

Gusseisen - der Werkstoff für Zylinderkurbelgehäuse der neuesten Motorengeneration

von Rolf Weber und Wim Görtz

Aufgrund der Diskussion um zukünftige CO₂-Grenzwerte ist die Herausforderung an die Motorenkonstrukteure, den Kraftstoffverbrauch weiter zu reduzieren, mit Nachdruck gestellt. Dies wird über Verbrennungskonzepte, Downsizing, Hybridisierung und Gewichtsreduzierung verfolgt. Genau diese Konstellation ist eine einmalige Chance für Zylinderkurbelgehäuse aus Gusseisen. Denn, neben der Möglichkeit, Leichtbaukonzepte in Gusseisen zu realisieren sowie höchsten Bauteilbelastungen bei zukünftigen Downsizing-Konzepten standzuhalten, spricht auch der günstige Preis für den Werkstoff Gusseisen. Das Spannungsfeld, in dem die Entscheidung der Konstrukteure für einen Werkstoff getroffen wird und die Möglichkeiten, die der Werkstoff Gusseisen heute bietet, werden in dem vorliegenden Beitrag diskutiert.

Marktentwicklung

Weltweit wachsen die Automobilmärkte mit den Schwerpunktregionen Asien und Osteuropa (**Bild 1**). Selbst mit den gegenwärtig stattfindenden weltweiten Marktturbulenzen im automotiven Bereich wird langfristig das Wachstum der Mobilität anhalten.

Verglichen mit den Zulassungszahlen des Jahres 2003 wird nach [1] bis zum Jahr 2013 die Zahl der Neuzulassungen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5 t um ca. 40 % steigen und damit die 70-Mio.-Grenze erreichen. Die weltweit am stärksten vertretene Fahrzeugklasse wird ab dem Jahr 2015 die Kleinwagenklasse sein. Nach Vorhersagen [1] werden die Neuzulassungen bei den Kleinwagen um 145 % auf 27 Mio. anwachsen.

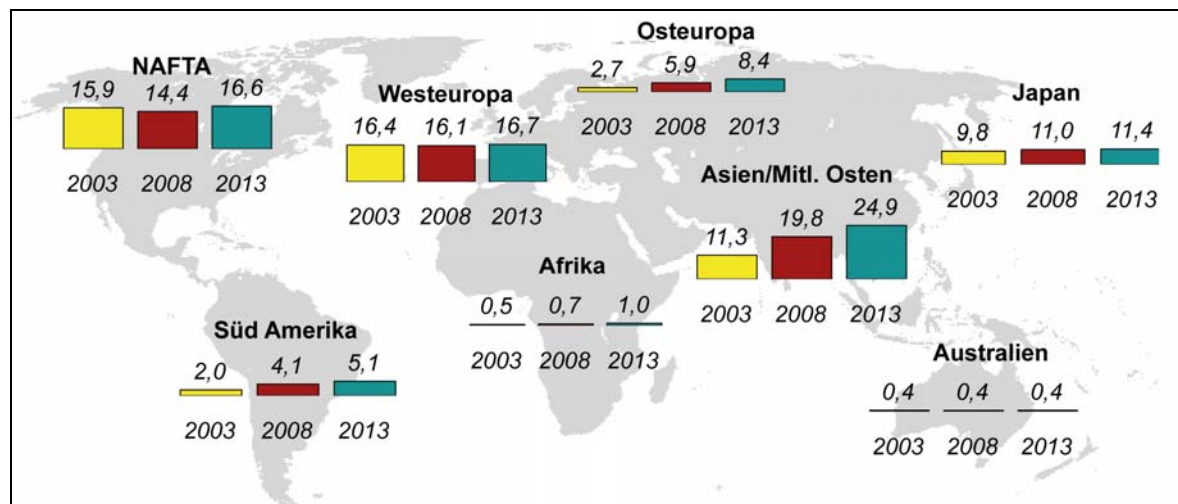


Bild 1: Weltweite Automobilproduktion von Pkw in Mio. Stück

Niedrigvolumige Fahrzeugmotorisierungen, bei denen aber auch nicht auf Fahrleistung verzichtet werden soll, werden als Vier-, Drei- und Zwei-Zylindermotoren auf den Markt drängen. Im Vordergrund werden hier niedrige Verbrauchswerte gepaart mit hohen spezifischen Literleistungen stehen. Insbesondere diese Entwicklungen werden aufgrund werkstoffspezifischer Gegebenheiten überwiegend in Eisenguss stattfinden.

Volumenverteilung von Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium und Eisen

Nach einer deutlichen Substitution von Zylinderkurbelgehäusen aus Gusseisen durch den Werkstoff Aluminium zu Beginn des 21. Jahrhunderts haben sich die Anteile in Europa in den letzten Jahren auf ein Verhältnis von 50 : 50 eingependelt (**Bild 2**). Grund für den Stopp der Substitution ist die zunehmende Leistungsdichte der Verbrennungsmotoren, bei denen der Werkstoff Aluminium teils an seine Grenzen stößt, sowie die durchgeführten Leichtbauentwicklungen in den Eisengießereien. Die Leistungsdichteentwicklung, die zunächst überwiegend auf Dieselmotoren fokussiert war, setzt sich nun auch bei Ottomotoren fort. Die Differenzierung nach Verbrennungskonzepten verschimmt aufgrund der Weiterentwicklung neuester Ottomotorengenerationen. Zunehmend werden auch Ottomotoren deutlich höheren Belastungen ausgesetzt, mit der Folge eines vermehrten Einsatzes von Eisenzylinderkurbelgehäusen in neuesten Entwicklungen. Im Segment der hubraumreduzierten

Zwei-, Drei- und Vier-Zylindermotoren kann der Werkstoff Eisen seine Stärken voll ausspielen, so dass ab 2011, bei Anlauf neuer Motorengenerationen in Europa, eine Substitution des Werkstoffs Aluminium durch Eisen prognostiziert werden kann. Das Verhältnis in Europa für das Jahr 2012 sagen die Autoren mit 60 % Eisen und 40 % Aluminium für Zylinderkurbelgehäuse voraus (Bild 2).

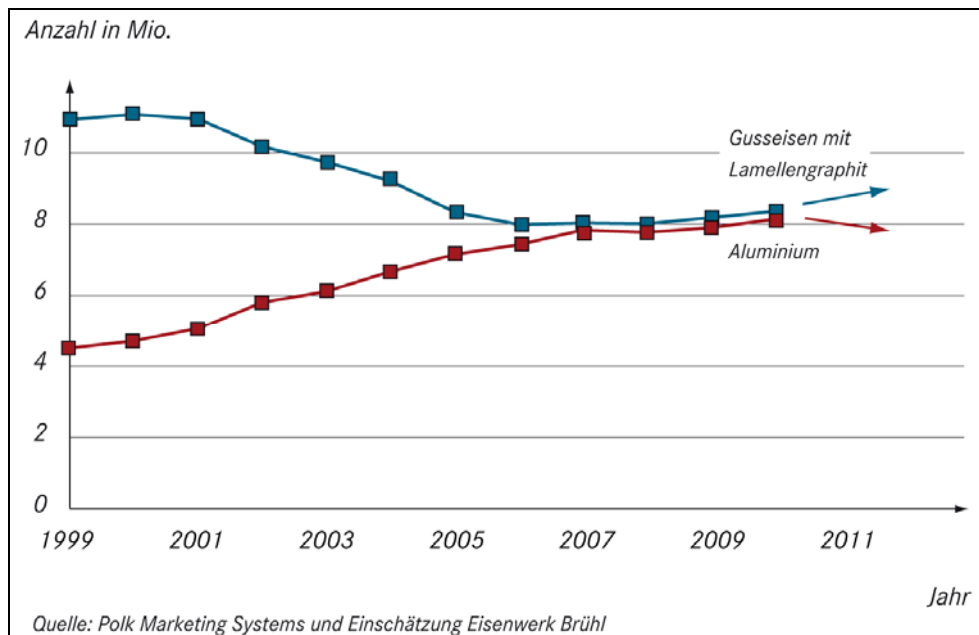


Bild 2: Anzahl von in Europa hergestellten Zylinderkurbelgehäuse in Aluminium und Eisen

Gesetzliche Regelungen und Folgerungen

Treiber für viele technische Neuerungen sind gesetzliche Regelungen. Bei den Abgasnormen finden sich diese beispielsweise in den Euro-1- (1992) bis Euro-6- (2014) Regularien. Aktuell gilt Euro 4. Weitere Reduzierungen bei den zukünftigen Abgasgrenzwerten von Euro 5 und 6 betreffen bei Dieselmotoren insbesondere NO_x- und Partikelgehalte. Bisher wurden die Optimierungen überwiegend durch Maßnahmen bei der motorischen Verbrennung erreicht. Zukünftig werden zusätzlich vermehrt Abgasnachbehandlungsverfahren und der Einsatz von Partikelfiltern notwendig werden, was die Motorkosten erhöht. Bei Ottomotoren sind die Grenzwertveränderungen bis zu Euro 6 moderater als bei Dieselmotoren.

Zusätzlich zu den Emissionen werden seit geraumer Zeit auch die Verbräuche in Form von CO₂-Werten (Emissionen) in den Fokus gerückt. Der diskutierte Grenzwert von 120 g/km kann mit unterschiedlichen Konzepten realisiert werden. Als Schlagworte sind hier das Downsizing sowie eine fortschreitende Hybridisierung zu nennen, worauf in den weiteren Ausführungen noch näher eingegangen wird.

Neben den Energieverbräuchen, die während der Bauteillebensdauer in Form von Treibstoffverbrauch aufgrund der bewegten Masse auftreten, muss bei einer Gesamtenergiebilanz auch der Energieeinsatz bei der Bauteilherstellung berücksichtigt werden. Im Rahmen einer Ökobilanz wurden in der beschriebenen Untersuchung [2] die Fertigungsprozesse für Aluminium- und Eisenzylinderkurbelgehäuse gegenübergestellt und bewertet.

Auch wenn Aluminiumzylinderkurbelgehäuse zu 100 % aus Sekundäraluminium sowie in hohem Maße durch den Einsatz von Flüssigaluminium hergestellt werden, so ist die CO₂-Bilanz bei Zylinderkurbelgehäusen aus Eisen je kg Material um 50 % günstiger. Dies liegt insbesondere an der Erschmelzung des Schrottes im Kupolofen, der ein sehr effizientes Schmelzaggregat darstellt. Aufgrund eines höheren Gewichts des Eisenzylinderkurbelgehäuses gegenüber einer Aluminiumvariante wird der zu Beginn des Lebenszyklus vorhandene Energievorteil des Eisenzylinderkurbelgehäuses aufgezehrt.

Unter Berücksichtigung einer Fahrzeuglebensleistung von 200 000 km und einem Treibstoffmehrerverbrauch im Fahrzeugeinsatz von 0,3 l/100 km je 100 kg Mehrgewicht und einer Zumischung von 5 % Primäraluminium beim Al-Gehäuse ist die Bilanz zwischen einem Zylinderkurbelgehäuse aus Eisen und Aluminium bei einem Gewichtsunterschied von ca. 25 % ausgeglichen. Das bedeutet, dass erst oberhalb einer Fahrleistung von 200 000 km ein Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium energetisch günstiger ist als die Eisenvariante, sofern das Eisenzylinderkurbelgehäuse ca. 25 % schwerer ist. Keine Berücksichtigung findet in dem Vergleich das Thema Motorgesamtgewicht bzw. Packaging. Das Mehrgewicht eines Eisenzylinderkurbelgehäuses führt nicht notwendigerweise zu einem schwereren Motor.

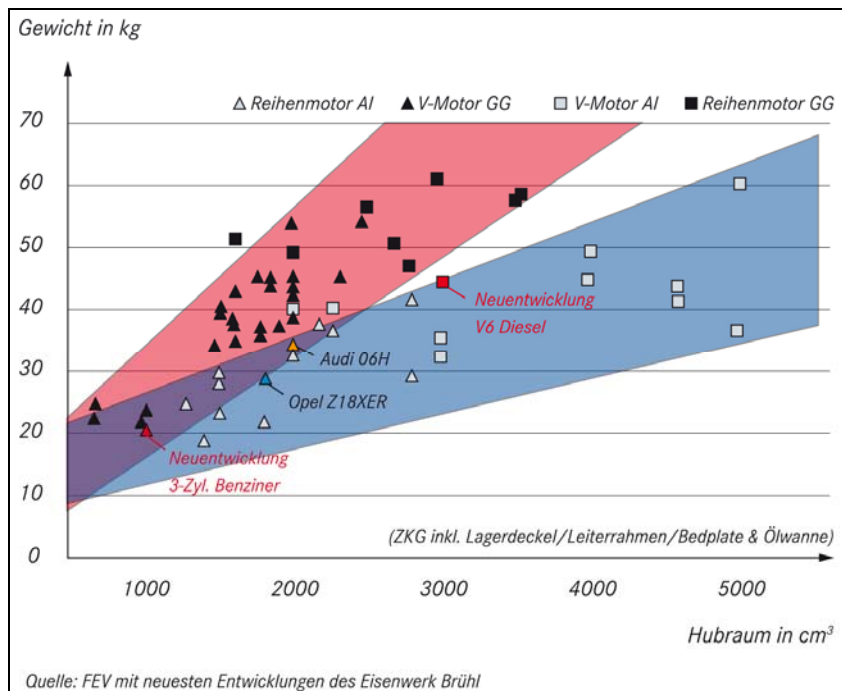


Bild 3: Gewicht von Zylinderkurbelgehäusen in Gusseisen und Aluminium in Abhängigkeit vom Hubraum

Die langläufig vertretene Annahme eines deutlichen Gewichtsvorteils von Aluminiumzylinderkurbelgehäusen gegenüber Gusseisen wird mit neuesten Entwicklungen der Eisenwerk Brühl GmbH, widerlegt. Die bekannte von der FEV Motorentchnik GmbH, Aachen, publizierte Gewichtscharakteristik von Zylinderkurbelgehäusen unterschiedlicher Hersteller in Abhängigkeit vom Hubraum (**Bild 3**) zeigt zwei Streubereiche. Der rote Bereich stellt Zylinderkurbelgehäuse in Gusseisen, der blaue in Aluminium dar. Unterhalb von Hubraumvolumina von 2,0 l überlappen die Bereiche und die Gewichtsunterschiede zwischen Gusseisen und Aluminium verschwimmen. Neueste Entwicklungen aus den Eisenwerk Brühl, eingetragen in die Grafik (Bild 3), zeigen, dass bereits heute Entwicklungen in Gusseisen im Gewichtsstreubereich des Aluminiums liegen. Dies ist durch intelligentes Design und die Weiterentwicklung in der Werkstoff- und Fertigungstechnik möglich geworden. Berücksichtigt man zusätzlich noch Sekundäreffekte aufgrund des Packings (**Bild 4**), so existiert ein Gewichtsachteil eines Gusseisenmotors praktisch nicht mehr. Das reduzierte Gesamtvolumen des Motors ergibt als Konsequenz, dass auch andere Bauteile kompakter ausgeführt werden, wie z. B. die Kurbelwelle, die Ausgleichswellen u. a. Daraus folgt, dass neben der Gewichtsreduzierung des Zylinderkurbelgehäuses eine Gewichtsreduzierung des gesamten Motors und ggf. sogar der Karosserie stattfindet. Insofern muss bei einer Gewichtsbeurteilung nicht nur das Gewicht des Zylinderkurbelgehäuses, sondern des Gesamtmotors im Vordergrund stehen. Dies ist leider aus Mangel an vergleichbaren Motoren nur eingeschränkt möglich. Unveröffentlichte Vergleiche von Automobilherstellern zeigen je nach Konstruktion des Gesamtmotors keine Nachteile von Gusseisen auf, da das geringfügige Mehrgewicht des Zylinderkurbelgehäuses durch eine kompaktere Bauweise und die Folgewirkungen auf andere Bauteile kompensiert werden kann.

Dieselmotoren mit Hubräumen um ca. 3,0 l werden, sofern sie in Eisen ausgeführt werden, in Gusseisen mit Vermiculargraphit hergestellt und sind dort zu Aluminium wettbewerbsfähig (Bild 3).

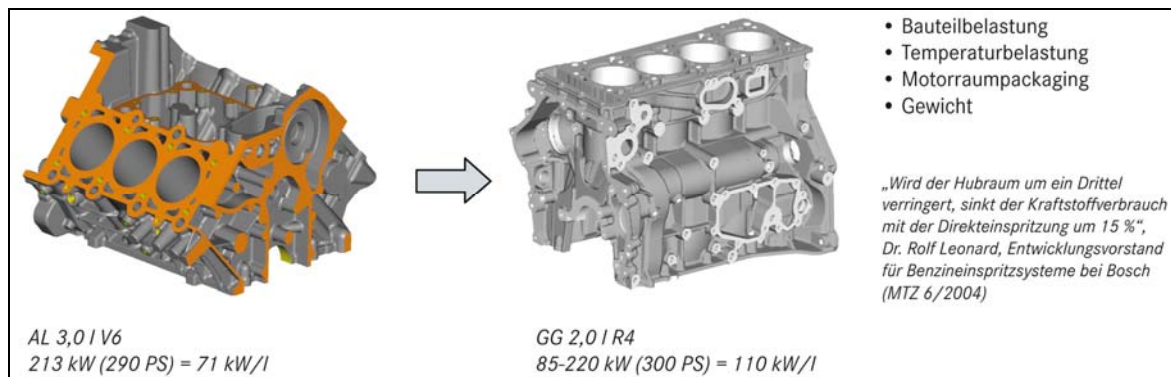


Bild 4: Downsizing, dargestellt an einem Sechs-Zylindermotor

Unter Downsizing wird die Reduzierung des Motorvolumens bei gleichzeitiger Beibehaltung bzw. sogar Erhöhung der Leistung verstanden (Bild 4). Eindrucksvoll wird dies in einem Vergleich eines Sechs-Zylinderkurbelgehäuses aus Aluminium mit einem Vier-Zylinderkurbelgehäuse des gleichen Herstellers aus Gusseisen demonstriert. Beide Ottomotoren werden heute in Serie hergestellt. Der Vier-Zylinderreihenmotor aus Gusseisen ist als Weltmotor konzipiert und deckt die gesamte Leistungspalette von 85 bis 220 kW ab. Sowohl die absoluten als auch spezifischen Leistungswerte des Motors mit dem Eisenzylinderkurbelgehäuse liegen deutlich höher als die des Aluminium-Sechs-Zylindermotors. Aufgrund der Leistungsreserven des Gusseisens kann die gesamte Motorenfamilie mit einem Werkstoff und damit einem Einheitsrohrtel abgedeckt werden. Dies hat hohe Stückzahlen zur Folge und wirkt sich in deutlichen kosten- und logistischen Vorteilen aus. Die Erhöhung der Leistungsausbeute des Vier-Zylindermotors in Gusseisen wird durch motorische Aufladung, verbunden mit einer Direkteinspritzung, erreicht. Unmittelbare Folge dessen ist eine höhere mechanische und thermische Belastung des Zylinderkurbelgehäuses, wodurch wiederum die Werkstofffrage Gusseisen/Aluminium in Richtung Gusseisen beantwortet werden kann.

Das reduzierte Gesamtvolumen des Motors ergibt als Konsequenz, dass auch andere Bauteile kompakter ausgeführt werden, wie zum Beispiel die Kurbelwelle, die Ausgleichswellen und andere mehr. Daraus folgt, dass neben der Gewichtsreduzierung des Zylinderkurbelgehäuses eine Gewichtsreduzierung des gesamten Motors und ggf. sogar der Karosserie stattfindet. Insofern muss bei einer Gewichtsbeurteilung nicht nur das Gewicht des Zylinderkurbelgehäuses, sondern des Gesamtmotors im Vordergrund stehen. Dies ist leider aus Mangel an vergleichbaren Motoren nur eingeschränkt möglich. Unveröffentlichte Vergleiche von Automobilherstellern zeigen je nach Konstruktion des Gesamtmotors keine Nachteile von Gusseisen auf, da das geringfügige Mehrgewicht des Zylinderkurbelgehäuses durch eine kompaktere Bauweise und die Folgewirkungen auf andere Bauteile kompensiert werden kann.

Bauteilbelastungen

Die Bauteilbelastungen eines Zylinderkurbelgehäuses setzen sich aus zyklischen, schwellenden, statischen und thermische Belastungen zusammen und treten überlagert auf (**Bild 5**). Im Bereich des Zylindersteges entstehen hohe thermische Belastungen, die je nach Motorausführung zusätzlich eine Stegkühlung erfordern. Hohe statische mechanische Belastungen werden durch die Zylinderkopfverschraubung verursacht und mit hoch frequenten zyklischen Belastungen als Folge der Verbrennungskräfte überlagert. Das Zylinderrohr muss eine ausreichende Steifigkeit aufweisen, um Deformationen zu vermeiden und eine ausreichende Abdichtung des Kolbenrings gegen die Verbrennungsgase im Einsatz zu gewährleisten.

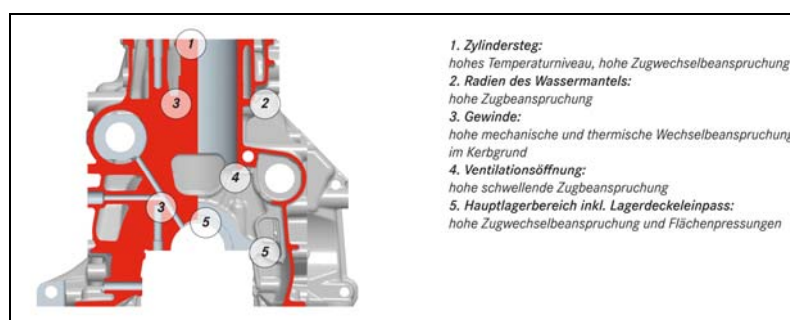


Bild 5: Bauteilbelastungen an einem Zylinderkurbelgehäuse

Im Bereich der Gewinde treten hohe wechselnde/schwellende Belastungen auf, die zukünftig aufgrund weiter ansteigender Verbrennungsdrücke zunehmend kritischer bewertet werden müssen. Im Lager- und Kopfplattenbereich werden die Verbrennungskräfte eingeleitet und führen in Verbindung mit den Montagespannungen zu Zugwechselbeanspruchungen und hohen Flächenpressungen.

Neben den mechanischen und thermischen Belastungen befindet sich ein hoch komplexes tribologisches System im Zylinderkurbelgehäuse. Der Kolbenring gleitet auf einem Ölfilm an der Zylinderwand. Verzüge der Zylinderrohre würden unweigerlich zu lokalen Kontaktpunkten des Kolbenringes führen und damit ein Fressen und den Ausfall des Systems herbeiführen. Zylinderverzüge erhöhen weiterhin das Blow-by (verunreinigte Verbrennungsgase treten zwischen Zylinderlaufbahn und Kolbenringen aus) und damit verbunden die Emissionen. Gegen diese unerwünschten Fälle hilft eine hohe Steifigkeit des Zylinderrohrmaterials, ein gutes Ölhaltevolumen sowie gute Notlaufeigenschaften. Diese Eigenschaften bietet der Werkstoff Gusseisen, was dazu führt, dass selbst in Aluminiumzylinderkurbelgehäusen häufig Buchsen aus Gusseisen mit Lamellengraphit Verwendung finden. Aufgrund der Komplexität der Tribologie hat sich bei Aluminiumzylinderkurbelgehäusen jedoch keine eindeutige Lauffächentechnologie herauskristallisiert. Grundvoraussetzung, um zukünftige Emissionsgrenzwerte einzuhalten, ist ein stabiles tribologisches System, was mit Gusseisen per se gegeben ist und mit ansteigender mechanischer und thermischer Belastung zunehmende Bedeutung erlangt.

Konstruktion

Das Hauptaugenmerk der Konstrukteure liegt auch weiterhin auf der Gewichtsreduzierung. Dem wird mit geschlossenen Regelkreisen in der Konstruktion und der Fertigung in der Gießerei Rechnung getragen.

Der im Eisenwerk Brühl heute ablaufende Standardprozess beinhaltet eine Gießsimulation mit einer Vorhersage von Schwachstellen, die in einer Optimierung sowie in einer Vorhersage lokaler Festigkeiten münden (Bild 6). Die berechneten Festigkeiten aus der Gießsimulation werden mit in FEM-Rechnungen bestimmten Lastspannungen verglichen, bewertet und optimiert. Im Rahmen der Fertigungsüberwachung werden regelmäßig Geometriewerte des kompletten Bauteils ermittelt; im Bedarfsfall wird durch Werkzeugänderungen gegengesteuert. Diese Regelkreise ermöglichen es im Eisenwerk Brühl, robuste Serienprozesse aufzubauen und zu betreiben.

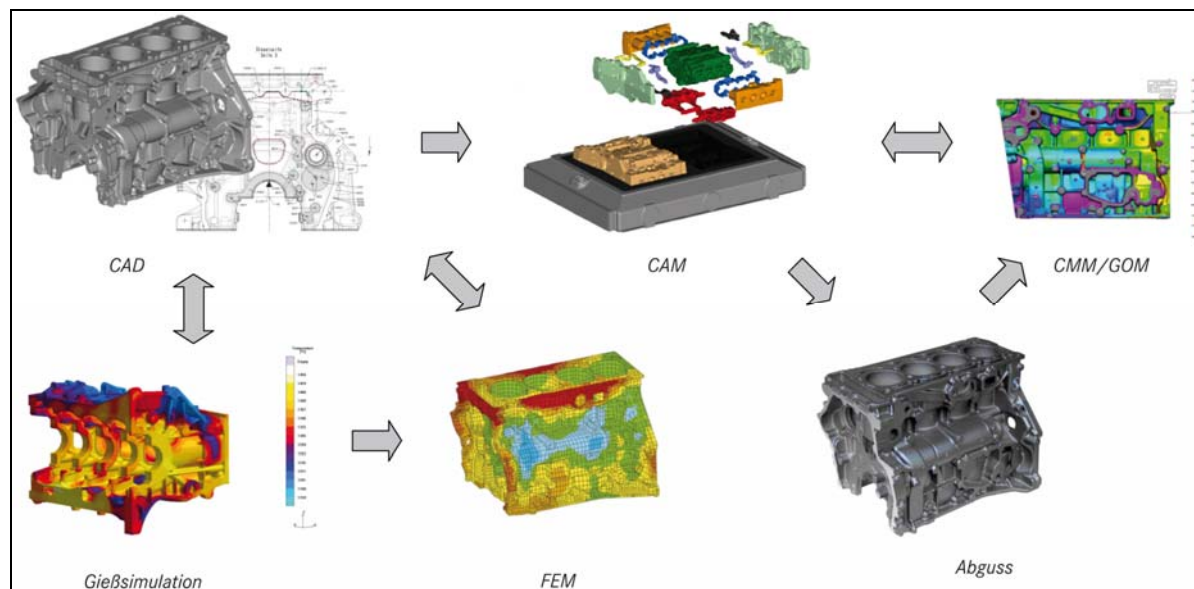


Bild 6: Durchgängige CAD-Prozesskette von der Konstruktion bis zur Fertigungssteuerung

Nicht berücksichtigt sind in der heutigen Auslegung Eigenspannungen, die aufgrund des Gießprozesses oder auch in der späteren mechanischen Bearbeitung in das Bauteil eingebracht werden. Dieser Schwachpunkt ist erkannt worden und wird in kritischen Bauteilbereichen zukünftig bei Auslegungen berücksichtigt (Bild 7). Die thermischen Eigenspannungen können heute mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Schwieriger als die Berechnung ist die konstante Beibehaltung eines vorhergesagten Eigenspannungsniveaus, denn die Einflussmöglichkeiten im

Herstellungsprozess sind vielfältig und haben ggf. einen Einfluss auf die Eigenspannungsbildung im Bauteil. Der Gießprozess, die Abkühlungsbedingungen sowie die Kern- und Sandeigenschaften üben einen erheblichen Einfluss auf das Eigenspannungsniveau aus und müssen im Herstellungsprozess überwacht und weitestgehend konstant gehalten werden.

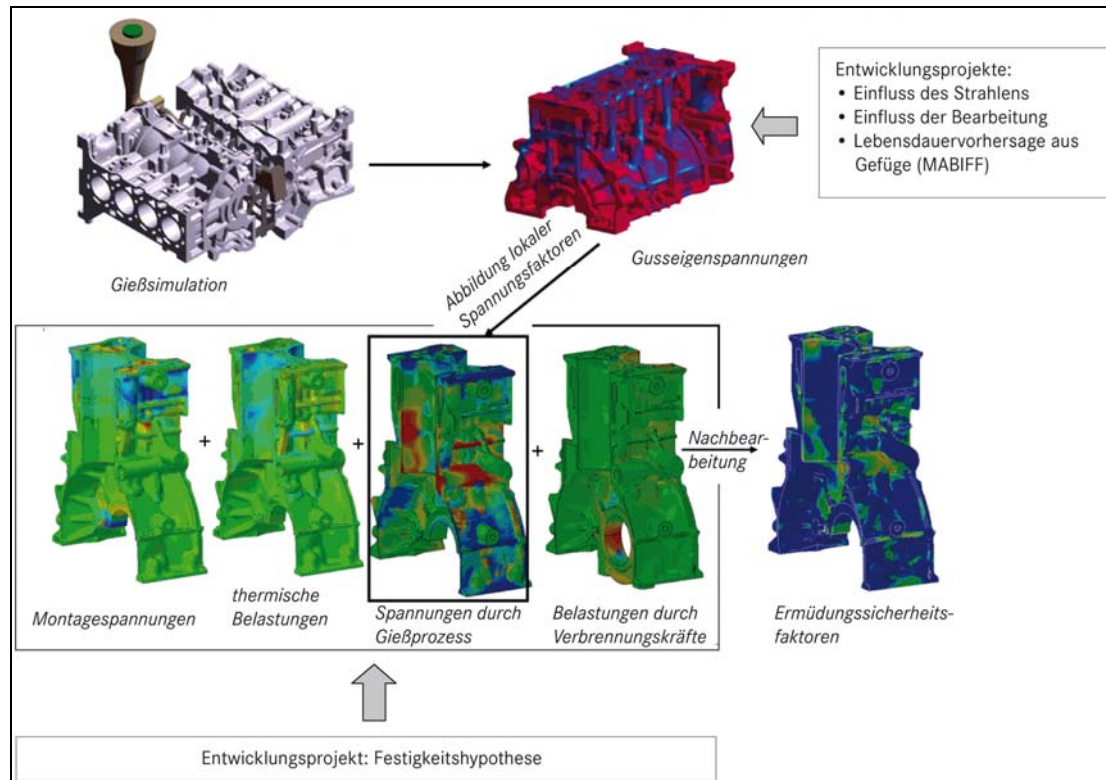


Bild 7: Leichtbaupotentiale aus der Werkstoffanalyse und der Berechnung

Schwierigkeiten bei der Vorhersage der Auswirkungen auf die Eigenspannungsbildung am Bauteil bereiten die Prozesse in der mechanischen Nachbearbeitung. Hier sind sowohl das Reinigungsstrahlen nach dem Gießen als auch der Schleifprozess in der mechanischen Bearbeitung zu nennen. Natürlich sind auch Bearbeitungsverfahren beim Kunden zu berücksichtigen und in die Diskussionen mit einzubeziehen. Als Kundengießerei wirkt das Eisenwerk Brühl hier als kompetenter Partner an den Problemstellungen der Kunden mit. In Projekten wird an der Thematik gearbeitet, den verwendeten Reinigungsstrahlprozess gezielt für die Verfestigung bestimmter Bauteilbereiche einzusetzen. Um dies erfolgreich in Serienprozessen umsetzen zu können, müssen jedoch weitere Grundlagenuntersuchungen durchgeführt und dann in Variationsmöglichkeiten in der Anlagentechnik umgesetzt werden.

Basis der Auslegung und damit des Bauteilgewichts sind die aus Belastungen berechneten Lastspannungen. Diese Lastspannungen werden mit einem Sicherheitsfaktor belegt und mit den Festigkeitswerten verglichen. Mit Hilfe von Festigkeitshypothesen werden komplexe Lastkollektive in Vergleichsspannungen umgerechnet.

Die Experten im Eisenwerk Brühl haben sichere Indizien, dass die heute verwendeten Festigkeits-hypothesen für den Werkstoff Gusseisen nicht zutreffend sind und nicht das gesamte Werkstoff-potential ausnutzen. Erste Ergebnisse dazu liegen vor und werden im Laufe des Jahres veröffentlicht. Ziel der genannten Bemühungen ist es, den Werkstoff Gusseisen noch näher an seinen Belastungsgrenzen auszulegen und damit weitere Gewichtseinsparungen zu erzielen. Dies kann aber nur erfolgreich sein, wenn die Fertigungsprozesse stabil und vorhersagbar sind.

Fertigungstechnik

Eine stabile Produktion benötigt kontinuierliche Fertigungsprozesse, die mindestens teilautomatisiert ablaufen müssen. Wichtige qualitätsbestimmende Kriterien des Gießprozesses sind:

- Rohstoffe und Schmelzverfahren,
- automatisiertes Gießen aus Druckvergießöfen,
- hohe Verfügbarkeit der vorhandenen Formanlagen,
- automatisierte Klebe-, Schraub- und Schlichte- und Montageprozesse in der Kernfertigung,
- automatisierte Putzprozesse.

Diese Aufzählung ist sicher nicht vollständig, kennzeichnet aber die wichtigen Gießereiprozesse.

Eine Nullfehlerphilosophie ist auch für Gießer das Ziel, für einen Rohteilhersteller allerdings nicht zu erreichen. Neben stabilen Prozessen sind hierzu insbesondere intelligente Überwachungsprozesse notwendig, die in einen Regelalgorithmus eingebettet, permanent Soll-/Ist-Vergleiche vornehmen. Dies ist bei den wichtigen Gießereiprozessen und in der Überwachung implementiert.

Fertigungsanforderungen

Aufgrund zukünftiger Designanforderungen und den zuvor diskutierten Trends sieht sich das Eisenwerk Brühl vor mannigfaltigen Herausforderungen in der Fertigungstechnik gestellt: Die Integration von Ausgleichswellen und Entlüftungskanälen macht die Fertigung kernintensiver und damit anfälliger für Gießfehler. Dem muss über eine optimierte Kernchemie und neue Entlüftungskonzepte entgegengewirkt werden. Aufgrund der zunehmenden Kernintensität muss auch dem Thema Geruchsbelästigung erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden, was ebenso Herausforderungen an die Entwicklung der Kernchemie stellt. Der komplexer werdende Kernaufbau ist in der Taktzeit an einer automatischen Formanlage nur zu realisieren, wenn Kerne entweder vormontiert oder komplett als Kernpaket in den Formkasten gesetzt werden. Das Kernpaketverfahren bietet die Möglichkeiten, die Toleranzen des Fertigteils weiter zu reduzieren und damit der Leichtbauforderung noch weitgehender gerecht zu werden. Höhere Bauteilbelastungen erfordern konstante, vorhersagbare Werkstoffeigenschaften, die nur mit stabilen Prozessen und geschlossenen Regelkreisen realisiert werden können. Weitere Qualitätsverbesserungen und kürzere Regelkreise bietet die Vor-/Weiterbearbeitung der gegossenen Rohteile in der Gießerei. Eine weitergehende Automatisierung ist sowohl aus Qualitäts- als auch aus Kostengründen zwingend erforderlich.

Zusammenfassung

Die Fahrzeugproduktion wird in den kommenden Jahren wachsen. Aufgrund der CO₂-Diskussion, insbesondere im niedrigen Hubraumbereich, wird sich der motorische Trend zum Downsizing weiter fortsetzen, was zu zunehmenden thermischen und mechanischen Belastungen des Zylinderkurbelgehäuses führt. Zunehmende Hybridisierung und die Begrenzung des vorhandenen Bauraums zwingt die Konstrukteure zu einer kompakteren Bauweise.

Diese Trends begünstigen die Entscheidung zur Verwendung von Gusseisen für Zylinderkurbelgehäuse. Das Gewicht des Zylinderkurbelgehäuses wird mit konsequentem Leichtbau weiter reduziert. Ein verbessertes Verständnis des Werkstoffverhaltens und die Optimierung der Fertigungsprozesse führen zwangsläufig zu reduzierten Sicherheitsfaktoren und damit zu weiteren Gewichtsreduzierungen.

Die Diskussion zur CO₂-Reduzierung wird erneut sowohl die Anbieter der Aluminiumwerkstoffe als auch die der Gusseisenwerkstoffe fordern. Derjenige, der den Forderungen der OEMs am weitestgehenden gerecht wird, und den Spagat zwischen Kosten, technischen Herausforderungen und gesetzlichen Regularien bestmöglich realisiert, wird die Entwicklung bei den zukünftigen Motoren bestimmen. Gusseisen ist dafür gut gerüstet.

Dr.-Ing. Rolf Weber und Dipl.-Ing. Wim Görtz, Eisenwerk Brühl GmbH, Brühl

Literatur:

[1] Polk, R. L.: Die Light Vehicle-Produktion. Marketing Systems, ProCar World, April 2008.

[2] Fritsche, E.: Vergleich der Energieeffizienz und CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Zylinderkurbelgehäusen aus Gusseisen oder aus Aluminiumlegierungen Giesserei-Rundschau 56 (2009) Heft 9/10.

www.eb-bruehl.com