

Downsizing bei Motorblöcken: ein Smart-Diesel vor einem V8 für die Porschemodelle Panamera sowie Cayenne.

Trends bei Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen

Die Klimadiskussion hat einen regelrechten „Hype“ bezüglich elektrischer oder zumindest hybrider Antriebstechnologien ausgelöst. So hat auf den vergangenen Automobilausstellungen nahezu jeder Fahrzeughersteller Elektro- oder Hybridfahrzeuge ausgestellt. Mitarbeiter eines Unternehmens, welches Komponenten rund um den Verbrennungsmotor produziert, werden häufig gefragt, wie lange denn der Verbrennungsmotor eigentlich noch existiert? Steht derzeit tatsächlich die letzte Evolutionsstufe des Verbrennungsmotors bevor und gibt es dann nur noch Elektrofahrzeuge?

VON STEPHAN BEER, NECKARSULM

Trends in der Antriebstechnologie

Elektroautos verfügen noch nicht über den nötigen Entwicklungsstand, um Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren abzulösen, die Antwort lautet daher Nein. Die Politik wird die Entwicklungsgeschwindigkeit aber deutlich erhöhen. So hat die Bundesregierung auf dem Elektromobilitätsgipfel im Mai 2010 Arbeitsgruppen zur Erforschung der Elektromobilität gegründet und auf die zugesagte Forschungsförderung von 500 Mio. Euro aus dem Konjunkturpaket verwiesen. Allerdings gibt es in Deutschland vorerst keine Kaufanreize für Elektroautos. „Auch

wenn es andere Länder tun, wir werden die Nachfrage nach Elektroautos nicht künstlich stimulieren“, betonte Bundeswirtschaftsminister Rainer Brüderle. Ziel solle es sein, Deutschland zum globalen Leitanbieter für Elektromobilität und nicht zum Leitmarkt zu machen. „Es ist wichtiger, dass weltweit 10 Mio. deutsche Elektrofahrzeuge auf die Straßen kommen als 1 Millionen Elektroautos in Deutschland“, so Henning Kagermann, Vorsitzender der „Nationalen Plattform Elektromobilität“. Ein Forschungsschwerpunkt liegt darin, die Batteriekosten von über 10 000 Euro pro Fahrzeug deutlich zu senken.

„Bei der Elektromobilität wird derjenige die Nase vorn haben, der die besten Batterien anbietet“, bekräftigte der Leiter der Außenbeziehungen von Nissan International, Dr. Carsten Rei-

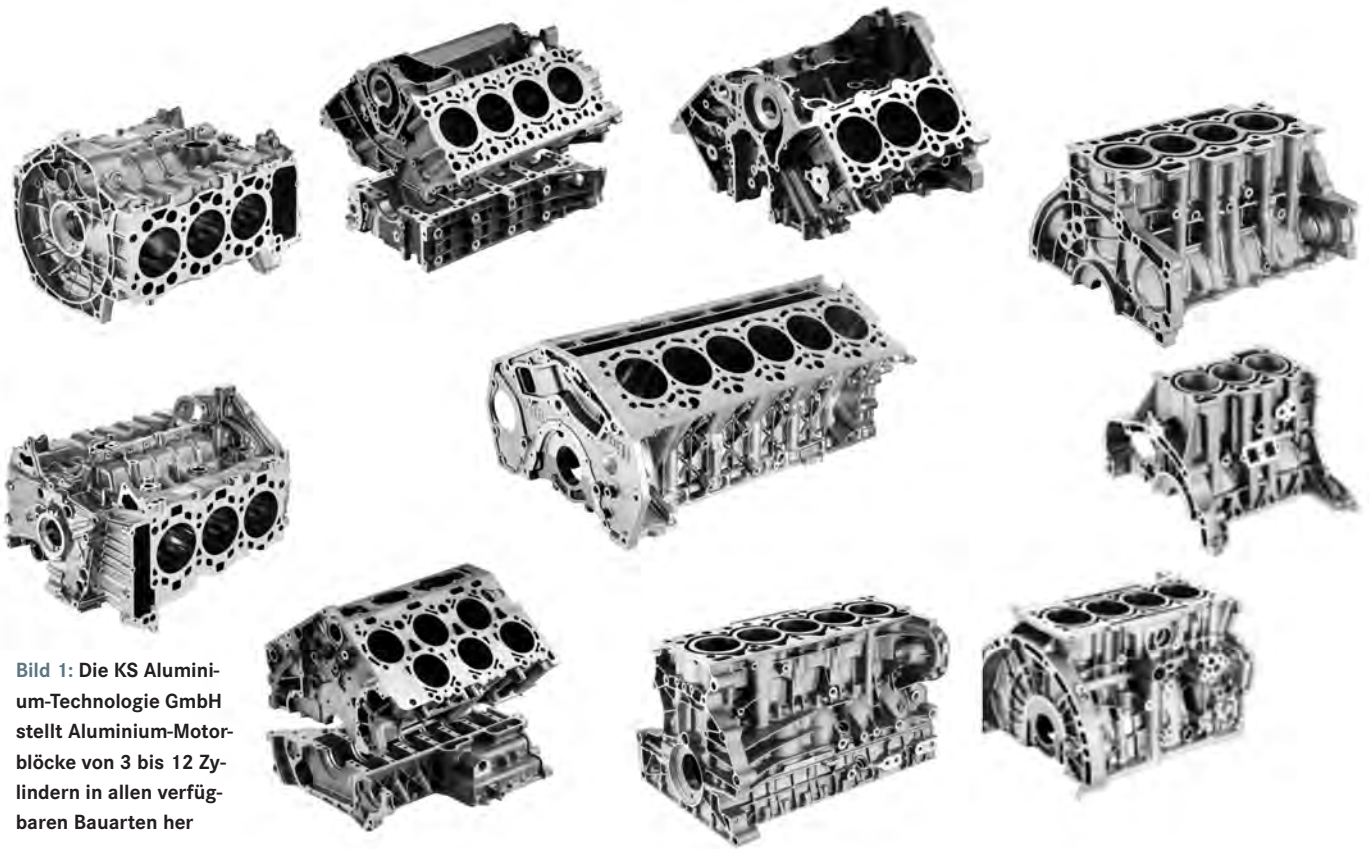


Bild 1: Die KS Aluminium-Technologie GmbH stellt Aluminium-Motorblöcke von 3 bis 12 Zylindern in allen verfügbaren Bauarten her

mann, auf der Automesse Leipzig. Renault-Nissan z. B. plant „eine Jahresproduktion von über 500 000 Li-Ionen-Akkus“ sowie die Großserienfertigung von bezahlbaren Elektroautos ab 2011. Von anderen OEMs wie Toyota und Daimler, die beide Hybrid-Fahrzeuge in Serie herstellen, kommen zurückhaltendere Töne. Auch Franz Fehrenbach von Bosch sieht das Elektrofahrzeug eher als eine mittelfristige Lösung: „Der schnellste Hebel zu einer CO₂-Reduzierung ist die Optimierung des Verbrennungsmotors, nicht das Elektrofahrzeug“. Kurzfristig seien beim Verbrennungsmotor Emissionsreduzierungen von bis zu 30 % durch innermotorische Maßnahmen möglich.

Trotz der erzielten Fortschritte bestehen bei Elektroantrieben weiterhin Probleme, die bisher nur zum Teil gelöst wurden. Die Kosten sind noch zu hoch, die Reichweiten zu gering, die Ladezeiten für die Batterien zu lang, und die Sicherheit ist zumindest bei Lithium-Ionen-Batterien umstritten. Für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien sind zudem die Metalle der Seltenen Erden erforderlich. Hier verfügt China über eine weltweite Monopolstellung, die schon heute ein großes Hindernis für die Herstellung von Hybridfahrzeugen darstellt. Weiterhin ist die erforderliche regenerative Stromerzeugung in großem Umfang mittels Wind, Sonne, Wasser oder anderer Energiequellen eine beachtliche Herausforderung, während die Nutzung der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb noch in weiter Ferne zu liegen scheint.

Nach der Einschätzung der KS Aluminium-Technologie GmbH, Neckarsulm, die Aluminium-Motorblöcke von 3 bis 12 Zylindern in allen verfügbaren Bauarten herstellt (**Bild 1**), werden die klassischen Verbrennungsmotoren Otto und Diesel daher in den nächsten 15 bis 20 Jahren noch die dominierenden Konzepte sein, auch wenn alternative Antriebe in verschiedenen Varianten entwickelt werden. Dabei kommt der Elektrifizierung in unterschiedlichem Ausmaß eine wesentliche Bedeutung zu. Bei einer Vielzahl alternativer Kraftstoffe ist von einer steigenden Vielfalt an Antriebsvarianten auszugehen. Bei überwiegend urbanem Einsatz werden bereits in wenigen Jahren Elektroantriebe an Be-

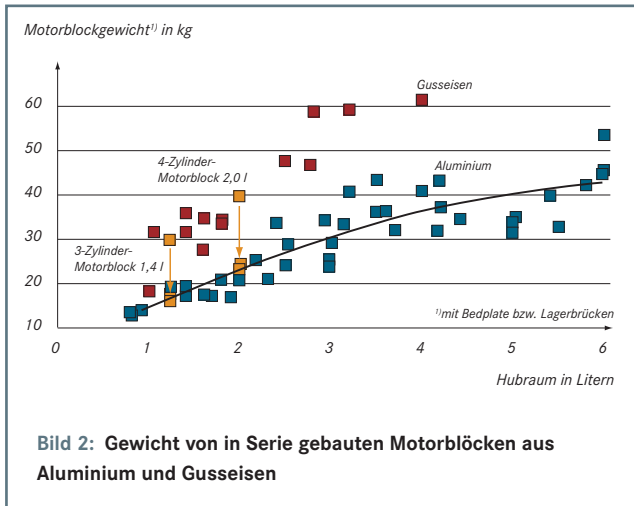
deutung gewinnen. Die verschiedenen hybriden Antriebe (z. B. Parallel, Mild, Power Split) kommen für gemischte Einsatzgebiete in Frage, während bei überwiegendem Langstreckenbetrieb der Verbrennungsmotor zumindest als sogenannter Range-Extender, zur Erhöhung der Reichweite noch lange Zeit ohne wirtschaftliche Alternative sein wird.

Nachdem die größte weltweite Nachkriegskrise überstanden scheint, ist für die folgenden Jahre mittelfristig wieder von einem weltweit wachsenden Markt für Personen- und Lastkraftwagen und damit auch für Zylinderkurbelgehäuse auszugehen. Das Wachstum wird sich allerdings im Wesentlichen auf die Brics-Länder (Brasilien, Russland, Indien und China) konzentrieren. Dabei werden weltweit zunehmend einheitliche Lösungen mit Varianten entwickelt, die an die speziellen Marktbedingungen angepasst sind.

Ohne weitreichenden Leichtbau, „Downsizing“ der Motoren sowie einer gewissen Elektrifizierung des Antriebs können die immer strenger werdenden Umweltziele kaum erreicht werden. Neben dem ganzheitlichen Ansatz, der eine Reduktion des Fahrzeuggewichts sowie der Luft- und Rollwiderstände ohne Abstriche bei der Sicherheitsausstattung und im Fahrkomfort vorsieht, steht dabei besonders die Entwicklung moderner Antriebsstränge im Fokus.

Anforderungen an das Zylinderkurbelgehäuse

Mit Downsizing sind einerseits sich verringernde Hubräume sowie reduzierte Zylinderzahlen gemeint, andererseits jedoch deutlich steigende spezifische Leistungen und Zünddrücke zwecks Leistungskompensation. Dies bewirkt eine evolutionäre Weiterentwicklung des Designs der Zylinderkurbelgehäuse sowie einen weiteren Anstieg der thermomechanischen Bauteilbeanspruchung, von dem neben Kolben, Pleuel und Zylinderkopf insbesondere das Zylinderkurbelgehäuse als zentrale Komponente betroffen ist. Weitere Folgen des Downsizing bzw. der daraus fol-



genden Kraftstoffverbrauchs- und Abgasemissionsreduzierung, die einen Einfluss auf die Zylinderlaufflächen haben, sind die Benzindirekteinspritzung mit unvermeidlicher teilweiser Benetzung der Lauffläche, aber auch Hochdrehzahlkonzepte mit hohen Kolbengeschwindigkeiten, neue Kraftstoffe wie SunFuel, GTL (Gas to Liquid), BTL (Biomass to Liquid) und Ethanol, neue Brennverfahren wie HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), CAI (Controlled Auto-Ignition) und Diesotto sowie eine weitere Reduzierung des Ölverbrauchs durch eine noch bessere Abstreifwirkung der Kolbenringe und Motoröle mit Leichtlaufeigenschaften. Die Entwicklungsaktivitäten fokussieren sich auf effiziente, hubraumreduzierte, leichte, direkt einspritzende sowie aufgeladene Verbrennungsmotoren. Mit letzterem sind Motoren gemeint, bei denen die Leistung durch Zuführen von Luft mit erhöhtem Druck gesteigert wird. Wichtig ist es darüber hinaus, kostengünstige Fahrzeuge zu entwickeln. Derzeit befinden sich aufgeladene 3- und 4-Zylinder und auch schon 2-Zylinder-Motoren in der Entwicklungsphase.

Werkstoffwahl für das Zylinderkurbelgehäuse

Die Notwendigkeit für umfassenden Leichtbau gibt der Werkstoffwahl für das Zylinderkurbelgehäuse neue Impulse, wobei besonders leichte und kostengünstige Lösungen im Vordergrund stehen. Die Zylinderkurbelgehäuse befinden sich auch zukünftig im Wettstreit zwischen Werkstoff, Gießverfahren und Lauffläche. Gusseisenlösungen dominieren insbesondere, wenn die erste Priorität auf den Kosten liegt. Steigende Belastungen werden mit der gesamten vorliegenden Werkstoffpalette der Gusseisenarten abgedeckt, die sich von Gusseisen mit Lamellengraphit bis hin zu Gusseisen mit Vermiculargraphit erstreckt.

Aluminiumkonzepte werden hauptsächlich dann bevorzugt, wenn die Forderung nach Leichtbau an erster Stelle steht. Auch bei kleinen Motoren ist ein Gewichtsvorteil von 30 bis 50 % gegenüber Gusseisen zu erwarten (Bild 2). Hinzu kommen sekundäre Gewichtsreduzierungen in ähnlicher Größenordnung aus z. B. potentiell leichter zu gestaltenden Motoraufhängungen, Fahrwerkskomponenten und Bremsen. Dies führt neben Kraftstoffverbrauchs- und CO₂-Emissionsreduzierung zu einer verbesserten Fahrdynamik infolge gleichmäßigerer Achslastverteilung.

Der Werkstoff Magnesium wird angesichts der steigenden Belastung von Motoren infolge seiner unzureichenden Warmfestigkeitseigenschaften in Verbindung mit einem geringen Elastizitätsmodul zukünftig wohl nicht in Betracht gezogen. Andere zwischenzeitlich diskutierte Werkstoffe wie Keramiken oder Hochtemperaturkunststoffe stehen aktuell nicht zur Debatte.

Die Marktanteile von Aluminiumkonzepten unterscheiden sich weltweit deutlich voneinander. So gibt es in den USA trotz eines äußerst geringen Dieselannteils noch relativ viele Motorblöcke aus Gusseisen mit Lamellengraphit. Dies wird sich in den nächsten Jahren allerdings deutlich zugunsten des Aluminiums verändern. Eine ähnliche Entwicklung ist in China und Indien zu erwarten. Japan weist bereits eine sehr hohe Aluminium-Marktdurchdringung auf. In Europa war nach stark steigendem Aluminium-Marktanteil in den vergangenen Jahren eine Konsolidierung festzustellen. Bedingt durch die aktuelle Forderung nach umfassendem Leichtbau liegt nach einer Rückbesinnung auf Gusseisen mit Lamellengraphit nun Aluminium als Werkstoff für Zylinderkurbelgehäuse wieder im Trend.

Gießverfahren für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse

Für die Herstellung von Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen kommen alle gängigen Gießverfahren in Frage. Sie werden in Sand oder in Stahlkokillen mit unterschiedlichen Anteilen an Sandkernen geformt. Beim Formfüllen wird zwischen Schwerkraft-, Niederdruck- und Hochdruckgießverfahren unterschieden. Jedes Verfahren hat unter gewissen Rahmenbedingungen seine Daseinsberechtigung mit den jeweiligen charakteristischen Vor- und Nachteilen. Allerdings führen die genannten motorentechnischen Trends zu einer Verschiebung der jeweiligen Marktanteile der Gießverfahren. Ebenso entwickeln sich die Gießverfahren zum Teil beachtlich weiter.

Ein für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse relevantes Gießverfahren ist das insbesondere in den USA zum Einsatz kommende Lost-Foam-Verfahren, das seine Vorzüge in der nahezu unbegrenzten gestalterischen Freiheit hat, eine komplexe Geometrie abzubilden. So wird dieses Gießverfahren z. B. für den Motorblock mit integriertem, wassergekühltem Abgaskammer eines Außenbordmotors verwendet. Da allerdings die Gussqualität durch einen recht hohen Gasgehalt und Porositätsgrad gekennzeichnet ist, wird dieses Verfahren für neue Motorenentwicklungen, abgesehen von wenigen Nischenanwendungen, nicht mehr in Frage zu kommen.

Die Sandgießverfahren differenzieren sich in bentonitgebundene (feuchter Sand) sowie kunstharzgebundene (trockener Sand) und zeichnen sich durch eine hohe Gestaltungsfreiheit aus. Die bentonitgebundenen Sandgießverfahren haben sich aufgrund ihrer bescheidenen Gussqualität infolge des hohen Wasseranteils im Formstoff bis heute nicht für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse durchgesetzt. Auch für die nächsten Jahre ist keine Trendumkehr zu erkennen.

Die Gießverfahren mit kunstharzgebundenen Sanden sind auch als Kernpaketverfahren (CPS) bekannt und haben sich in den vergangenen Jahren enorm weiterentwickelt. An Formfüllmethoden kommen Schwerkraft- und Niederdruckgießverfahren zum Einsatz. Neben der hohen Gestaltungsfreiheit lassen sich durch Verwendung von Kühlleisen in den Lagerstuhlbereichen die lokalen Festigkeiten zumindest oberflächennah auf das Niveau von Kokillengießverfahren erhöhen. Kühlleisen in den Laufflächenbereichen ermöglichen die Herstellung von beschichtungsfähigen Motorblöcken. Vor allem bei hohen Stückzahlen ist das Kernpaketverfahren begehrt, in Europa zunehmend für Diesel-Zylinderkurbelgehäuse.

Bei den Gießverfahren mit permanenter Form wird zwischen Schwerkraft-, Niederdruck- und Druckgießen unterschieden. Das Schwerkraft-Kokillengießen wird bei Zylinderkurbelgehäusen nahezu überhaupt nicht angewendet. Durch die deutlich steigenden thermodynamischen Festigkeitsanforderungen ist dieses Gießverfahren allerdings durchaus interessant, weil die Lagerstühle während des Erstarrungsvorganges aktiv mit Wasser ge-

kühlt werden können. Vor allem in Verbindung mit der Verwendung mehrerer eingegossener Sandkerne, Semi Permanent Mould (SPM), kann das Schwerkraft-Kokillengießen für Motorenentwicklungen durchaus in Betracht gezogen werden.

Das Niederdruck-Kokillengießen ist insbesondere in Verbindung mit der übereutektischen Aluminium-Siliciumlegierung zurzeit in Europa eine weit verbreitete Lösung für großvolumige Motoren mit vielen Zylindern. Übereutektische Zylinderkurbelgehäuse brauchen keine weitere Laufflächenbewehrung wie eine Beschichtung oder eingesetzte bzw. eingegossene Lauffbuchsen und haben daher ein exzellentes motorentechnisches Verhalten bei Wärmeabfuhr und Verzug. Beim Niederdruck-Kokillengießen werden auch untereutektische Legierungen vergossen, wobei die Zylinderlaufflächen beschichtet werden können. Ähnlich wie beim Schwerkraft-Kokillengießen erfolgt beim Niederdruck-Kokillengießen die Darstellung von Hinterschnitten durch Sandkerne. Bei der Wahl des Anschnittsystems über das Zylinderdeck lassen sich wassergekühlte Kokillen im Lagerstuhlbereich einsetzen und somit höchste Lagerstuhlfestigkeiten einstellen.

Das Druckgießen galt bis vor einigen Jahren als kostengünstiges, aber von minderer Gussqualität geprägtes Gießverfahren. Dies hat sich in den vergangenen Jahren gravierend verändert. Das moderne Druckgießen kann einen porenarmen Guss hervorbringen, der sowohl lösungsgeglüht als auch in der Lauffläche beschichtet werden kann. Dazu sind z. B. eine Schmelzebehandlung, die Optimierung der Schmelzezufuhr, eine aktive Formkühlung, ein effektives Vakuumsystem, optimierte Sprühtechnik mit angepasstem Trennmittel sowie die Verwendung einer echtzeitgeregelten Druckgießmaschine mit hoher Schließkraft zu empfehlen. Bei geeignetem Motorblockdesign sowie entsprechender Jahresstückzahl geschieht dies auch weiterhin deutlich kostengünstiger als mit anderen Gießverfahren. Unter gewissen Rahmenbedingungen ist bei enger Einbindung der Produktentwicklung in der Gießprozessentwicklung ein Closed-Deck-Design zu realisieren, also eine weitgehend geschlossene Kurbelgehäusedeckplatte im Bereich um die Zylinder herum. Die heutige Druckgusstechnologie ist somit auch für hoch belastete Zylinderkurbelgehäuse geeignet.

Welcher Gießprozess für welche Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse?

Es sind mehrere Kriterien zu bewerten, um die Frage nach dem am besten geeigneten Gießverfahren zu beantworten (Tabelle 1). Wesentliche Kriterien sind das Bauteildesign, die Stückzahl, die Kundenanforderungen (insbesondere Gussqualität und Festigkeiten), die Zylinderlaufflächentechnologie und natürlich die Kosten.

Für V-Motoren wird vorzugsweise bei hoher Jahresstückzahl und Open-Deck-Bauweise, mit nach oben offenem den Zylinder umfassenden Kühlwassermantel, das Druckgießverfahren gewählt. Für V-Motoren in Closed-Deck Bauweise eignet sich auch das Kernpaketverfahren. Bei kleineren Stückzahlen und Closed-Deck-Bauweise kommen das Niederdruck-Kokillengieß- oder das Kernpaketverfahren zum Einsatz.

Bei kostengünstigen Reihenmotoren in Open-Deck-Bauweise und hoher Jahresstückzahl spielt die Druckgießtechnologie ihre Vorzüge aus. Muss bei einer Motorenfamilie die Topmotorisierung mit einem Closed-Deck ausgestattet werden, so ist dies kostengünstig unter Beachtung gewisser Randbedingungen ebenfalls im Druckgießverfahren möglich. Weist das Bauteil neben dem Closed-Deck-Design noch weitere Hinterschnitte auf, die durch Sandkerne abgebildet werden, so wird das Kokillengieß- (Schwerkraft, Niederdruck) oder das Kernpaketverfahren gewählt.

Ein beschichtungsfähiges Hochleistungs-Reihen-Zylinderkurbelgehäuse im Closed-Deck-Design mit höchsten Lagerstuhlfestigkeiten lässt sich mit dem Kernpaket- oder dem Kokillengießverfahren abbilden, immer das entsprechende Bauteildesign vorausgesetzt. Bei geeignetem Anschnittsystem über das Zylinderdeck lassen sich aktiv wassergekühlte Kokillen oder Kühlleisen im Lagerstuhlbereich einsetzen und somit höchste Lagerstuhlfestigkeiten einstellen. Die Verwendung von mehreren Kavitäten in der Gießform erschließt ein beachtliches Kostenpotential.

Fazit

In den nächsten 15 bis 20 Jahren wird der Verbrennungsmotor der dominierende Antrieb unserer individuellen Mobilität bleiben. Aus Gründen der Gewichtsreduktion sowie der Kosten werden sowohl Gusseisen als auch Aluminium die bevorzugten Werkstoffe bleiben. Während für Gusseisen ausschließlich das Sandgießverfahren in Frage kommt, lassen sich Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse in mehreren Verfahren darstellen. Die eingesetzten Verfahren sind derzeit das Druckgieß-, Niederdruckkokillengieß- sowie das Kernpaketverfahren. Das Druckgießen wird seine bereits führende Position weltweit gesehen noch weiter ausbauen. Interessant wird die Entwicklung der Marktanteile des Sandgieß- und Kokillengießverfahrens sein, da sie insbesondere für sehr stark belastete Closed-Deck-Motoren eingesetzt werden können und in diesem Marktsegment miteinander konkurrieren. Die Herstellung von Zylinderkurbelgehäusen mit dem Lost-Foam-Verfahren wird voraussichtlich verschwinden.

Dr.-Ing. Stephan Beer, Senior Manager Engineering Support, KS Aluminium-Technologie GmbH, Neckarsulm

| Tabelle 1: Bewertungskriterien von Gießverfahren für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse | | | | | |
|--|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Bewertungskriterien | Niederdruckgießen | Schwerkraftgießen | Druckgießen | Kernpaket (CPN) | Lost-Foam |
| Dynamische Lagerstuhlfestigkeit | ++ | ++ (V-Block kritisch) | + | ++ (Kühlleisen) | - |
| Laufflächenbeschichtung | ++ | ++ | + | +(Kühlleisen) | - |
| Design-Variabilität | + | +(SPM) | 0 (Closed-Deck) | ++ | ++ |
| Übereutektische Legierung | ++ | 0 | - | - | - |
| Mögliche Motorenleistung | ++ | ++ | + | ++ | - |
| Produktions-Volumina | - | + | ++ | ++ | ++ |
| Herstellkosten | - ... + | 0 ... + | + ... + | - ... + | + |

-- extremer Nachteil - Nachteil 0 neutral + Vorteil ++ großer Vorteil