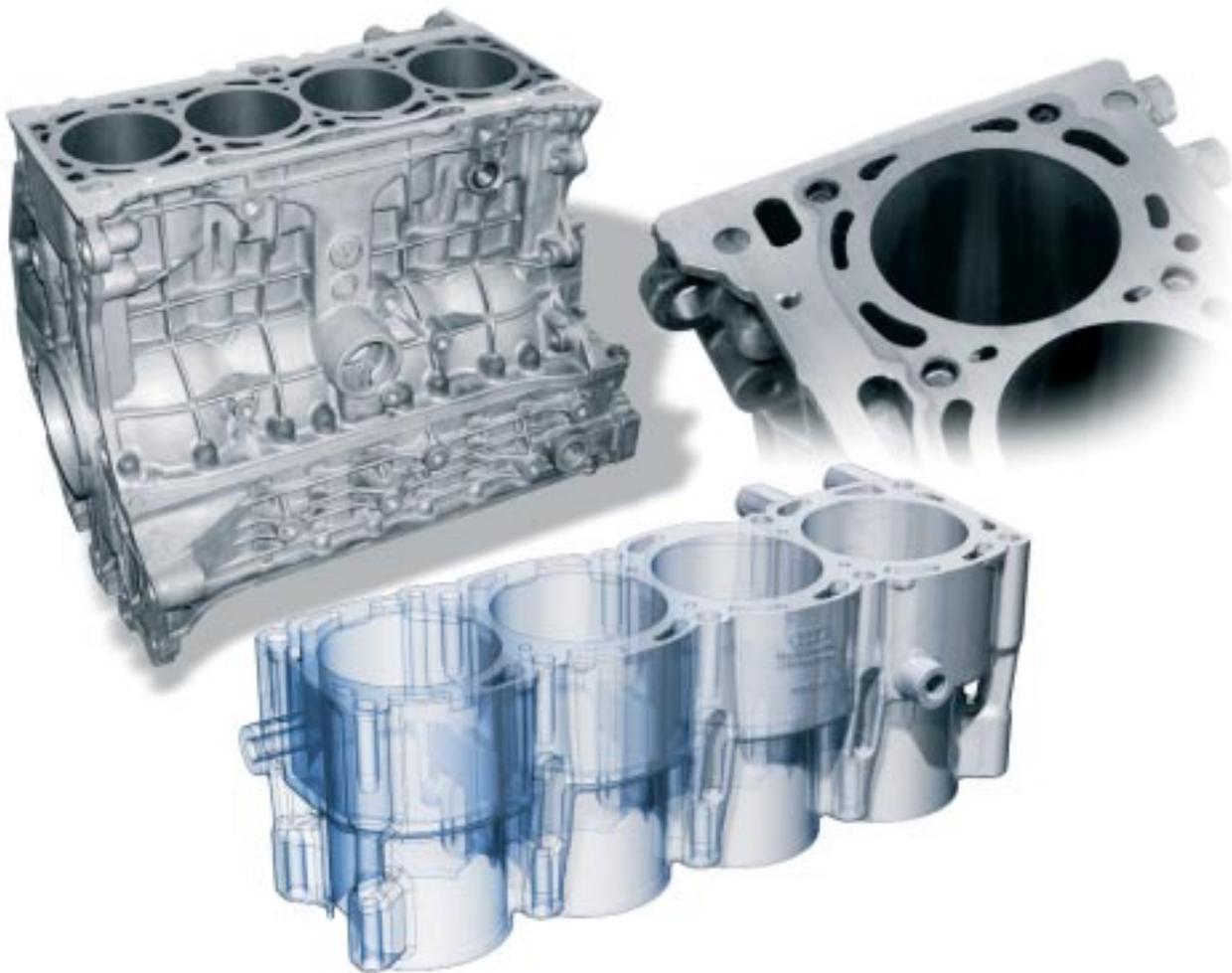


Magnesium-Hybrid-Turbomotor von Audi



Mit diesem Beitrag zeigt Audi einen Weg, wie der Leichtbauwerkstoff Magnesium durch spezielle konstruktive Detaillösungen und den Einsatz neuer warmfester Legierungen zukünftig auch in hochbelasteten Motoren eingesetzt werden kann. Durch gezieltes lokales Werkstoff-Engineering gelang es erstmals, einen Otto-Turbomotor mit einer spezifischen Leistung von 67 kW/l in Magnesium-Hybrid-Leichtbauweise darzustellen. Eine Besonderheit des im Druckgussverfahren hergestellten Kurbelgehäuses stellt die Closed-deck-Bauweise dar, für die ein großserientaugliches Herstellungs-konzept entwickelt wurde.

1 Einleitung

Bei den bekannten Audi Turbomotoren, in der neuesten Generation als Turbo FSI, profitiert der Kunde von einem überragenden Drehmomentverhalten, welches viel Fahrspaß bei moderatem Kraftstoffverbrauch garantiert [1]. Wegen der hohen spezifischen Leistungen und Drehmomente werden die Zylinderkurbelgehäuse der Turbomotoren bei Audi aus Grauguss hergestellt [2]. Eine deutliche Reduzierung des Motorgewichts würde jedoch die Fahrzeugdynamik nochmals verbessern. Die Gewichtsersparnis von etwa 23 kg gegenüber einem Grauguss-Zylinderkurbelgehäuse stellte die Motivation dar, ein Leichtbau-Kurbelgehäuse in Magnesium-Hybrid Bauweise für aufgeladene Motoren zu entwickeln.

2 Entwicklungsziel

Für das Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse wurden folgende Entwicklungsziele gesetzt: Eine Gewichtsersparnis von mindestens 25% im Vergleich zu einem Aluminium-Kurbelgehäuse, uneingeschränkte Alltagstauglichkeit, hohe Belastbarkeit und gute akustische Eigenschaften. Diese Merkmale sollten bei verträglichen Kosten im Hinblick auf einen großserientauglichen Gießprozess und eine wirtschaftliche Fertigung erreicht werden [3, 4].

Die spezifische Leistung des Magnesium-Motors liegt am oberen Rand des Streubands moderner Leichtmetallmotoren. Sie wurde zunächst auf 67 kW/l festgelegt. Als Basis-Aggregat dient der 1,8-l-5V-Turbo-Motor, der in sieben Leistungsklassen zwischen 110 kW und 163 kW produziert wird (61 kW/l bis 90 kW/l). Die **Tabelle** zeigt eine Übersicht aktueller Vierzylindermotoren der Audi AG. Die Aggregate sind nach sinkendem Leistungsgewicht ange-

ordnet (der Magnesium-Hybrid-Turbomotor steht in der untersten Zeile).

3 Kurbelgehäuse-Konzept

3.1 Aluminium-Zylindereinsatz

Das zentrale Element des Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuses ist der Aluminium-Zylindereinsatz, **Bild 1**. Er wird im Kokillenguss aus der übereutektischen Aluminiumlegierung AlSi17Cu4 hergestellt und später im Druckgussverfahren mit Magnesium umgossen. Zur Vermeidung von Kühlwasserkorrosion ist der Kühlmantel des Zylinderkurbelgehäuses komplett im Aluminium-Zylindereinsatz integriert. Durch die einteilige Konstruktion des Einsatzes wird das Magnesium von den heißesten Stellen im Motorblock, den Zylinderstegen abgeschottet. Die Zylinderlaufbahnen werden bei der Fertigung direkt durch eine zusätzliche Honstufe hergestellt, bei der die verschleißfesten Primärsiliziumpartikel der Aluminiumlegierung im Mikrometerbereich mechanisch freigelegt werden.

Zahlreiche Durchbrüche ermöglichen eine gute formschlüssige Verankerung des Zylindereinsatzes im Magnesium-Umguss. Zusätzlich zu diesen Verklammerungselementen wird eine Oberflächenbehandlung (AlSi12-Beschichtung) an den Außenflächen des Bauteils durchgeführt, die die Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen Magnesium und Aluminium unterstützt.

Je nach Anforderung und spezifischer Belastung des Motors kann der Zylindereinsatz entweder in open-deck- oder closed-deck-Ausführung hergestellt werden. Die äußere Geometrie der beiden Einsatzvarianten ist dabei exakt identisch, so dass beide Bauteile in das selbe Druckgusswerkzeug eingesetzt und umgossen werden können.

Die Autoren



Dr.-Ing. Rudolph Krebs ist Leiter der Entwicklung Reihenottomotoren und Vorentwicklung Ottomotoren bei der Audi AG in Ingolstadt.



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



Dipl.-Ing. Joachim Doerr ist Fachreferent in der Motorberechnung Reihenottomotoren bei der Audi AG in Ingolstadt.



Dipl.-Ing. Albrecht Rothe ist Mitarbeiter in der Entwicklung Grundmotor Reihenottomotoren bei der Audi AG in Ingolstadt.



Dr.-Ing. Willi Schneider ist Fachreferent in der Technologieentwicklung bei der Audi AG in Ingolstadt.



Dr.-Ing. Christoph Haberling ist Fachreferent für Werkstofftechnologie bei der Audi AG in Ingolstadt.

2 Entwicklungsziel

Tabelle: Leistungsdaten verschiedener Vierzylindermotoren der Audi AG (Magnesium-Hybrid-Turbomotor untere Zeile)

Table: Performance data for various Audi four-cylinder engines (magnesium-hybrid turbo engine is shown in the lowest row)

Motor	ZKG	Leistung / Drehmoment	max. Mitteldruck	spezifische Leistung	spezifisches Drehmoment	Gewicht DIN 70200	Leistungsgewicht
1,6l MPI	Alu-DG	75 kW / 148 Nm	11,7 bar	47 kW/l	93 Nm/l	104 kg	1,39 kg/kW
1,8l 5VT	GG-SG	120 kW / 225 Nm	15,7 bar	67 kW/l	125 Nm/l	145 kg	1,21 kg/kW
2,0l FSI*	Alu-SG	110 kW / 200 Nm	12,6 bar	55 kW/l	100 Nm/l	131 kg	1,19 kg/kW
2,0l TFSI*	GG-SG	147 kW / 280 Nm	17,6 bar	75 kW/l	140 Nm/l	152 kg	1,03 kg/kW
1,8l 5VT	Mg-DG	120 kW / 225 Nm	15,7 bar	67 kW/l	125 Nm/l	122 kg	1,02 kg/kW

* mit Ausgleichswellengetriebe

3.1 Aluminium-Zylindereinsatz



Bild 1: Closed-deck Aluminium-Zylindereinsatz (AlSi17Cu4)
 Figure 1: Closed-deck aluminium cylinder insert (AlSi17Cu4)

3.2 Zylinderkurbelgehäuse

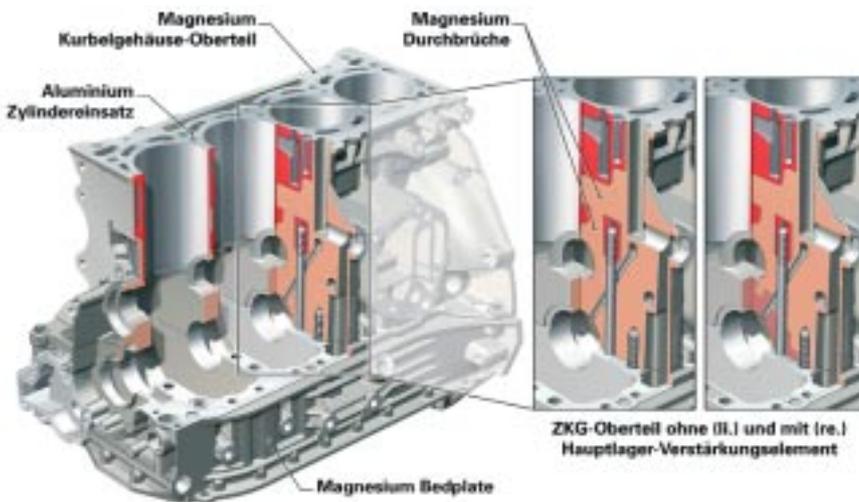


Bild 2: Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse in der Schnittdarstellung
 Figure 2: Sectional view of the magnesium-hybrid engine block

Am Zylindereinsatz sind am Topdeck und im unteren Bereich der Zylinderrohre Verschraubungsbutzen für die Zylinderkopf- und Hauptlagerverschraubung angegossen. Zum Zweck einer möglichst geradlinigen Kraftführung sind diese Verschraubungsstellen jeweils über steife Rippen und Streben miteinander verbunden. Aus Package- und Festigkeitsgründen wurden noch einige weitere Verschraubungspunkte in das Bauteil integriert.

Die Gestalt des Zylindereinsatzes wurde

im Hinblick auf ein niedriges Gesamtgewicht und eine ausreichende Festigkeit für die Turboaufladung optimiert. Die closed-deck-Ausführung ermöglicht trotz der kompakten Abmessungen der Audi-Motoren sehr hohen Spitzendrücke und stellt bei druckgegossenen Kurbelgehäusen eine Neuheit dar [5]. Nach der Endbearbeitung des Kurbelgehäuses wiegt das im Magnesium-Umguss verbleibende Fertigteil des Aluminium-Zylindereinsatzes nur noch etwa 3,8kg.

3.2 Zylinderkurbelgehäuse

Das Magnesium-Kurbelgehäuse-Oberteil ist aus akustischen Gesichtspunkten in short-skirt-Bauweise ausgeführt, Bild 2. In Kombination mit einem stabilen Kurbelgehäuse-Unterteil (Bedplate) ergibt sich ein sehr verwindungssteifer Motorblock. Der Steifigkeitsnachteil durch den geringen E-Modul des Magnesiums wird durch diese Bauweise mehr als kompensiert.

Das Kurbelgehäuse-Oberteil wird, wie das Bedplate auch, im Druckgussverfahren hergestellt und bildet die tragende Struktur für den Aluminium-Zylindereinsatz. Die Umguss-Wandstärke um das Eingussteil beträgt etwa 4mm, wodurch – zusammen mit den zuvor erwähnten Durchbrüchen – eine gute Abstützung und Verankerung des Einsatzes im Magnesium gewährleistet wird. Durch seine intensive Verrippung übernimmt die Umgussstruktur im Wesentlichen versteifende aber auch ölführende Funktionen.

Zur Reduzierung der Aufweitung der Kurbelwellenlagerbohrung können in die Hauptlagerstühle des Kurbelgehäuse-Oberteils Verstärkungselemente aus festem Material mit geringerer Wärmedehnung eingegossen werden. Da der Magnesium-Lagerstuhl durch die langen Hauptlagerschrauben druckvorgespannt ist, Bild 2, ist dies aus Festigkeitssicht jedoch nicht zwingend notwendig. Durch die Hybrid-Bauweise in Verbindung mit dem kompakten und leichten closed-deck Zylindereinsatz wird für das Kurbelgehäuse insgesamt eine hohe Gewichtsersparnis und eine ausgezeichnete Festigkeit für die Belastung aus der Turboaufladung erreicht.

4 Werkstoffauswahl

Das hier vorgestellte Motorblockkonzept stellt hohe Anforderungen an die Werkstoffauswahl. Vorteil der Hybrid-Bauweise ist es, für jeden Bereich im Kurbelgehäuse den optimalen Werkstoff entsprechend der lokalen Anforderungen im Bauteil einsetzen zu können. Beim Übergang von der Monobauweise auf die Hybridtechnik lassen sich zum Beispiel große Festigkeits- und Kriechfestigkeitssteigerungen erreichen. Im Gegensatz dazu müssen allerdings komplexe Eigenspannungszustände und Mischbearbeitungen in der Fertigung sicher beherrscht werden, Bild 3. Besondere Aufmerksamkeit muss auch auf die Verträglichkeit mit den in der Motorperipherie vorliegenden Werkstoffen gelegt werden (Kontaktkorrosion).

Der Bereich um die Kurbelwellenlager kann je nach Beanspruchung direkt in Magnesium ausgeführt werden oder mit Eingussteilen aus pulvermetallurgisch her-

gestellten Aluminiumwerkstoffen oder Eisenwerkstoffen verstärkt werden. Somit kann wahlweise entweder dem Aspekt „maximaler Leichtbau und geringe Kosten“ oder der Forderung „höchste Festigkeit und geringe Aufweitung der Lagergasse“ in jeweils kleinerem oder größerem Umfang Rechnung getragen werden, **Bild 4**.

Konventionelle Mg-Legierungen wie AZ91 oder AM50 sind für Anwendungen im Aggregatebereich mit Betriebstemperaturen oberhalb von 130°C aufgrund ihrer geringen Kriechbeständigkeit und Warmfestigkeit nur in Ausnahmefällen geeignet. Um das mögliche Leichtbaupotenzial auch für solche Anwendungsfelder nutzbar zu machen, wurden deshalb im Volkswagenkonzern Forschungs- und Entwicklungsprojekte gestartet, mit dem Ziel, die Temperaturbelastbarkeit der Magnesium-Druckgusslegierungen weiter zu erhöhen [6].

Der Erfolg einer neuen Magnesiumlegierung hängt jedoch nicht alleine nur von einer hohen Kriechbeständigkeit ab, sondern auch von einer Reihe weiterer Faktoren wie Gießbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und den Kosten. So mangelte es bei manchen kriechbeständigen Legierungen, wie bei der Legierung AS21, an der heute geforderten Korrosionsbeständigkeit, wohingegen die Legierung AE42 aus Kostengründen und aufgrund eingeschränkter Gießbarkeit kaum angewendet wird.

Bezüglich des genannten Anforderungsprofils stellen die Legierungen MRI 153M und MRI 230D (entwickelt von der VW-Konzernforschung und dem israelischen Magnesium Research Institut, MRI) für den Temperaturbereich bis etwa 200°C einen guten Kompromiss dar [7, 8]. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die hohen Warmfestigkeiten und der im Vergleich zu anderen kriechfesten Legierungen sehr früh erreichte Übergang vom primären zum sekundären Kriechen. Das frühe Abknicken der Kriechkurven wird bereits bei sehr kleinen plastischen Gesamtverformungen erreicht und mündet in einer sehr geringen minimalen Kriechgeschwindigkeit, **Bild 5**.

Der frühe Übergang vom primären zum sekundären Kriechen hat insbesondere auf die in Magnesium ausgeführten Verschraubungen einen positiven Einfluss, da das Relaxationsverhalten von Schraubverbindungen im Wesentlichen von den primären Kriechvorgängen geprägt wird. In **Bild 5** wird für die Temperatur 135°C das Kriechverhalten der Legierung MRI153M beziehungsweise MRI230D der herkömmlichen kriechfesten Legierung AS21 exemplarisch gegenübergestellt. Sowohl bei einer Spannung von 90MPa (linkes Teilbild),

4 Werkstoffauswahl

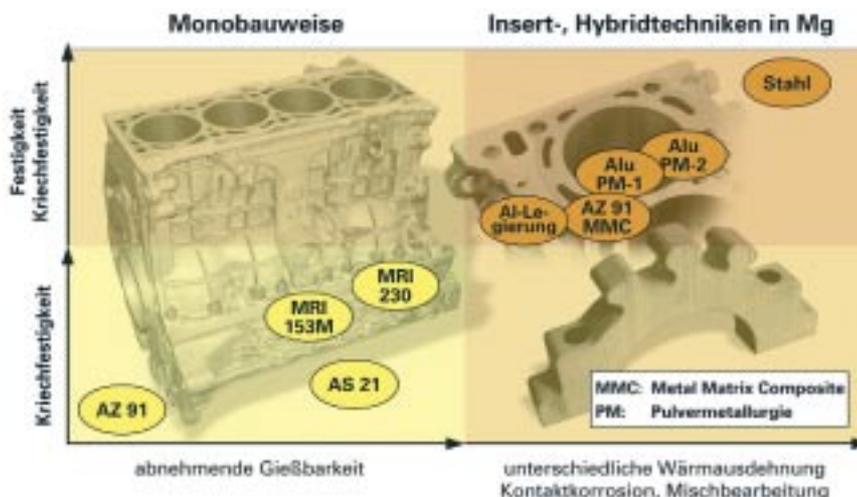


Bild 3: Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von Magnesium durch Hybrid-Technik
Figure 3: Hybrid technology extends the range of applications for magnesium

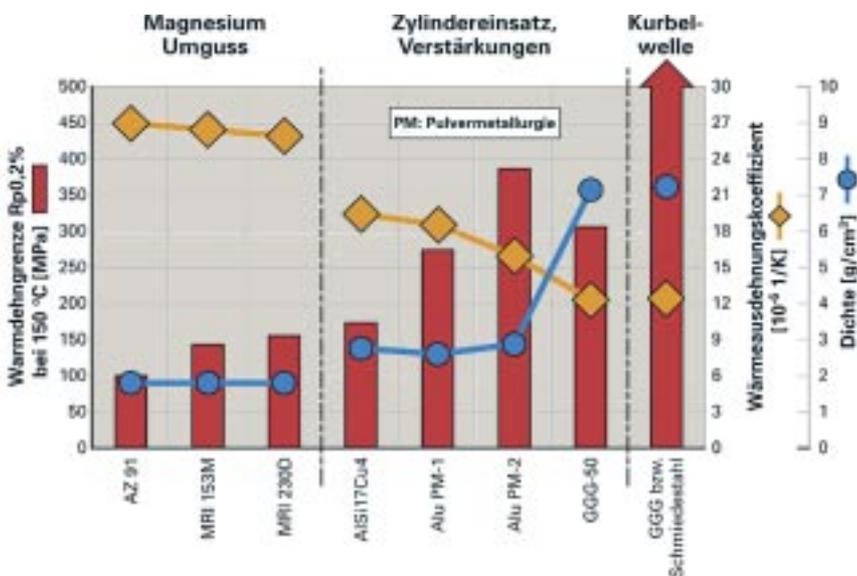


Bild 4: Die Hybrid-Technik ermöglicht eine anforderungsgerechte Werkstoffwahl
Figure 4: With hybrid technology, a material can be chosen to meet the demands of an application

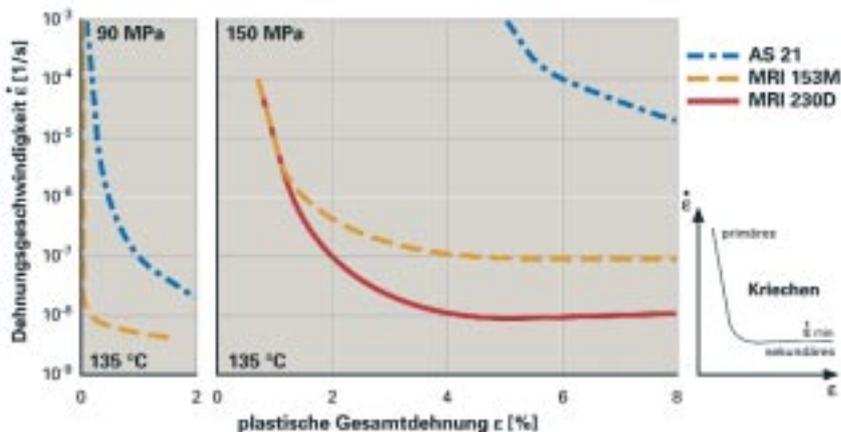


Bild 5: Optimiertes Kriechverhalten der MRI-Legierungen
Figure 5: Optimised creep characteristics of MRI alloys

4 Werkstoffauswahl

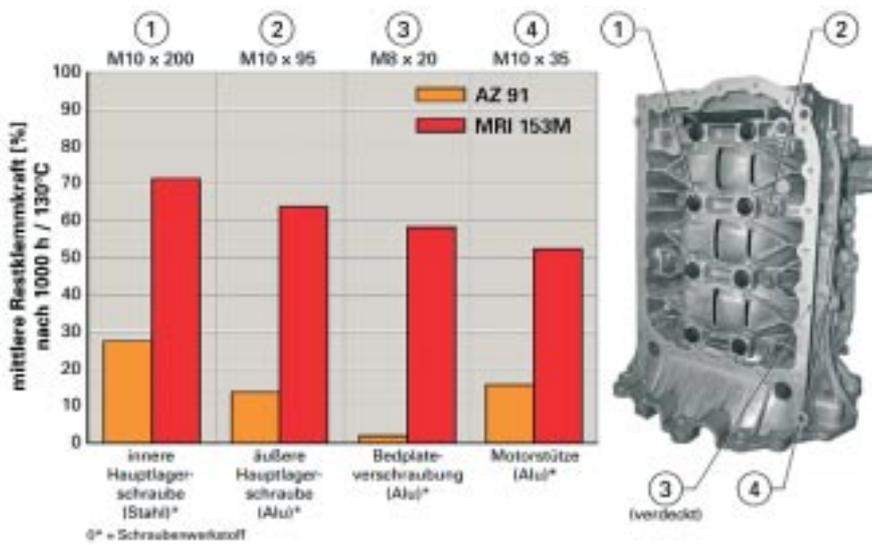


Bild 6: Vorspannkraftverlust an ausgewählten Verschraubungsstellen
Figure 6: Loss of preload at selected bolted joints

5 FEM-Berechnungen

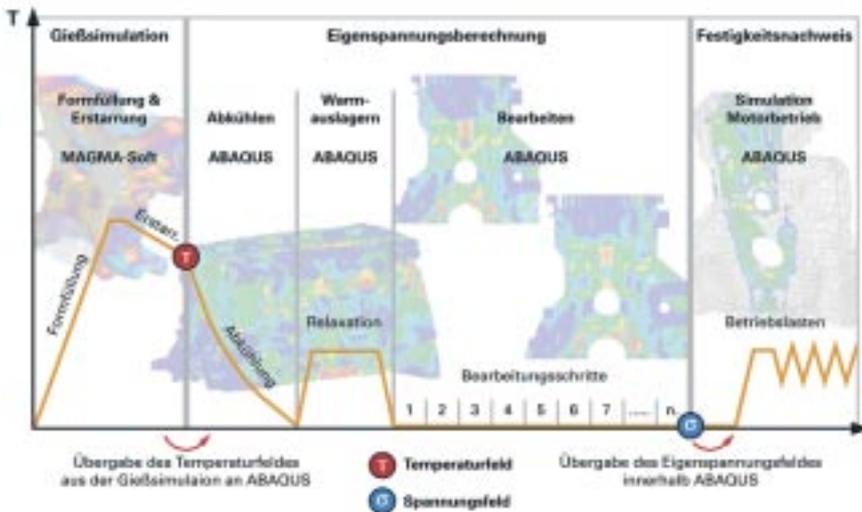


Bild 7: Berechnungssystematik zur Simulation des Herstellprozesses
Figure 7: Calculation procedures for simulating production processes

als auch bei 150MPa (rechtes Teilbild) werden im Bereich des primären Kriechens bei gleicher plastischer Verformung ϵ für die MRI Legierungen deutlich kleinere Kriechgeschwindigkeiten erreicht. Erhebliche Vorteile zeigen sich auch bezüglich der minimalen Kriechgeschwindigkeit im sekundären Kriechbereich. Diese liegt für die MRI Legierungen insbesondere bei hohen Spannungen (150 MPa) um mehrere Dekaden niedriger als bei der Legierung AS21.

Auch die Verschraubungstechnik für

thermisch belastete Leichtmetallkomponenten ist in den letzten Jahren konsequent weiter entwickelt worden. Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die zunehmende Anwendung von Aluminiumschrauben aus dem Werkstoff AA6056. Damit ist es gelungen, die Kontaktkorrosionseffekte, die erforderlichen Einschraubtiefen und die thermischen Vorspannkraftänderungen bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung im Vergleich zu Fügeverbindungen mit Stahlschrauben effektiv zu reduzieren.

Nach längeren Temperaturbelastungen werden aufgrund der angepassten Wärmeausdehnungen mit Aluminiumschrauben zudem meist höhere Restklemmkräfte als mit Stahlschrauben realisiert.

Die Bewertung der zuvor beschriebenen unterschiedlichen Werkstoff- und Hybridbaukonzepte wurde anhand von Auslagerungsversuchen an komplettierten Kurbelgehäusen vorgenommen, bei denen mittels Ultraschall die Veränderungen der Vorspannkraft gemessen wurden. Bild 6 zeigt die Veränderung der Vorspannkraft nach 1000h Auslagerung bei 130°C an ausgewählten Verschraubungsstellen. Die Vorteile der kriechbeständigen Magnesiumumlegierung MRI153M gegenüber der Legierung AZ91 sind deutlich zu erkennen.

5 FEM-Berechnungen

In der Konzeptphase des Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuses wurde ein vollständiger Festigkeitsnachweis unter Berücksichtigung der durch den Gießprozess induzierten Eigenspannungen im Kurbelgehäuse-Oberteil und Bedplate durchgeführt. Bei den Berechnungen wurde der gesamte Herstellprozess beider Teile – vom Rohteil bis zum fertig bearbeiteten Gussteil – betrachtet, Bild 7.

Für das bezüglich der Gießtechnik und der internen Kraftführung völlig neuartige Motorblock-Konzept konnte auf diese Weise recht früh die prinzipielle Umsetzbarkeit nachgewiesen werden. Weiterhin konnten Bereiche mit kritischem Eigenspannungsniveau frühzeitig erkannt und konstruktiv optimiert werden.

Bild 8 zeigt die Lastpfade im Zylinderkurbelgehäuse. Während die durch die Gas- und Massenkräfte hervorgerufenen zyklischen Zugbelastungen in der Struktur im Wesentlichen durch den Aluminium-Zylindereinsatz ertragen werden (rot gestrichelte Linien), erfährt der Magnesium-Lagerstuhl hauptsächlich Belastungen im Druckschwellbereich. Obwohl die Verschraubungstechnik an der Montagelinie herkömmlicher Art ist (keine Zuganker sondern separate Verschraubungen für Zylinderkopf und Hauptlager) profitiert der Lagerstuhl von der günstigen Belastung durch die langen Hauptlagerschrauben.

Die Verklammerung des Zylindereinsatzes und die auftretenden Schrumpfspannungen im Magnesium werden in Bild 8 durch grüne Pfeile angedeutet. Beim Abkühlen aus der Gießhitze schrumpft die Magnesiumlegierung auf das Aluminium-Eingussteil auf. Nach dem Erstarren verbleiben im Umguss im wesentlichen Zug-, im Eingussteil Druckspannungen. Die Ausbildung der Eigenspannungen wird dabei

maßgeblich von der Verbundzone zwischen Aluminium und Magnesium beeinflusst. Mit dem Programmsystem ABAQUS ist es gelungen, die mechanischen und thermophysikalischen Eigenschaften der durch die AlSi12-Beschichtung hervorgerufenen Verbundzone in den FEM-Berechnungen abzubilden.

Die in den Analysen zum Herstellprozess ermittelten Eigenspannungsverteilungen im Kurbelgehäuse Ober- und Unterteil bildeten die Grundlage für die anschließende Festigkeits- und Dauerfestigkeitsbetrachtung im Motorbetrieb, **Bild 9**. Auf eine möglichst genaue Abbildung der nichtlinearen Werkstoffkennwerte wurde dabei ebenso geachtet wie auf die Problematik des Materialkriechens. Für letzteres wurden spezielle Kriechroutinen entwickelt, welche in den Quellcode des FEM-Programms implementiert wurden. Diese Subroutinen ermöglichten es erstmals, das für jede Magnesiumlegierung spezifische Kriechverhalten mit Berücksichtigung der primären und sekundären Effekte abzubilden.

6 Technologische Umsetzung

Um den vorgegebenen engen Zeitrahmen für die Entwicklung des Audi-Hybrid-Magnesium-Kurbelgehäuses einzuhalten, war es erforderlich, die Prozesssimulation frühzeitig in der Konzeptphase einzusetzen. Mit Hilfe der Gießsimulation war es zum Beispiel möglich, zahlreiche Varianten der Druckgießwerkzeuge für das Zylinderkurbelgehäuse-Oberteil und Bedplate sowie der Kokille für den Zylindereinsatz zu berechnen und zu bewerten.

Der modulare Aufbau der Kokille zum Gießen des Zylindereinsatzes ermöglicht die Umsetzung verschiedener Gießkonzepte. Durch die Verwendung von austauschbaren Einsätzen ist es möglich, den Zylindereinsatz in konventioneller stehender Gießlage sowie im Kippkokillen- und Niederdruckkokillenguss herzustellen [9]. Darüber hinaus ermöglicht dieses Kokillenkonzert die Darstellung von closed-deck und open-deck Zylindereinsätzen. Die closed-deck Variante wird durch Verwendung eines cold-box Wassermantel-Sandkerns hergestellt, während die open-deck Ausführung ohne Sandkern gegossen werden kann, **Bild 10**.

Für das Umgießen des Aluminium-Zylindereinsatzes mit Magnesium sind prozesssicher nur Gießverfahren mit kurzer Formfüllzeit einsetzbar, da lange Füllzeiten zum lokalen Schmelzen des Eingussteils führen. Als mögliches Serienproduktionsverfahren kommt deshalb nur das Druckgießen mit Formfüllzeiten von etwa 80

5 FEM-Berechnungen

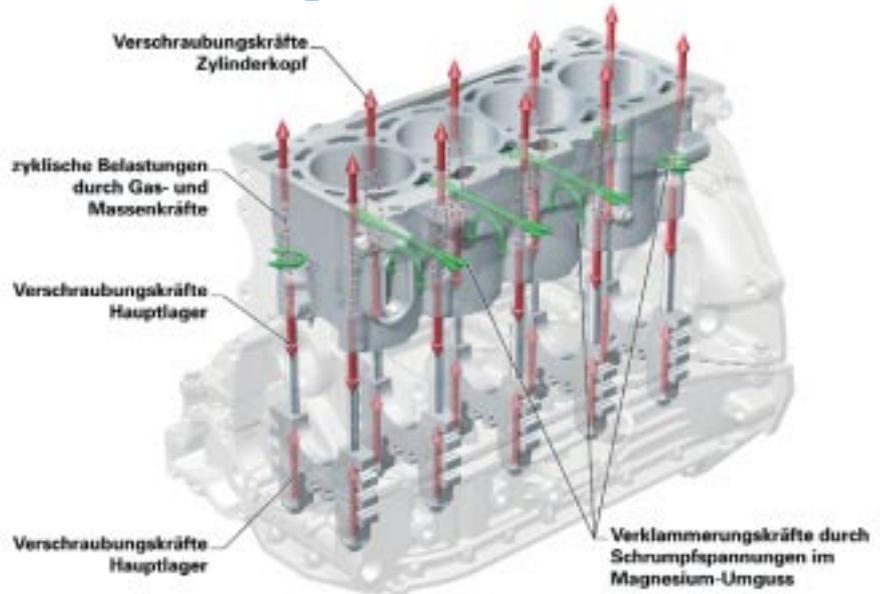


Bild 8: Motorbelastungen und Schrumpfspannungen im Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse
 Figure 8: Engine loadings and shrinkage stresses in the magnesium-hybrid cylinder block

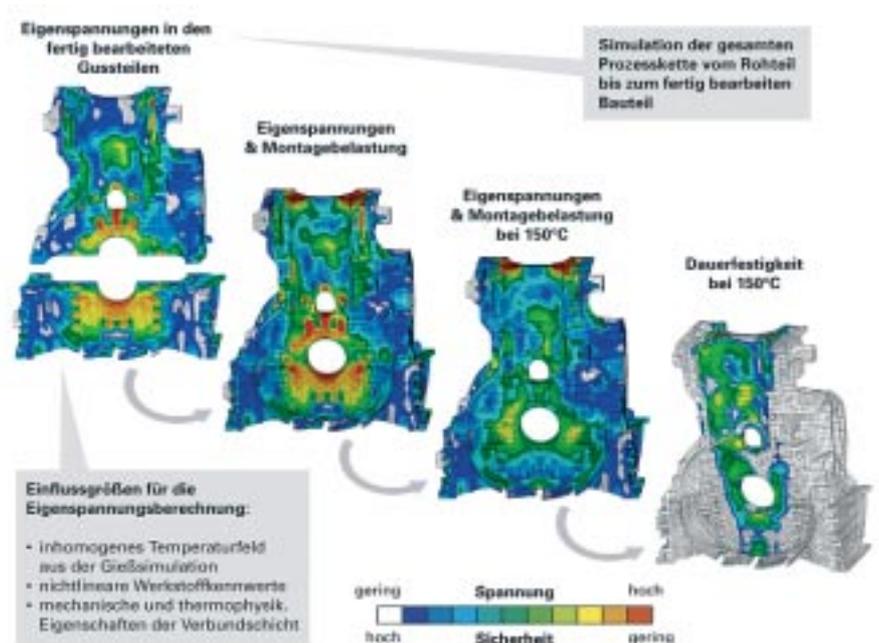


Bild 9: Berücksichtigung von Eigenspannungen aus dem Gießprozess und der mechanischen Bearbeitung als Basis für die Dauerfestigkeitsbetrachtung
 Figure 9: Consideration of internal stresses due to the casting process and machining as the basis for fatigue-life studies

Millisekunden in Frage. Aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeit und der geringen Viskosität der Magnesium-Schmelze sowie des hohen Drucks, mit dem die Schmelze in die Form gepresst wird, müssen werkzeugtechnische Maßnahmen getroffen werden, die ein Kollabieren der

Wassermantelwände oder das Eindringen von Schmelze in den späteren Wasserraum verhindern.

Ein weiteres Problemfeld ergibt sich aus dem gegenüber Aluminium um etwa 30 % geringeren Wärmeinhalt der Magnesium-Schmelze. Der Wärmeverlust der flüssigen

6 Technologische Umsetzung



Bild 10: Kokille für open-deck Zylindereinsatz (links) und closed-deck Zylindereinsatz (rechts), schematisch
 Figure 10: Gravity die casting moulds for an open-deck cylinder insert (left) and a closed-deck cylinder insert (right, schematic)

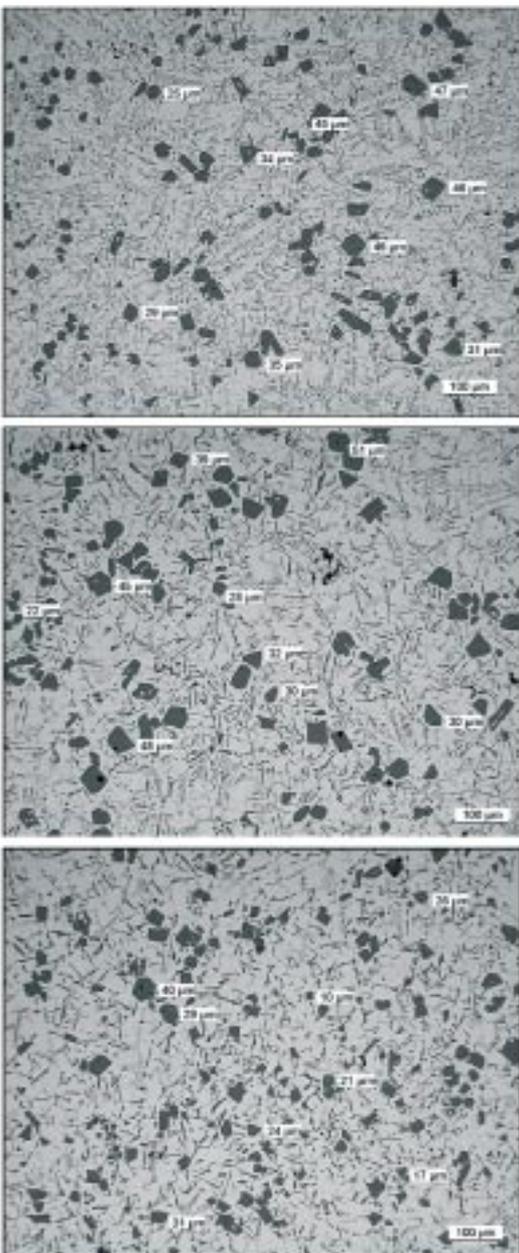


Bild 11: Siliziumausscheidungen im Linerbereich
 Figure 11: Silicon precipitation in the cylinder-bore zone

Metalle muss deshalb beim Dosieren in die Füllkammer sowie beim Einströmen in das Druckgießwerkzeug so gering wie möglich gehalten werden. Erreicht wird dies durch eine spezielle Temperaturführung von Füllkammer, Werkzeug und Eingsussteil. Darüber hinaus muss die unterschiedliche Wärmeausdehnung des Werkzeugstahls, der Aluminium-Eingsussteile und des Magnesium-Umgusses durch entsprechende werkzeugtechnische Maßnahmen berücksichtigt werden.

Entscheidend für die Funktion des Motors ist die gleichmäßige Ausbildung der Primärsiliziumkristalle nahe der Zylinderoberfläche. Die Größe der Siliziumkristalle wird maßgeblich von der Abkühlgeschwindigkeit sowie von Schmelzezusätzen beeinflusst. Durch den Einsatz von Kupferpinolen, die im Vergleich zu Stahl eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, wird eine hohe Abschreckwirkung erzielt, die zu einer guten Primärsiliziumausscheidung im Linerbereich führt. **Bild 11** zeigt eine hinreichend gute Silizium-Morphologie, sowohl im Topdeck als auch in der Mitte und am unteren Ende der Zylinderlaufbahn. Versuche mit wassergekühlten Stahlpinolen führten ebenfalls zu guten Ergebnissen.

Um die Haftung zwischen Aluminium-Zylindereinsatz und Magnesium zu verbessern, wird der Einsatz an der Außenseite mit einer plasmagespritzten AlSi12-Schicht versehen. Da sich der Zylindereinsatz im unteren Bereich durch die zahlreichen Durchbrüche ausreichend gut mit dem Magnesium-Umguss formschlüssig verbindet, muss nur der obere Teil auf Höhe des Wassermantels beschichtet werden. Dies spart Prozesskosten und verringert den Wärmeeintrag in das Magnesium unterhalb des Wassermantels.

Wie aus **Bild 12** ersichtlich ist, ergibt sich aufgrund der relativ rauen Oberflächenstruktur mit zahlreichen Hinter schnitten, eine gute Verklammerung des Magnesiums mit der Spritzschicht. Darüber hinaus zeigen Elementanalysen, die im Bereich der Phasengrenze durchgeführt wurden, dass es zu einer Interdiffusion der Aluminium- und Magnesiumatome kommt und somit eine partielle stoffschlüssige Verbindung vorliegt.

7 Ergebnisse

7.1 Motorische Erprobung

Für die motorische Erprobung des Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuses wurde der bekannte 1.8-l-Vierzylinder-Turbomotor mit Fünfventil-Zylinderkopf und Saugrohreinjection gewählt. Der Forderung nach hoher Leistungsdichte, kompakter

6 Technologische Umsetzung

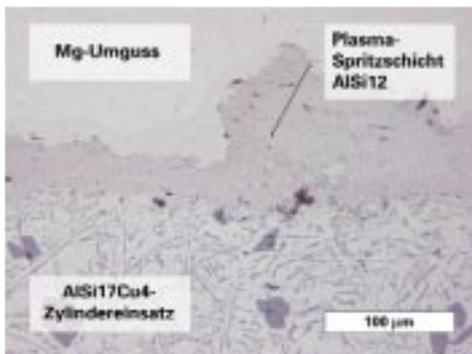


Bild 12: Plasma-Spritzschicht AlSi12 zur Verbesserung der Haftung zwischen Zylindereinsatz und Mg-Umguss

Figure 12: Plasma-sprayed AlSi12 coating to improve adhesion between cylinder insert and magnesium mantle

ten Motorabmessungen, geringem Gewicht und geringem spezifischen Kraftstoffverbrauch wird mit diesem Aggregat Rechnung getragen. Ziel war es, für den Magnesium-Hybrid-Turbomotor ein Mitteldruckniveau darzustellen, welches sich nahezu auf dem Niveau der neu entwickelten 2.0-l-TFSI Motoren befindet.

In Bild 13 sind die wichtigsten Motordaten des Magnesium-Hybrid-Turbomotors zusammengefasst. Die maximale Leistung von 120 kW wird bei 5700/min erreicht, das maximale Drehmoment von 225 Nm liegt zwischen 1950 und 4700/min. Bild 13 zeigt den Mitteldruckverlauf des Motors im Vergleich zu Mitteldrücken von in Serie ausgeführten Saug- und Turbo-Ottomotoren.

Aufgrund der höheren Zylindersteifigkeit im Topdeck-Bereich kam ein Kurbelgehäuse mit closed-deck Zylindereinsatz zum Einsatz. Im Hauptlagerbereich wurde im Zylinderkurbelgehäuse-Oberteil auf verstärkende Einlegeteile verzichtet. Das Bedplate verfügt über Verstärkungselemente aus pulvermetallurgisch hergestelltem Aluminium. Von allen denkbaren Lagerstuhlvarianten stellt diese Kombination die günstigste in Bezug auf das Kurbelgehäusegewicht und die ungünstigste in Bezug auf die Hauptlageraufweitung und Festigkeit dar. Für den Magnesiumumguss von Zylinderkurbelgehäuse-Oberteil und Bedplate wurde jeweils die Legierung MRI153M verwendet, da diese den besten Kompromiss aus Materialeigenschaften, Kosten und Gießbarkeit darstellt.

Bereits im ersten Dauerlauf konnte das Grundkonzept des Magnesium-Turbo-Motors bestätigt werden. Bei der Analyse des Motors wurden keine nennenswerten Schäden, weder am Magnesium-Umguss,

7.1 Motorische Erprobung

1,8l 5V Turbo mit Mg-Hybrid ZKG		
Grundabmessung	Einheit	
Hubraum	cm ³	1781
max. Leistung	kW	120
max. Drehmoment	Nm	225
Hub	mm	86,4
Bohrung	mm	81
Hub/Bohrung (Verhältnis)	–	1,07 : 1
Zylinderabstand	mm	88
Stoßbreite	mm	7
Stoßhöhe	mm	220
Bedplatehöhe	mm	91
Flauflänge	mm	144
Flauflagendurchmesser	mm	47,8
Hauptlagendurchmesser	mm	48
Hauptlagerbreite	mm	26
Verdichtung (Verhältnis)	–	9,5 : 1

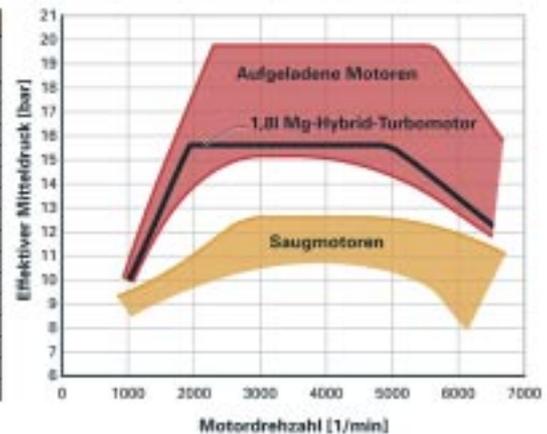


Bild 13: Motordaten und Mitteldruckkurve des Magnesium-Hybrid-Turbomotors

Figure 13: Engine data and mean effective pressure curve for the magnesium-hybrid turbo engine

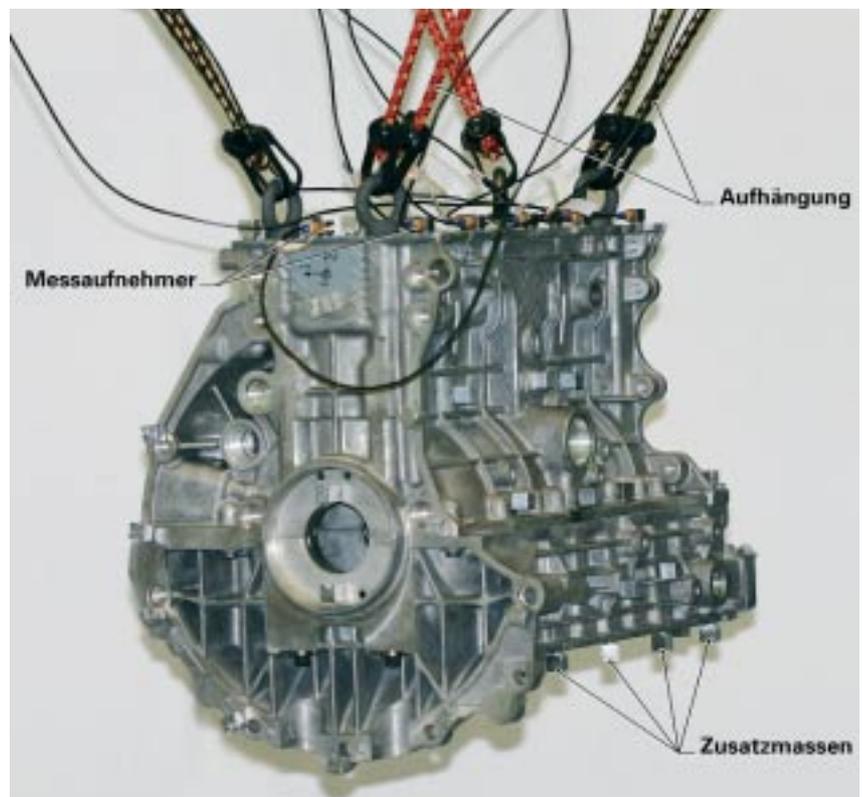


Bild 14: Experimentelle Modalanalyse (Versuchsaufbau)

Figure 14: Experimental modal analysis (test rig)

noch an den Eiussteilen festgestellt. Der Motor konnte bei Übernahme aller Bauteile weiterbetrieben werden.

7.2 Akustische Erprobung

Zur Beurteilung der akustischen Güte des Leichtbaukurbelgehäuses wurde das Eigenschwingungsverhalten sowohl rechnerisch als auch experimentell ermittelt und mit

dem Serien-Kurbelgehäuse aus GJL 250 verglichen.

Die experimentelle Modalanalyse, Bild 14, wurde mit der „Hammerschlagmethode“ durchgeführt. Sie diente zum einen der Verifikation der Berechnungsergebnisse und zum anderen zur Ermittlung der modalen Dämpfungen des Magnesium-Aluminium-Verbund-Zylinderkurbelgehäuses.

ses. Bezüglich der Frequenzen der Eigenschwingformen zeigte sich eine gute Korrelation zwischen Berechnung und Messung. Die Untersuchungen ergaben klare Vorteile für das Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse. Die charakteristischen Eigenfrequenzen für die Torsions-Eigenschwingungsform und die Quer- beziehungsweise Hochbiegung lagen um bis zu 66% höher als beim Serien-Zylinderkurbelgehäuse bei etwa neun mal höherer Dämpfung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Audi-Hybrid-Magnesium Zylinderkurbelgehäuse ist es erstmals gelungen, einen Turbomotor mit hervorragenden Leistungs- und Drehmomenteigenschaften darzustellen, welcher sich durch eine Gewichtseinsparung gegenüber üblichen Grauguss-Zylinderkurbelgehäusen von etwa 23 kg auszeichnet. Durch gezieltes lokales Werkstoffengineering ergeben sich viele innovative Ansätze zur Beherrschung der turbospezifischen hohen Belastungen. Ein kompakter multifunktionaler Zylindereinsatz aus Aluminium, der im Druckgussverfahren in Magnesium eingegossen wird, vereinigt die für ein Zylinderkurbelgehäuse charakteristischen Funktionen der Zylinderlaufbahn, der Zylinderkopf- und Hauptlagerverschraubung sowie der Kühlwasserführung.

Eine Besonderheit des Konstruktions- und Herstellkonzepts ist es, dass sich auch closed-deck Motorblöcke für hohe Spitzendrücke im Druckgussverfahren herstellen lassen. Dieses Privileg war bisher sand- oder kokillengegossenen Motorblöcken vorbehalten. Neu entwickelte, kriechfeste Magnesiumlegierungen ermöglichen es, das Einsatzspektrum dieses Leichtbauwerkstoffs auch auf spezifisch höher belastete Motoren zu erweitern.

Literaturhinweise

- [1] Krebs, R.; Böhme, J.; Dornhöfer, R.; Wurms, R.; Friedmann, K.; Helbig, J.; Hatz, W.; Der neue Audi 2.0 T FSI Motor - Der erste direkt einspritzende Turbo-Ottomotor bei Audi, 25. Internationales Wiener Motorensymposium, April 2004
- [2] Böhme, J.; Fröhlich, A.; Doerr, J.; Motorblöcke aus Aluminium oder Gusseisen? Gießtechnik im Motorenbau, Tagung Magdeburg, 30./31. Januar 2003, VDI-Bericht
- [3] Böhme, J.; Doerr, J.; Schneider, W.; v. Grossmann, B.: Audis Hybrid-Magnesium Technologie. In: Automobil Produktion, Heft Nr. 5, 2003
- [4] Böhme, J.; Doerr, J.; Scheider, W.; v. Großmann, B.; Die Audi-Hybrid-Magnesium Technologie – Ein neuer Ansatz für Leichtbau-Zylinderkurbelgehäuse, 4. Fachkonferenz Fortschritte im Automobil-Leichtbau, 14./15. Oktober 2003, Stuttgart
- [5] Klüting, M.; Chr. Landerl; Der neue Sechszylinder-Ottomotor von BMW, MTZ 65 (2004), Heft 11, S. 868
- [6] von Buch, F.; Schumann, S.; Friedrich, H.: Entwicklung neuer kriechbeständiger Magnesium-Druckgusslegierungen. In: 9. Magnesium-Abnehmerseminar, 27. - 28. September 2001, Aalen
- [7] Aghion, E.; Bronfin, B.; Eliezer, D.; Schumann, S. et.al : The Art of Developing New Magnesium Alloys for High Temperature Applications;

Magnesium Alloys 2003 ; Proceedings of the Second Osaka International Conference on Platform Science and Technology; OSAKA 26-30.01.03

- [8] Aghion, E.; Bronfin, B.; von Buch, F.; Schumann, S.; Friedrich, H.: A comparative study of new magnesium alloys developed for elevated temperature applications in automotive industry, SAE-paper 2003-01-0191. In: 2003 SAE World Congress, März 2003, Detroit
- [9] Böhme, J.; Doerr, J.; Scheider, W.; v. Großmann, B.; Audi Hybrid Magnesium Technology – a New Approach to the Lightweight Engine Block, 61st annual world magnesium conference, New Orleans, USA, Mai 2004

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**
For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.



MTZ Vieweg Verlag Postfach 1546 D-65173 Wiesbaden
Hotline 06 11778 79-151 Fax 06 11778 79-423
email: vieweg.service@gvw-fachverlage.de