

Stahlkolben für Pkw-Dieselmotoren

Einspritzdrücke über 2000 bar, Mitteldrücke bis 31 bar, Spitzendrücke im Bereich über 200 bar sowie spezifische Leistungen bis 100 kW pro Liter und stetig geringere Abgas-Emissionen – so lauten die Anforderungen an moderne Pkw-Dieselmotoren.

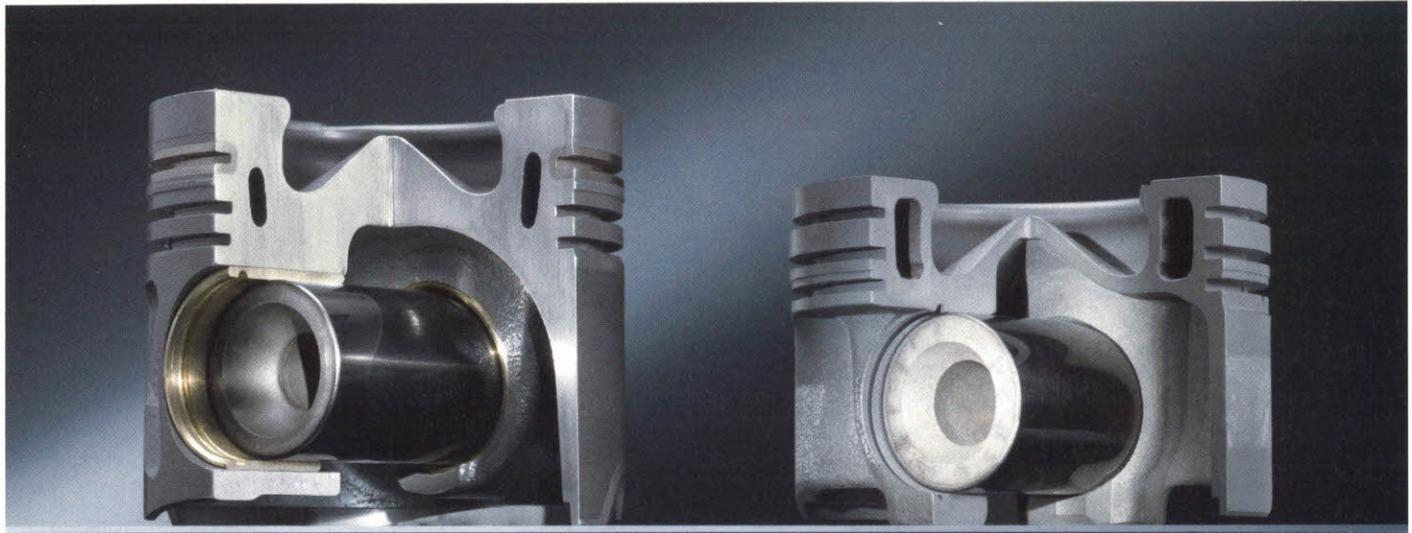


Bild 1 Mercedes macht als erster Pkw-Hersteller im V6-Diesel des E 350 den Schritt vom Alu-Kolben (links) zum kompakteren Stahlkolben

Bilder: Mercedes-Benz, Mahle, Scholz

Aktuelle Hauptanforderung bei der Konzeption moderner Pkw-Motoren ist die Einhaltung der vom Gesetzgeber vorgegebenen Emissionsgrenzen. So gilt ab 2015 der durchschnittliche Grenzwert von 130 g CO₂ pro Kilometer. Ab 2021 müssen alle Automobilbauer für den Flottenverbrauch den Grenzwert von 95 g CO₂ pro km vollständig einhalten. Der ist direkt mit dem Kraftstoffverbrauch verknüpft, und ein Überschreiten der CO₂-Grenzwerte wird mit Bußgeldern belegt.

Eine wirksame motorische Maßnahme, um den Verbrauch zu reduzieren, ist es, den Mitteldruck zu erhöhen. Dies eröffnet die Möglichkeit, das Hubvolumen bei gleichbleibender effektiver Leistung zu vermindern. Bei diesem Downsizing wird durch Verkleinerung des Motors zugleich die Reibleistung verringert. Downsizing, höhere Mitteldrücke, Ladeluftkühlung und eine Optimierung des Ladungswechsels bewirken steigende spezifische Leistungen, wobei Spitzendrücke zunehmen können. Die Triebwerksteile – insbesondere die Pleuellager – werden als Folge stärker

thermisch und mechanisch belastet (**Bild 2 und 3**).

Die wesentliche thermomechanische Belastung entsteht aus dem zyklischen Wechsel von Vollast zu Teillast oder Leerlauf. Bei Vollast entsteht aufgrund der ungleichmäßigen Temperaturverteilung am Pleuellagerboden eine starke Dehnungsbehinderung des Muldenrands, was Spannungen erzeugt. Dadurch können an Stellen hoher Druckspannung nachfolgend hohe Zugspannungen entstehen. Abhängig von der Temperatur und der Struktur des Pleuellagers lassen sich die Stellen höchster thermomechanischer Belastung sowohl am Muldenrand als auch an der Pleuellagerwand und im Muldengrund ausmachen. Bei der Entwicklung von Pleuellagern müssen also die Betriebsbedingungen des jeweiligen Motors einfließen.

Serienanwendungen streben für sportliche Dieselmotoren 100 kW/l an. Und hier kommen Pleuellager ins Spiel. Sie zeichnen sich nicht nur durch ihre höhere Festigkeit aus – sie spielen ihre Vorteile im Vergleich zum Aluminiumpleuellager durch ihre Auswir-

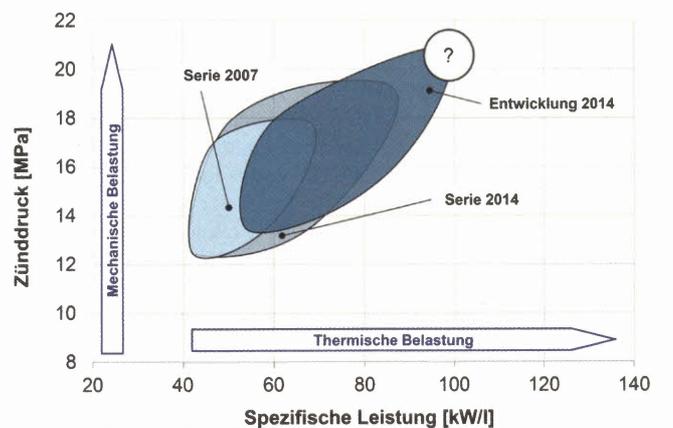


Bild 2 Zünddrücke und Leistungsdichten von Pkw-Dieselanwendungen

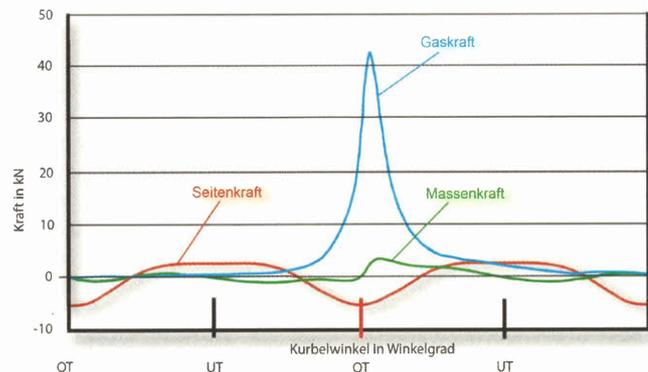


Bild 3 Verlauf der Kräfte am Pleuellager über dem Pleuellagerwinkel

Prüfungsaufgaben

- 1 Nennen Sie den entscheidenden Vorteil von Alu-Kolben.
- 2 Nennen Sie die entscheidenden Nachteile von Alu-Kolben.
- 3 Nennen Sie die entscheidenden Vorteile von Stahlkolben.
- 4 Durch welche Maßnahme kann man die Festigkeit von Alu-Kolben erhöhen?

kung auf einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch aus. Damit kommen Stahlkolben auch für niedriger beanspruchte Motoren in Betracht.

Aluminium- und Stahlkolben bestehen nicht aus dem reinen Grundstoff, sondern besitzen Legierungsbestandteile, die gezielt Eigenschaften hervorbringen. Alu-Kolben sind Al-Si-Legierungen und besitzen Anteile von Magnesium, Mangan und Kupfer. Stahlkolben bestehen aus Vergütungsstahl nach DIN EN 100 83 und beinhalten neben dem obligatorischen Kohlenstoff Anteile von Silizium, Mangan, Phosphor, Schwefel, Chrom, Molybdän und Nickel.

Aluminiumkolben

Kolben aus Aluminium werden im Gießverfahren hergestellt und bieten zunächst eine kostengünstige Herstellungsvariante zum Stahlkolben. Stahlkolben mit der Mahle-Bezeichnung TopWeld weisen darauf hin, dass er aus zwei Teilen zusammengeschnitten wurde.

Der Kostenunterschied relativiert sich jedoch, wenn am Alu-Kolben tiefgreifende Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung notwendig werden. Dessen herausragender Vorteil ist seine Wärmeleitfähigkeit, die drei- bis viermal besser ist als die des Stahlkolbens. Wärme ist das Problem Nummer eins, das von den Bauteilen rund um den Verbrennungsraum bewältigt werden muss. Beim Alu-Kolben wird daher relativ zügig die bei der Verbrennung anfallende Wärme verteilt und primär über das Kühlöl sowie die Kolbenringe zum Kolbenschaft und der Zylinderwand und von dort in das Kühlwasser abgeführt. Dieser entscheidende Vorteil wird jedoch wieder geschmälert, wenn man die Wärme-dehnung (Ausdehnungskoeffizient) des Alu-Kolbens betrachtet

(Bild 4). Sie ist das Kriterium und entscheidend dafür, dass sich der Kolben nicht an der Zylinderwand festfrisst und das Spiel bei hohen Temperaturen nicht verschwindet. Bild 4 zeigt, wie sich der Kolben bei 130 °C in einem Zylinder (Gusseisen) ausdehnen würde. Rechnerisch ergibt sich dann eine Überdeckung (negatives Spiel) von 0,1 mm. Die einzelnen Ausdehnungsbereiche in Mikrometern sind jeweils rechts vom Kolben eingezeichnet. Eine starke Reibung ist natürlich von Nachteil.

Der Stahlkolben dagegen punktet noch mit einem freien Spiel von 0,01 mm. Erklärbar ist das durch den ähnlichen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und Gusseisen. Käme hingegen ein Alu-Kurbelgehäuse zur Anwendung, wäre der Reibleistungsvorteil durch einen Stahlkolben fraglich. Rechnerisch ergibt sich dann kaum eine Überdeckung zwischen Alu-Kolben und einem Kurbelgehäuse im gleichen Material.

Nachteilig wirkt sich bei Alu-Kolben eine Temperatur über 300 °C aus. Hier reagiert der Werkstoff mit drastischem Festigkeitsabfall. Damit fällt der Gestaltung des Kühlkanals mit Füllgrad und Öldurchsatz eine wichtige Aufgabe zu. Neben der Gestaltung des Kühlkanals ist die Form des Muldenrandes ein Kriterium zur Senkung der Temperatur (Bild 5).

Mit einer Gefügeverfeinerung beim Gießprozess wird heute versucht, dem Festigkeitsabfall am Muldenrand entgegenzuwirken. Gleichzeitig werden örtliche Faserverstärkungen auf der Basis von Aluminiumoxid an der Kolbenmulde eingebettet, um Zünddrücke über 200 bar zu ermöglichen (Bild 6).

Stahlkolben

Stahlkolben können aufgrund ihrer höheren Steifigkeit und Festigkeit mit einer kleineren Kolbenhöhe und Ringzwischenräumen ausgelegt werden (Bild 7 und 8). Mit kleineren Kolbenhöhen werden bei längeren Pleuelstangen die Seitenkräfte kleiner (Bild 9). Seitenkräfte sind für die Reibung und den Verschleiß verantwortlich, wenn der Kolben die Anlegeseite wechselt. NVH-Probleme (Noise Vibrations Harshness) sind vermeidbare Konstruktions-

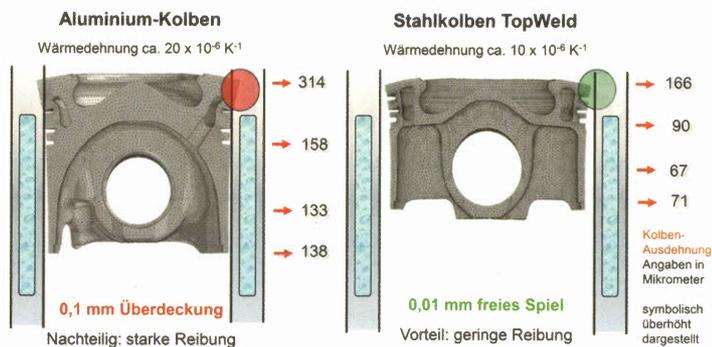


Bild 4 Vergleich der Kolben

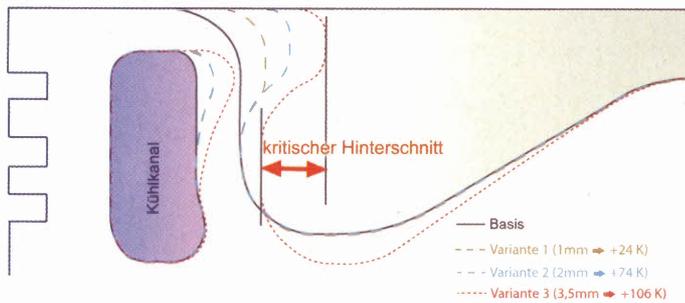


Bild 5 Einfluss von Hinterschnitten in den Stufen 0 mm (ohne), 1 mm, 2 mm und 3,5 mm der Verbrennungsmulde auf die Temperaturänderungen am Muldenrand bei Stahlkolben

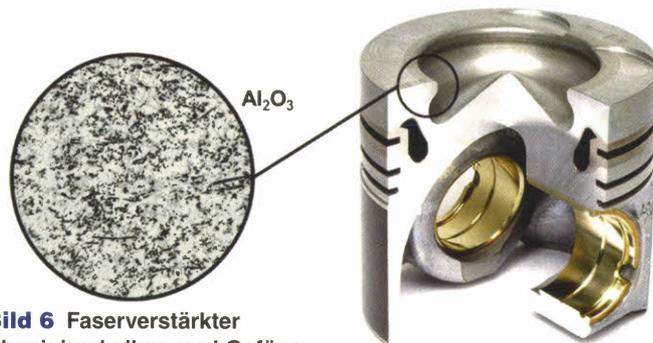


Bild 6 Faserverstärkter Aluminiumkolben und Gefüge am Muldenrand



Bild 7 Alu- und Stahlkolben ...

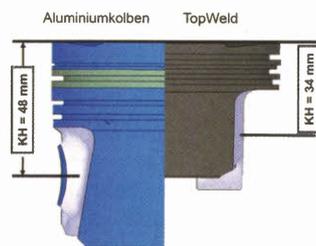


Bild 8 ... mit unterschiedlichen Kolbenhöhen

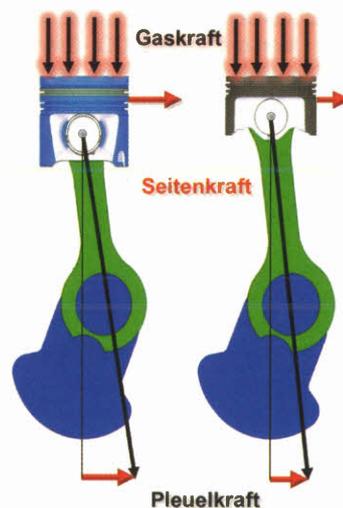


Bild 9 Längeres Pleuel beim Stahlkolben (rechts)

Technik-Info Begriffe

Wärmeleitfähigkeit

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit, auch Wärmeleitfähigkeit λ , ist eine Stoffeigenschaft zur Berechnung der Wärmestromdichte aus der Temperatur: Sie ist temperaturabhängig und hat die SI-Einheit Watt pro Meter und Kelvin. Praktisch gesehen ist die Wärmeleitfähigkeit die Wärmemenge (Ws), die in 1 s durch eine 1 m dicke Stoffschicht der Fläche 1 m² fließt, wenn der Temperaturunterschied 1 K beträgt. Die ungekürzte Einheit ist also Wattsekunde mal Meter pro Quadratmeter, Kelvin und Sekunde.

Die SI-Einheit gekürzt ist:

$$\frac{W}{(m \cdot K)} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Al} = \frac{235 \text{ W}}{(m \cdot K)}, \quad \text{Stahl (unlegiert)} = \frac{48 \dots 58 \text{ W}}{(m \cdot K)}$$

Ausdehnungskoeffizient

Der lineare Ausdehnungskoeffizient α gibt an, in welchem Maße die relative Verlängerung bei Körpern aus einem bestimmten Werkstoff mit der Temperatur zunimmt. Die Zahlenwerte des linearen Ausdehnungskoeffizienten für alle Stoffe sind sehr klein. Deshalb benutzt man die Zehnerpotenzschreibweise: $10^{-6} = 0,000001$.

Der Wert des linearen Ausdehnungskoeffizienten für Stahl beträgt etwa $12 \cdot 10^{-6} (= 0,000 012) \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (oder $\frac{1}{^\circ\text{C}}$) oder K^{-1} (in $\frac{1}{\text{Kelvin}}$). Der lineare Ausdehnungskoeffizient gibt an, um welchen Bruchteil sich der Körper bei der Erwärmung um 1 Grad ausdehnt. Am einfachsten stellt man sich einen Stab von 1 m Länge vor. Bei Erwärmung um 1 Grad wird er sich um eine Länge im Betrag von α ausdehnen. Wenn l_0 die ursprüngliche Länge bei der Anfangstemperatur t_0 ist, verlängert sich der Stab bei Erwärmung auf die Temperatur t um das Stück Δl . Hiernach erhält man die Gesamtlänge $l = l_0 + \Delta l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$

Bei größeren Temperaturunterschieden erweist es sich allerdings, dass die einfache lineare Beziehung nicht mehr genau ist, da die funktionellen Abhängigkeiten nicht mehr linear sind. In der technischen Praxis kann man aber dieses mathematische Problem ausgleichen, indem man mit einem mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten rechnet, der für ein bestimmtes, größeres Temperaturintervall definiert ist. Die aufgelisteten Zahlenwerte sind die mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten im Temperaturbereich 0–100 °C.

Linearer Ausdehnungskoeffizient α in 1/K

Stahl		$11\text{--}12 \cdot 10^{-6}$
Zink	Zn	29
Silicium	Si	4,2
Aluminium	Al	23
Magnesium	Mg	26,1
Chrom	Cr	6,3
Kupfer-Zink-Legierung	CuZn	18,5

Kavitation

Durch Schwingungen entstehen im Kühlwasser Dampfblasen, die plötzlich in sich wieder zusammenfallen (Implosion). Beim Implodieren der Hohlräume treten kurzzeitig extrem hohe Beschleunigungen, Temperaturen und Drücke auf, die das Material beschädigen können. Die Schädigung der Außenseite der Zylinderbuchse durch Auftreten von Kavitation im Kühlmittel ist als Folge der Schwingungsanregung durch den Kolben bei entsprechender Gestaltung von Zylinderbuchse und Kühlraum möglich und muss vermieden werden. Die kolbenseitige Anregung ist durch die Führung des Kolbens, das heißt Laufspielgestaltung und Schaftelastizität sowie die richtige Wahl der Kolbenbolzendesachsierung, beeinflussbar.

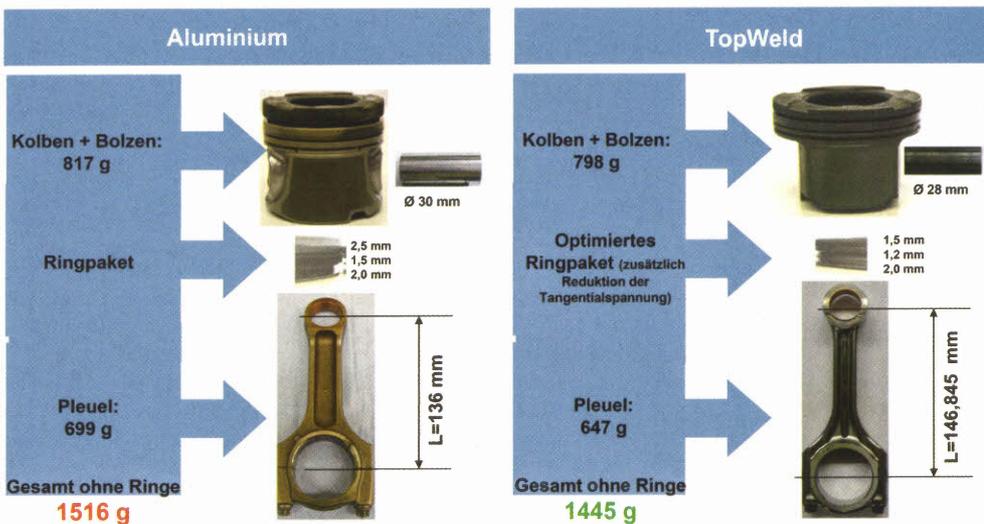


Bild 11 Kompletter Kurbeltrieb Pkw-Diesel im Vergleich

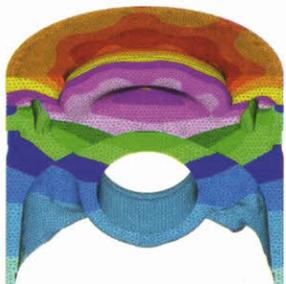


Bild 10 Thermische Belastungen bei wechselnden Betriebsbedingungen im Pleuel erzeugen Spannungen

vorgaben. Durch die Schwingungen gegen den Kühlmantel des Zylinders können sich auch Gefahren ergeben. Plötzlich auftretende Schwingungen beschwören die gefürchtete Kavitation herauf.

Im Umkehrschluss ist jedoch auch die Länge des Pleuels veränderbar, was einer verringerten Bauhöhe zugutekommt. Durch die reduzierte Kompressionshöhe des Pleuels in Verbindung mit einem kürzeren Pleuelbolzen können mit Stahl unter günstigen Bedingungen leichtere Pleuelbaugrup-

pen entwickelt werden. Allgemein wird vermutet, dass beim Wechsel vom Werkstoff Aluminium zum Stahl aufgrund der höheren Dichte von Stahl die Pleuel schwerer werden. Stahl bietet als hochfester Werkstoff jedoch die Möglichkeit, kompakter zu bauen. Mahle hat ein Beispiel erstellt (**Bild 11**), das eine Gewichtsreduktion von 71 g für den Stahlpleuel ausweist. Verringerte Pleuelreibung ist verbunden mit Kraftstoffverringern. Allein die höhere Festigkeit lässt höhere Zünddrücke über 200 bar zu, die insgesamt zu einer Einsparung

von 3–5 Prozent Kraftstoff führen kann.

Mit dem Nachteil der geringeren Wärmeleitfähigkeit werden Probleme bei der Ölkühlung aufgedeckt. Für Stahl gilt eine Temperaturgrenze ab etwa 550 °C, oberhalb derer sich eine Zunderschicht bilden kann, die den Werkstoff schwächt. Die Gefahr von Rissen kann nicht ignoriert werden. Die in **Bild 5** dargestellten Hinterschneidungen lassen die Temperaturen schneller ansteigen als bei Alu-Pleuel. Die geringere Geschwindigkeit beim Wärmetransport im Vergleich zum Alu-Pleuel wirkt sich auf den Ölkühlkanal aus. Kommen die Temperaturen in den Bereich von 350 °C, kann das Öl cracken (Kohlenstoffketten werden aufgebrochen) – isolierende Ölkohle entsteht, und das Kühlöl altert massiv. Lösungen, die dem Nachteil entgegenwirken, sind gefragt.

Ausblick: Stahlpleuel bewähren sich bei höchster Beanspruchung auch im Rennzirkus und zeigen für Serienanwendungen ein interessantes Kraftstoffeffizienzpotenzial. Damit stellt sich die Frage, ob Stahlpleuel in Zukunft nicht grundsätzlich die bessere Lösung für neue Motoren sein werden.

Manfred Scholz