** Top: Particle velocity distribution on the surface of the crankcase before and after optimisation, bottom: Third octave band spectrum of the new EA888 crankcase in comparison with the series-production EA113 crankcase

zu einem großen Anteil die Antriebsmomentenschwankung um die Motorlängsachse aus.

Der integrierte Blow-By-Kanal auf der Einlass-Seite im Bereich des Getriebe-Flansches (in Bild 1 braun dargestellt) ist Bestandteil der ersten Evolutionsstufe (EVO1) der EA888-Baureihe im Zuge der Neueinführung des 2-l-Motors. Ab Juni 2007 ersetzt dieser vorgegossene Kanal bei beiden Aggregaten (1,8 l und 2,0 l) die externe Blow-By-Leitung des in [1] bereits vorgestellten 1,8-l-Motors. Durch die Integration des Blow-by-Kanals in die Kurbelgehäuse-Struktur (der Kanal tritt am Topdeck aus dem ZKG aus und setzt sich im Zylinderkopf fort) wird ein geringeres Temperaturgefälle vom Austritt der Blow-By-Gase an der ZKG-Außenwand bis zum Feinölabscheider im Zylinderkopf erreicht. Dies erhöht die Einfriersicherheit der Kurbelgehäuseentlüftung bei Kurzstreckenbetrieb in sehr kalten Regionen und verbessert die Robustheit und Kompaktheit des Motors nochmals.

Die Ölrückläufe aus dem Zylinderkopf befinden sich auf der Auslassseite des ZKGs (schwachrot). Das abgeschiedene Öl aus dem Feinölabscheider im Zylinderkopf wird durch einen separaten Kanal bis unter Ölspiegel geleitet (rot). In der **Tabelle** sind alle Designmerkmale sowie die wichtigsten Maße und Gewichte des EA888-ZKGs zusammengefasst.

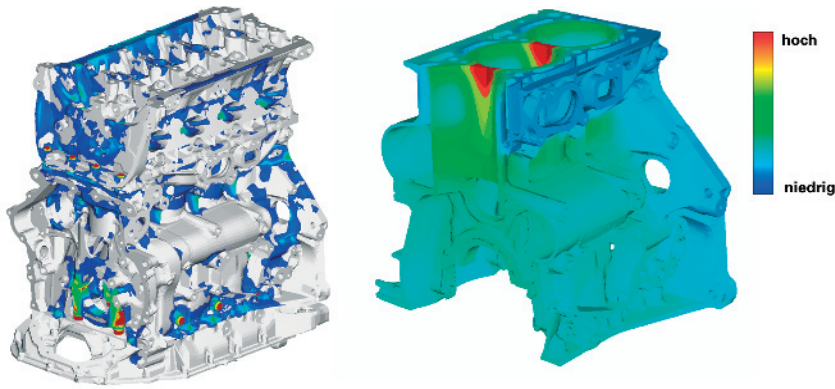
#### 4 CAE-Entwicklung

Um den gestiegenen Ansprüchen gerecht zu werden, ergaben sich bei der Entwicklung des EA888-ZKGs erweiterte Anforderungen an das akustische Verhalten und die Bauteilfestigkeit. Durch die konsequente Nutzung von FEM-Berechnungsmethoden konnten sowohl die Entwicklungszeiten als auch die -kosten deutlich reduziert werden.

##### 4.1 Akustikoptimierung

Bereits in der frühen Konzeptphase wurden umfangreiche Optimierungen des





**Bild 3:** Links: FEM-Modell für Block-Kopf-Verband Berechnungen (mit Spannungsverteilung), rechts: Temperaturverteilung im Zylinderkurbelgehäuse im Nennleistungspunkt

**Figure 3:** Left: FEM model for block/head assembly calculations (with stress distribution), right: Temperature distribution in the crankcase at the rated power point

NVH-Verhaltens durchgeführt. Ziel hierbei war es, mittels Sensitivitätsstudien die für akustische Maßnahmen effektiven Bereiche des ZKGs zu identifizieren und diese durch konstruktive Maßnahmen zu optimieren. In diesem Stadium konnten bereits Wandstärkenverläufe und die Rippengestaltung gezielt rechnerisch bewertet und optimiert werden.

Das Ergebnis der beschriebenen Optimierungen ist eine deutliche Reduktion der Luft- und Körperschallemission im mittel- und hochfrequenten Bereich. **Bild 2** zeigt die Verbesserung der berechneten Schallschnelleverteilung auf der Oberfläche des ZKGs zwischen Ausgangszustand und dem heutigen optimierten Serienstand.

Wie das Bild weiter veranschaulicht, ist es beim EA888-Motor gelungen, das akustische Verhalten des ZKGs im Vergleich zum ZKG des EA113-Vorgängermotors in weiten Bereichen deutlich zu verbessern (siehe Terzspektrum).

## 4.2 Strukturanalysen am Beispiel Lagerstuhl

Bei der strukturellen Auslegung der Lagergasse des ZKGs wurde berücksichtigt, dass der Motorblock als Gleichteil für die komplette EA888-Ottomotoren-Familie zur Anwendung kommt. Dies hatte zur Folge, dass das ZKG für künftige Weiterentwicklungen mit Mitteldrücken bis zu 25 bar ausgelegt wurde, um auch für spezifische Leistungen > 100 kW/l und Drehmomente > 175 Nm/l tauglich zu sein.

Für die Analyse der Lagergasse wurde ein Berechnungsmodell des Kurbelgehäuses aufgebaut, mit dem jeder einzelne Lagerstuhlbereich rechnerisch bewertet und optimiert werden konnte. Zur Detailoptimierung einzelner Bereiche kam die Sub-

Modell-Technik zum Einsatz, welche bei hoher Detailtreue die benötigte Rechenzeit drastisch verringert.

Um die Belastung der Lagerstühle im Strukturmodell so realitätsnah wie möglich abzubilden, wurde die Lagerbelastung als Druckverteilung aus einer Elasto-hydrodynamischen Analyse der Kurbelwelle verwendet. Dies ist notwendig, um ein beanspruchungsgerechtes Design der einzelnen Lagerstühle bei hoher Steifigkeit und geringem Gewicht zu erreichen.

Die Eignung des Werkstoffes GJL-250 wurde sowohl durch ausreichend hohe rechnerische Dauerfestigkeiten als auch durch Bauteilprüfungen und Dauerläufe verifiziert und abgesichert.

## 4.3 Thermo-Mechanik-Analyse am Beispiel Block-Kopf-Verband

Zur Absicherung des Kurbelgehäuseverhaltens im Bauteilverbund mit dem Zylinder-

kopf und im realen Motorbetrieb wurde ein Modell des Kurbelgehäuses mit allen relevanten Bauteilen und Belastungen sowie der fahrzeugspezifischen Lagerung erstellt. Dieses komplexe FEM-Modell stellte die Basis für Block-Kopf-Verband-Berechnungen dar, **Bild 3** (links).

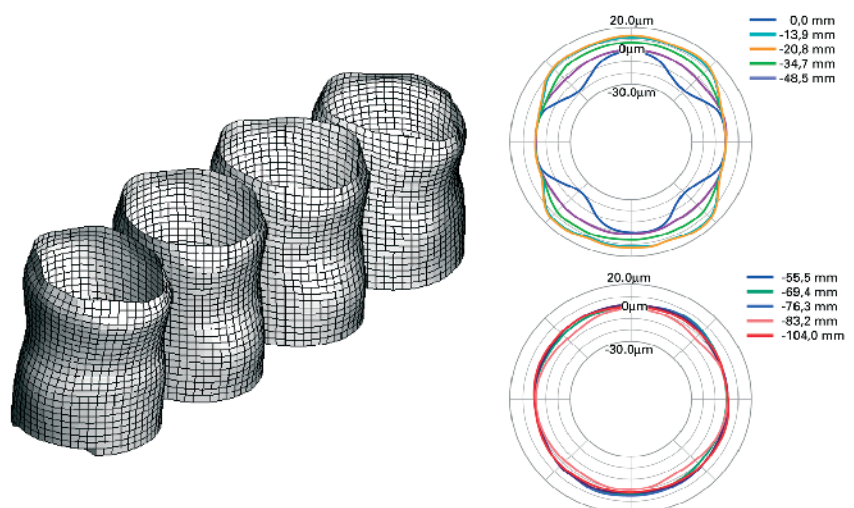
Ziel dieser Analysen war es, neben dem Zylinderkopf auch das Kurbelgehäuse hinsichtlich des thermomechanischen Verhaltens zu untersuchen. Hier ging es im Speziellen um die Berechnung der Temperaturverteilung im ZKG, **Bild 3** (rechts) sowie um die Bewertung und Optimierung der Bauteilverzüge insbesondere im Bereich der Zylinderbohrungen und der Kurbelwellen-Lagergasse.

Die durch die Verschraubung des Zylinderkopfes induzierten Spannungen und die aufgrund der Verschraubung und der Wärmedehnung hervorgerufenen Verformungen der Zylinderrohre, **Bild 4**, wurden optimiert. Ebenso wurde im Zusammenspiel mit der Gestaltung des Zylinderkopfes die Pressung der Zylinderkopfdichtung auf dem Zylinderrohr optimiert, um eine möglichst gleichmäßige Pressungsverteilung im Motorbetrieb zu erreichen.

In Summe ist es durch diesen geschlossenen Berechnungsablauf gelungen, ein Optimum im Zielkonflikt zwischen Akustik, Bauteilfestigkeit/-steifigkeit, Gewicht und Kosten zu erreichen.

## 5 Werkstoffauswahl

Ziel der Entwicklungsarbeit von Eisenwerk Brühl war es, vor dem Hintergrund ständig steigender spezifischer Leistungen einen innovativen Weg zur Herstellung von



**Bild 4:** Verzug der Zylinderbohrungen im Nennleistungspunkt / Darstellung im Polardiagramm (kalt)

**Figure 4:** Cylinder bore distortion at the rated power point / represented in a polar diagram (cold)

„Leichtbau“-Konzepten am Beispiel von ZKGs aus Gusseisen zu finden [4, 5, 6].

### 5.1 Tribologische Eigenschaften der Zylinderbohrung

Ein wesentlicher Pluspunkt für die Werkstoffwahl von GJL ist die Funktionssicherheit des Tribosystems Zylinderlaufbahn und Kolben/Kolbenringe mit hoher Formstabilität der Zylinderbohrungen und gutem Einlaufverhalten. Die sehr guten Gleiteigenschaften dieses Werkstoffs durch das gute Ölhaltevermögen und die guten Notlaufeigenschaften sichern minimale Reibungsverluste, gute Verbrauchswerte und bieten zusätzlich Voraussetzungen für ständig steigende Laufleistungen mit verlängerten Wartungsintervallen.

### 5.2 Mechanische Werkstoffeigenschaften

Die lokalen Festigkeiten sind in Abhängigkeit vom Graphittyp und von der Legierungszusammensetzung zu sehen. Ein Vorteil ist, dass aufgrund der Gefügestabilität im Bereich von Raumtemperatur (RT) bis zirka 400 °C die dynamischen und statischen Festigkeiten keinen signifikanten Abfall zeigen.

### 5.3 NVH-Einfluss

Eine betriebssichere und akustisch unauffällige Kurbelwellenlagerung setzt eine steife und verzugsarme Lagergasse voraus (Temperatureinfluss), was eine formstabile Gestaltung der Lagerstühle bedingt. Hohe Kriechfestigkeiten garantieren außerdem einen hohen Widerstand gegen Setzen des Hauptlager-Schraubverbands, so dass eine schleichende Verformung der Hauptlagerbohrungen vermieden wird. Ein im Vergleich zu Aluminium-ZKGs hoher E-Modul ist Basis für die von RT bis zu Motoreinsatztemperaturen konstant guten Akustik- und

Schwingungseigenschaften. Der E-Modul bei GJL ist im Wesentlichen von der Graphitmenge abhängig, die Graphitanordnung hat kaum Einfluss. Zusätzlich verbessern eine optimale konstruktive Auslegung des ZKGs und ein hervorragendes Dämpfungsvermögen, das für diesen Werkstoff bei einem Lossfaktor von  $LF > 800 \cdot 10^{-6}$  liegt, das NVH-Verhalten. Dies wird zusätzlich unterstützt durch nahezu gleiche Wärmeausdehnungskoeffizienten von ZKG- und Kurbelwellenwerkstoff ( $\alpha_{RT-200^\circ C} \sim 13,17$  bis  $13,26 \mu m/mK$ ). Das dadurch gleichbleibend niedrige Hauptlagerspiel trägt ebenfalls zu einer Verbesserung des NVH-Verhaltens bei.

### 5.4 Thermische Werkstoffeigenschaften

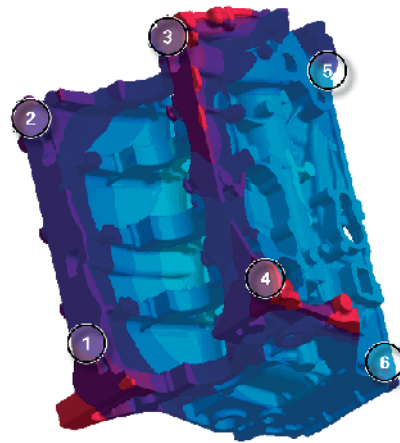
Die im Vergleich zu Aluminium-Werkstoffen relativ geringe Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{RT-100^\circ C} \sim 48,7 W/(mK)$  führt dazu, dass die Zylinderlaufbahn im Motorbetrieb deutlich heißer ist als bei einem Leichtmetall-ZKG. Dies kommt der reibleistungsorientierten Forderung nach einer heißen Zylinderwand (geringe Reibung der Kolbenringe) sehr entgegen. Wird ein gusseisengerechtes ZKG-Design konsequent umge-

setzt, können die durch die geringe Wärmeleitung hervorgerufenen möglichen Überhitzungsprobleme (zum Beispiel klopfende Verbrennung) über Wandstärkenanpassungen und/oder angepasste Motor-Kühlkonzepte vermieden werden.

Durch den Einsatz von Gusseisen mit dessen Unempfindlichkeit gegen hohe Temperaturen konnte das EA888-ZKG kompakt ausgeführt werden. Eine Stegbreite von 5,5 mm kann durch den Entfall von zusätzlichen Laufbüchsen, wie sie bei einer kostengünstigen Aluminium-Lösung notwendig gewesen wären, auch für höchste Motorleistungen betriebssicher dargestellt werden.

## 6 Entwicklungsprozess

Der Entwicklungsprozess war durch eine enge Zusammenarbeit zwischen der Eisenwerk Brühl GmbH (EB) sowie dem Endkunden, der Audi AG, gekennzeichnet. In regelmäßig stattfindenden Simultaneous-Engineering-Sitzungen waren alle am Entwicklungs- und Serienprozess beteiligten Abteilungen involviert.



Härte HB5/750		
Position	berechnet	gemessen
1	223	229
2	234	226
3	234	224
4	228	228
5	223	230
6	223	227

**Bild 5:** Ergebnis der Gießsimulation

**Figure 5:** Result of the casting simulation

Bei EB wurde während des gesamten Entwicklungsprozesses ein Teilelebenslauf und eine entwicklungsbegleitende „What-to-do-Liste“ geführt, die sich im Laufe der Zeit als wichtiges Informations- und Planungsdokument etablieren konnte. In ihr wurden und werden alle laufenden Änderungen und jeder erreichte Status bis heute dokumentiert, so dass durch deren Verteilung an alle Partner stets jeder den gleichen Entwicklungsstand miterlebte. Ein Werkzeug, welches besonders die Durchgängigkeit und Verzahnung der Abläufe innerhalb des EB-Prozesses in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Abteilungen und Modellbauern unterstützt.

Zu diesem Zeitpunkt bestand auch ein kompletter CAD-Master-Datensatz zur Fertigung aller relevanten Kern- und Modellwerkzeuge. Diese Daten spiegeln nicht nur eindeutig die Geometrie der Werkzeuge wieder, sie bilden gleichzeitig die Basis der Offline-Programmierung zur hundertprozentigen Produktbemusterung durch die CMM-Messtechnik.

### 6.1 Gießsimulation

Integrierter Bestandteil der Entwicklungsleistung von EB war die konstruktive Auslegung des Anschnitt-, Speiser- und Gießsystems durch die rechnerische Vorab-Simulation, **Bild 5**. Das Eingussystem ist formanlagenbedingt und die Anschnitte und der Gießlauf werden größtenteils von den Kernmarken bestimmt. Im Endergebnis wurde eine optimale Verteilung lokaler mechanischer Eigenschaften erreicht.

## 7 Gießtechnik

### 7.1 Präzision und reproduzierbare Fertigung

Technologie- und Kostenführerschaft sind bei steigenden Kosten für Einsatzstoffe, Energie und Personal nur durch eine hohe Automatisierung der Fertigungsverfahren und Innovationen zu realisieren. Mit kontinuierlichen Verbesserungen werden Kundenanforderungen zum Beispiel nach geringeren Wandstärken mit eingegrenzten Toleranzen, höher belastbaren Werkstoffen, konstant hohem Qualitätsniveau und niedrigen Teilepreisen gewährleistet.

Auf den Markt kommen verstärkt höherfestere Stähle, die als metallische Gattierungskomponente eingesetzt werden, so dass in Folge sehr kritisch die Anreicherung von Stör- und Begleitelementen im Stahl und deren Grenzgehalte im Gusseisen beachtet werden müssen. Streuungen der chemischen Zusammensetzung einer Schmel-

ze, welche sich aus der Schmelzeführung und Schmelzbehandlung ergeben, dürfen nicht zu größeren Streuungen der Gussteileigenschaften führen. Beispiele für die Entwicklung der absoluten Streubereiche, **Bild 6**, verdeutlichen den technologischen Innovationssprung. Durch geänderte Verfahrenstechniken konnten zum Beispiel die Streubereiche der Kohlenstoff- und Siliziumgehalte fast halbiert werden, gleiches gilt durch die Änderung der Gießtechnologie für die Gießtemperatur und -zeit.

Mess- und Kontrollsysteme entlang einer Prozesskette haben eine bedeutende Stellung für die Bewertung des schmelzflüssigen Zustandes. Die Beurteilung des Keimzustandes sowie die Bestimmung der Unterkühlung einer Schmelze und eine auf den Schmelzzustand und das Gussteil abgestimmte Impfbehandlung bestimmen heute vorab Gefügebestandteile, den Gra-

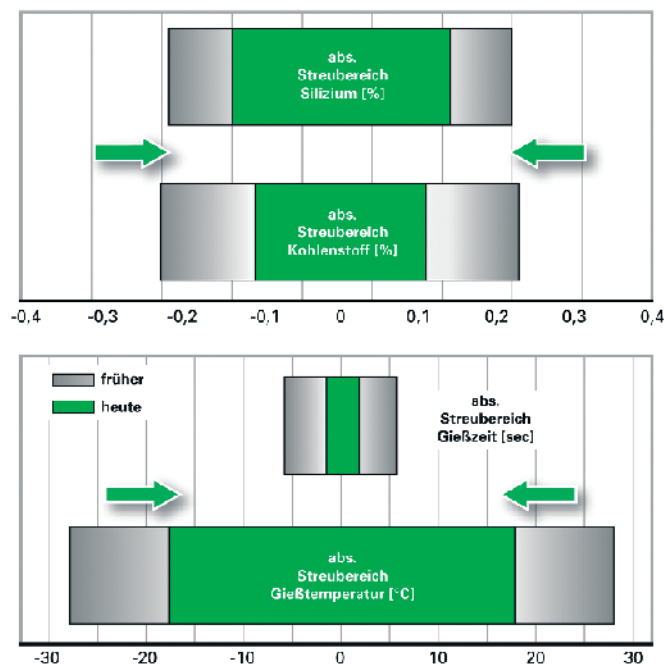
phittyp, mechanische Eigenschaften und die Fehlerneigung.

Die bessere und reproduzierbare Regelbarkeit der Giesstemperatur und -zeit während der Formfüllung, **Bild 7**, führt zu niedrigsten Ausschussraten. Online-Übertragungen von Messwerten, deren Visualisierung und statistische Regelalgorithmen sind für die Mitarbeiter vor Ort Eingriffswerkzeuge für autarke Prozessregelkreise.

### 7.2 Formen und Kerne

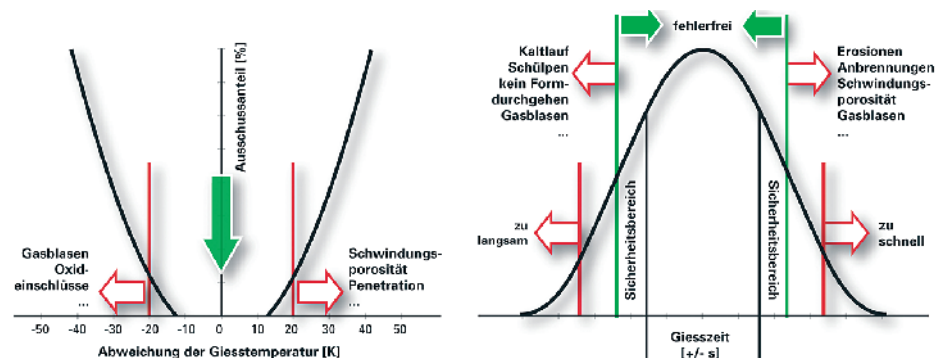
Die Einhaltung enger Toleranzen und deren prozesssichere Einengung ist die Summe vieler kleiner Teilschritte entlang der Prozesskette während der Entstehung des Gussteils:

- Verbesserung der Maßgenauigkeit der Kernwerkzeuge und Modelleinrichtungen durch eine geschlossene CAD-Prozesskette



**Bild 6:** Präzisionsgießen durch reproduzierbare, engere Prozessfenster

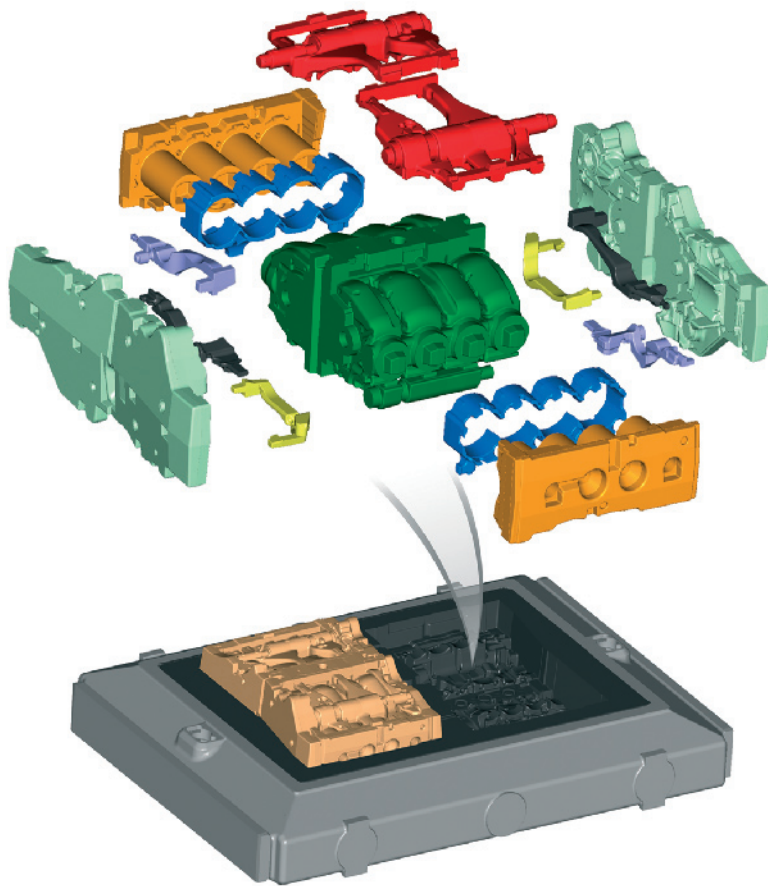
**Figure 6:** Precision casting with reproducible, narrow process windows



**Bild 7:** Reduzierung von Ausschussraten durch Präzisionsgießen

**Figure 7:** Relationship between reject rates and precision pouring





**Bild 8:** Präzision beim Kernhandling, -zusammenbau und -einlegen

**Figure 8:** Precision in core handling, assembly and insertion

- Höhere Gleichmäßigkeit der Abformung durch eine Hochdruckverdichtung als Funktion der Sandeigenschaften
- Automatisierte Montage-, Einlege- und Klebevorgänge von Einzelkernen zu vor-

- montierten Kernpaketen und „Just-in-time“-Anlieferung an die Formlinie
- Berücksichtigung des Ausdehnungsverhaltens bei Temperaturbelastung von Kernen und Form durch verbesserte

Formstoffqualität, Kernwerkstoffe und Kernbinder

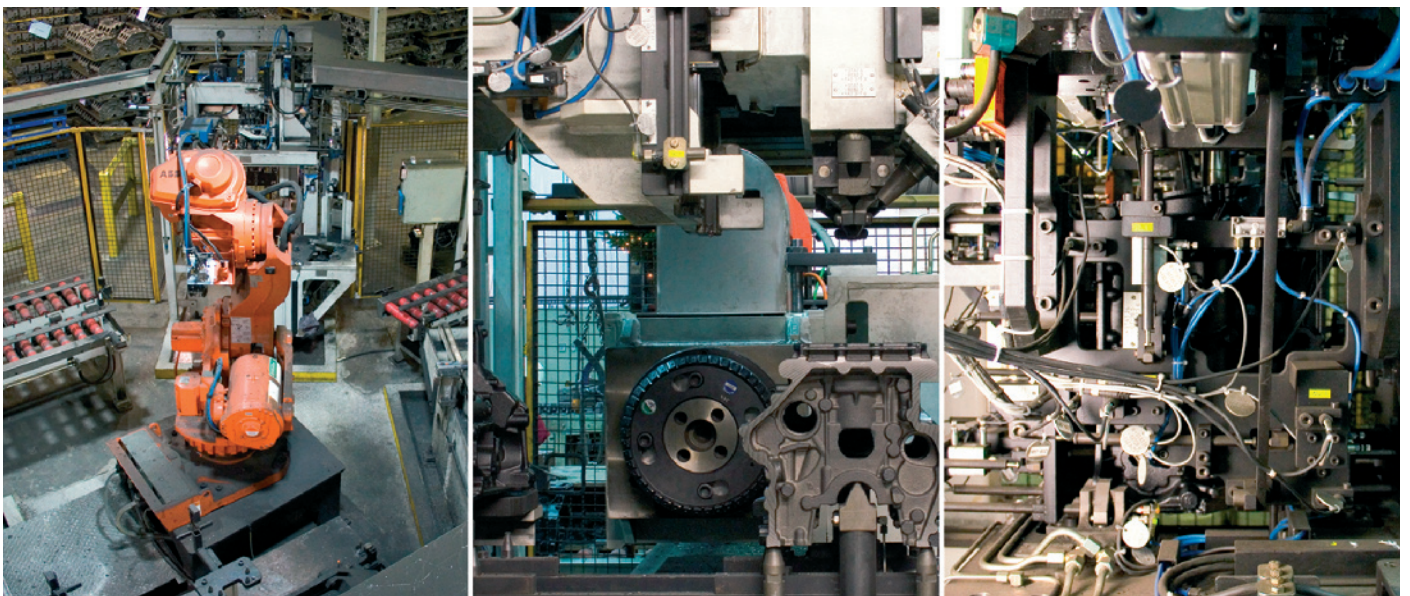
- Berücksichtigung des Schrumpfens/ Treibens des Gusswerkstoffes in den Formwerkzeugen in Abhängigkeit von Legierungszusammensetzung und Impfung.

Mit dem Kernaufbau als Zwilling wurde trotz komplexer Geometrievorgaben eine wirtschaftliche Lösung gefunden, **Bild 8**, da in einem Gießvorgang vier Rohteile erzeugt werden.

Die Konturgenauigkeit der Kerne und die Einbautoleranzen sind wichtige Faktoren für die Maßlichkeit des Endprodukts. Die toleranzbestimmenden Faktoren sind die NC-Fertigung der Werkzeuge, die Berücksichtigung eines gleichmäßigen Schichtenauftrags, eine definierte Kernlagerungszeit und eine stabile Kernlagerung über die gesamte Logistik bis an die Formanlage.

### 7.3 Bearbeitung

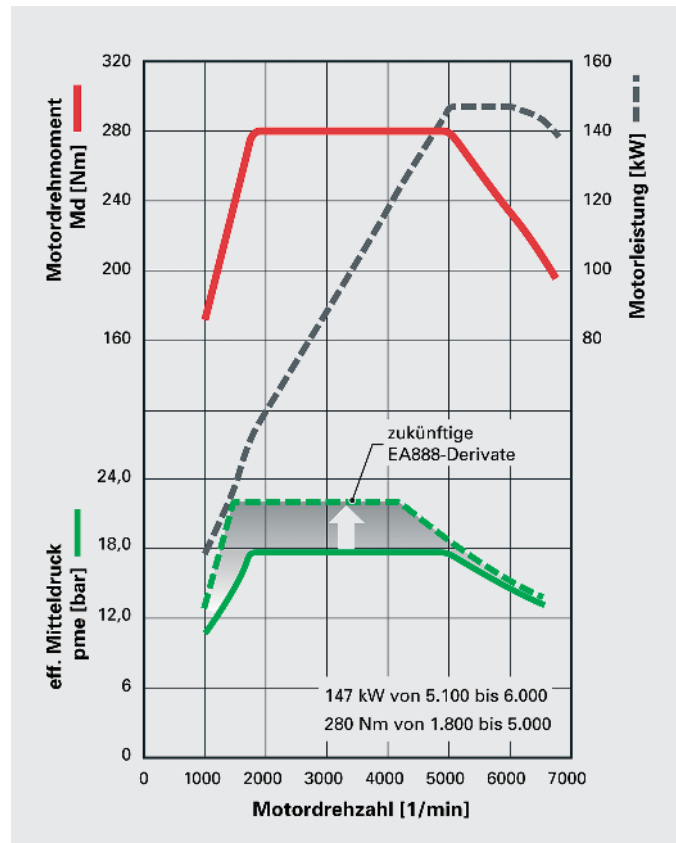
Im Rahmen des Entwicklungsprojekts wurde eine geeignete Verfahrensweise konzeptioniert, mit der das Feinputzen und eine Vorbearbeitung in eng vernetzten Prozessschritten durchgängig dargestellt werden kann. Neben der Anpassung von Reinigungsmethoden wie Rütteln, Vibrieren und Strahlen an die komplexe Rohteilgeometrie wurde deren Effektivität unter anderem durch den Einsatz einer Injektionsstrahlanlage für alle vorgegossenen Ölkanäle verbessert. Gewährleistet werden Sand- und Schlacke-rückstände von  $\leq 500$  mgr/ZKG.



**Bild 9:** Robothandling, Justieren, Messen und Lecktesten

**Figure 9:** Robot handling, adjustment, measuring and leak testing





**Bild 10:** Drehmoment und Leistung des 2-l-EA888-Motors, Ausblick auf zukünftige Mitteldrücke bei EA888-Derivaten

**Figure 10:** Torque and power output of the 2.0 l EA888 engine, outlook for future mean pressures in EA888 derivatives

Alle weiter folgenden Schritte werden in einer integrierten Feinputz- und Vorbearbeitungskette vorgenommen. Mit einer Erhöhung der Fertigungstiefe durch Vorbearbeitung von Seitenflächen des ZKGs sind für beide Seiten wirtschaftliche Vorteile verbunden.

Die anschließenden Operationen Lackieren, Justieren, Lecktesten und Messen werden ausschließlich automatisiert durch Robohtandling der Rohteile in einer definierten Aufspannung und Positionierung durchgeführt, **Bild 9**.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Zylinderkurbelgehäuse der neuen EA888-Motorengeneration erfüllt alle in der frühen Konzeptphase gesteckten Anforderungen. Durch die dargestellten positiven Eigenschaften, die Funktionsintegration sowie die Auslegung auf Mitteldrücke bis 25 bar bietet es eine sehr gute Grundlage für weitere EA888-Aggregate-Derivate, **Bild 10**. Die Motoren werden im Quer- und Längseinbau weite Verbreitung im gesamten VW-Konzern finden.

Eisenwerk Brühl hat durch Entwicklungskompetenz sowie das Fertigungs- und Werkstoffkonzept bewiesen, dass der Einsatz von Gusseisen beim Zylinderkurbelge-

häuse Symbol für einen modernen, leistungsfähigen und kostengünstigen Otto-Turbomotor ist.

## Literaturhinweise

- [1] Böhme, J.; Jung, M.; Fröhlich, G.; Pfannerer, D.; Märkle, T.; Felsmann, C.: Der neue 1,8-l-Vierzylinder-TFSI-Motor von Audi (Teil 1: Konstruktion und Mechanik). In: MTZ 10/2006, Jahrgang 67, S. 734 - 748
- [2] Helbig, J.; Höfner, D.; Grigo, M.; Kuhn, M.; Senft, P.: Der neue 1,8-l-Vierzylinder-TFSI-Motor von Audi (Teil 2: Konstruktion Anbauteile und Thermodynamik). In: MTZ 11/2006, Jahrgang 67, S. 884 - 892
- [3] Krebs, R.; Böhme, J.; Dornhöfer, R.; Wurms, R.; Friedmann, K.; Helbig, J.; Hatz, W.: Der neue Audi 2-l-TFSI-Motor – Der erste direktinspritzende Turbo-Ottomotor bei Audi. 25. Internationales Wiener Motorsymposium, April 2004
- [4] Böhme, J.; Fröhlich, A.; Doerr, J.: Motorblöcke aus Gusseisen oder Aluminium? In: Gießtechnik im Motorenbau – Anforderungen der Automobilindustrie, VDI-Bericht Nr. 1718, Audi Sonderbeilage, 2003
- [5] Martin, T.; Weber, R.: Grauguss: Ein moderner Werkstoff für Kurbelgehäuse. In: Hochleistungsbauteile für Verbrennungsmotoren 30/2004, S. 43-57
- [6] Martin, T.; Weber, R.: Leichtbau-Zylinderkurbelgehäuse für die Großserie. In: Gießerei-Praxis 2/2004, S. 19-26

Download des Beitrags online unter | Download this article online at  
www.all4engineers.de

all4engineers

**MTZ**  
WORLDWIDE

For an English version of this article,  
see MTZ Worldwide.