

Der BMW 4-Zylinder Motor

Das erste Mitglied der neuen Ottomotoren-Generation

Dipl.-Ing. Klaus Borgmann

Dipl.-Ing. Reinhard Hofmann

Dipl.-Ing. Johannes Liebl

Dipl.-Ing. Theodor Melcher

1. Einleitung

Der Hubkolben-Verbrennungsmotor als Automobil-Antrieb hat inzwischen eine über hundertjährige Entwicklungsgeschichte hinter sich und hat einen hohen Reifegrad erlangt. Seit einigen Jahren ist eine Beschleunigung der technologischen Weiterentwicklung zu beobachten. Die Ursachen dafür sind die großen Fortschritte in Schlüsseltechnologien wie etwa der elektronischen Steuerung und Regelung, bei Werkstoffen, und die wachsenden Anforderungen aus Gesetzgebung und Kundenwünschen.

Neben großen Fortschritten im Leichtbau durch den wachsenden Einsatz von Aluminium, Magnesium und Kunststoff ist ein starker Trend zur Verbesserung der Motor-Eigenschaften durch Variabilitäten und neuartige Brennverfahren zu beobachten. BMW hat sich vor diesem Hintergrund vor ca. 3 Jahren entschieden, eine vollkommen neue Generation von Ottomotoren zu entwickeln.

2. Ziele

Die Hauptzielsetzung für die gesamte Motorenfamilie war der Ausbau der Dynamikführerschaft bei gleichzeitiger Verbesserung aller kundenrelevanten Eigenschaften, das heißt Dynamik, Verbrauch und NVH-Verhalten.

Eine weitere Zielsetzung war die Darstellung verbrauchssenkender Maßnahmen ab Ersteintritt der Motoren. Die Verbrauchssenkung musste dabei im Volumensegment erfolgen, das heißt nicht durch Darstellung von Nischenmodellen.

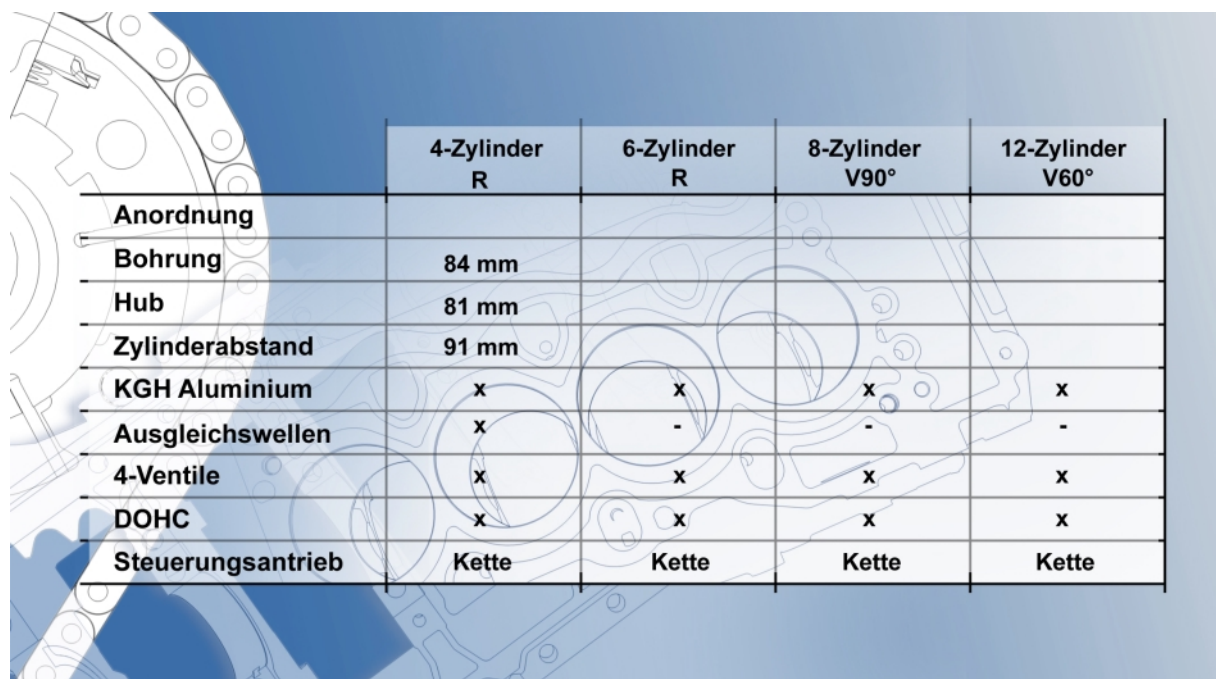
Das modulare Konzept als Zielsetzung war Voraussetzung für eine kurze Entwicklungszeit und Eignung der Motoren für verschiedene Fahrzeugkonzepte. Geringes Gewicht und hohes Weiterentwicklungspotenzial schließen die Liste der Zielsetzungen ab.

3. Konzeptauswahl

3.1. Grundmotor

Das Grundmotorkonzept ist ein modularer Baukasten für 4-, 6-, 8- und 12-Zylindermotoren.

Innerhalb dieses Baukastens wird eine große Anzahl von Gleichteilen verwendet. Damit können Erkenntnisse von einer Motorbaureihe auf die nächste übertragen und erhebliche Synergien im Entwicklungs- und Fertigungsprozess erzielt werden (Abb1).



	4-Zylinder R	6-Zylinder R	8-Zylinder V90°	12-Zylinder V60°
Anordnung				
Bohrung	84 mm			
Hub	81 mm			
Zylinderabstand	91 mm			
KGH Aluminium	x	x	x	x
Ausgleichswellen	x	-	-	-
4-Ventile	x	x	x	x
DOHC	x	x	x	x
Steuerungsantrieb	Kette	Kette	Kette	Kette

Abb.1 Grundmotormerkmale

Im Bereich der Grundmotoren wurden keine Kompromisse eingegangen. So ist der 6-Zylindermotor natürlich als Reihenmotor ausgelegt und die V-Motoren haben die „richtigen“ Bank-Winkel. Alle Motoren besitzen kettengetriebene Ventilsteuerungen. Desweiteren werden in dem Baukasten keine ungeraden Ventil- und Zylinderzahlen vorkommen.

Der 4-Zylindermotor ist für einen Hubraumbereich von 1,6 bis 2,0 ltr. ausgelegt und besitzt Ausgleichswellen. Das Kurbelgehäuse ist aus Leichtmetall und hat einen Zylinderabstand von 91mm. Der 4 Ventil-Zylinderkopf besitzt zwei obenliegende Nockenwellen.

Die Struktur des Grundmotors wurde so ausgelegt, dass spezifische Leistungswerte von größer 55 kW/l sicher darstellbar sind.

3.2. Zylinderkopf-Konzepte

Entscheidungsrelevant für die Festlegung des Zylinderkopfkongzeptes waren die damit darstellbaren spezifischen Leistungsdaten und die erzielbaren Verbrauchsvorteile. Zur Festlegung des Verbrauchskonzeptes wurden in der Konzeptphase Direkteinspritz-Brennverfahren, variable Ventilsteuerungen und Zylinderabschaltungen eingehend untersucht. Dieser ausführliche Vergleich führte zu folgendem Ergebnis (Abb.2):

	VALVETRONIC (Incl. Doppel-Vanos)	Otto-DI	Zylinderabschaltung
Verbrauch KV 01	++	++(+)	+
Abgasemission	+	--	0
Volllast	0	+	0
Weltweiter Einsatz (S-Gehalt Kraftstoff)	0	--	0
Komfort/Laufruhe	++	0	-

Basis: 4V-Saugrohrein-spritzung ohne Variabilität
() zukünftiges Potenzial

Abb.2 Bewertungsmatrix Zylinderkopfkongzepte

Die Zylinderabschaltung wurde wegen des geringen Verbrauchsvorteils und wegen der eingeschränkten Eignung für kleine Zylinderzahlen ausgeschlossen. Die Direkteinspritzung schied ebenfalls aus, weil die theoretisch möglichen Verbrauchsvorteile heute noch nicht zu erschließen sind und die Abgastechnik für große Fahrzeuge noch erhebliche Dauerhaltbarkeitsrisiken aufweist.

Darüber hinaus schließt die Notwendigkeit zur Verwendung schwefelarmer Kraftstoffe derzeit einen weltweiten Einsatz aus.

Am Ende der Konzeptphase wurde ein vollvariabler Ventiltrieb, die BMW VALVETRONIC, für den Ersteinsatz in der Motorenfamilie beschlossen. Dieses Konzept ermöglicht sowohl hohe Verbrauchsvorteile, als auch das Beibehalten des stöchiometrischen Betriebes mit allen seinen Vorteilen. Das Konzept ist zudem weltweit unabhängig von Kraftstoffsorten einsetzbar.

3.3. Die BMW VALVETRONIC

Mit der VALVETRONIC wird der Motor ohne Drosselklappe betrieben. Die Füllung der Zylinder wird in der Teillast über den Ventilhub der Einlassventile und über die Öffnungsdauer eingestellt (Abb.3).

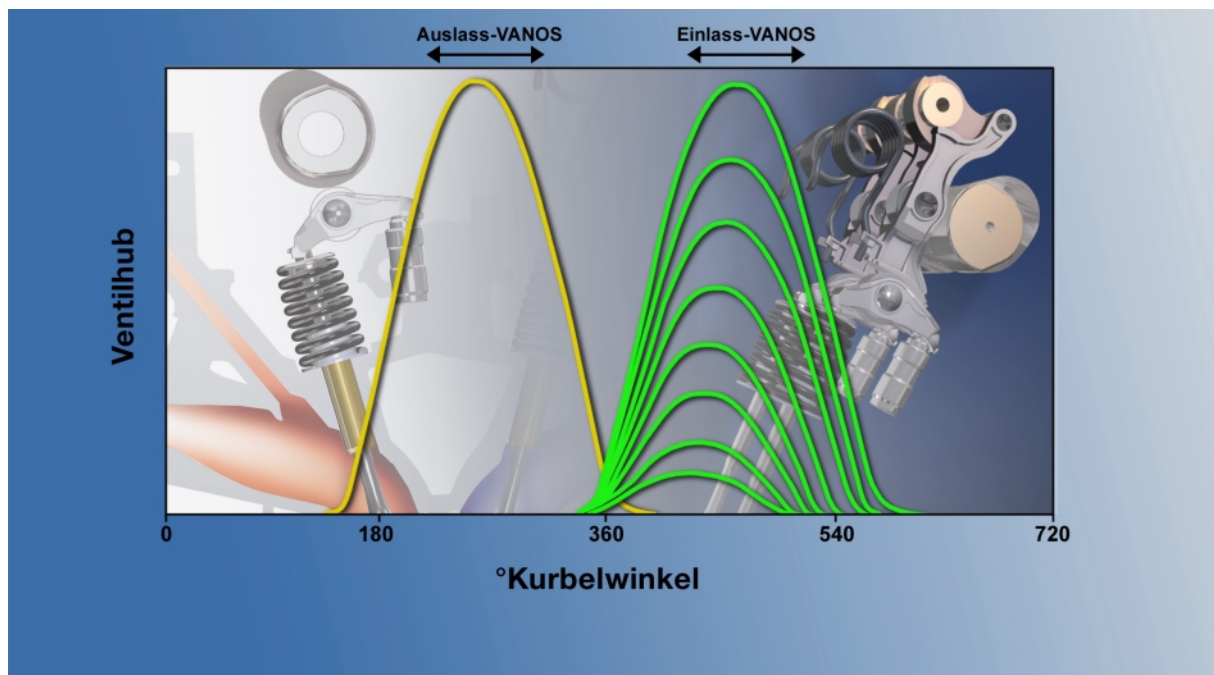


Abb.3 Ventilhubverlauf mit VALVETRONIC

Die Einlass- und Auslassnockenwellen werden über eine variable Nockenverstellung, die bekannte BMW VANOS-Technik, angetrieben. Dies ermöglicht eine unabhängige Darstellung der Ventilsteuerzeiten und der Ventilüberschneidung. Die VALVETRONIC arbeitet nach dem Prinzip des „frühen Einlass schließt“.

Damit werden die Ladungswechselverluste deutlich reduziert und erreichen annähernd das Niveau von ideal arbeitenden DI-Motoren (Abb.4).

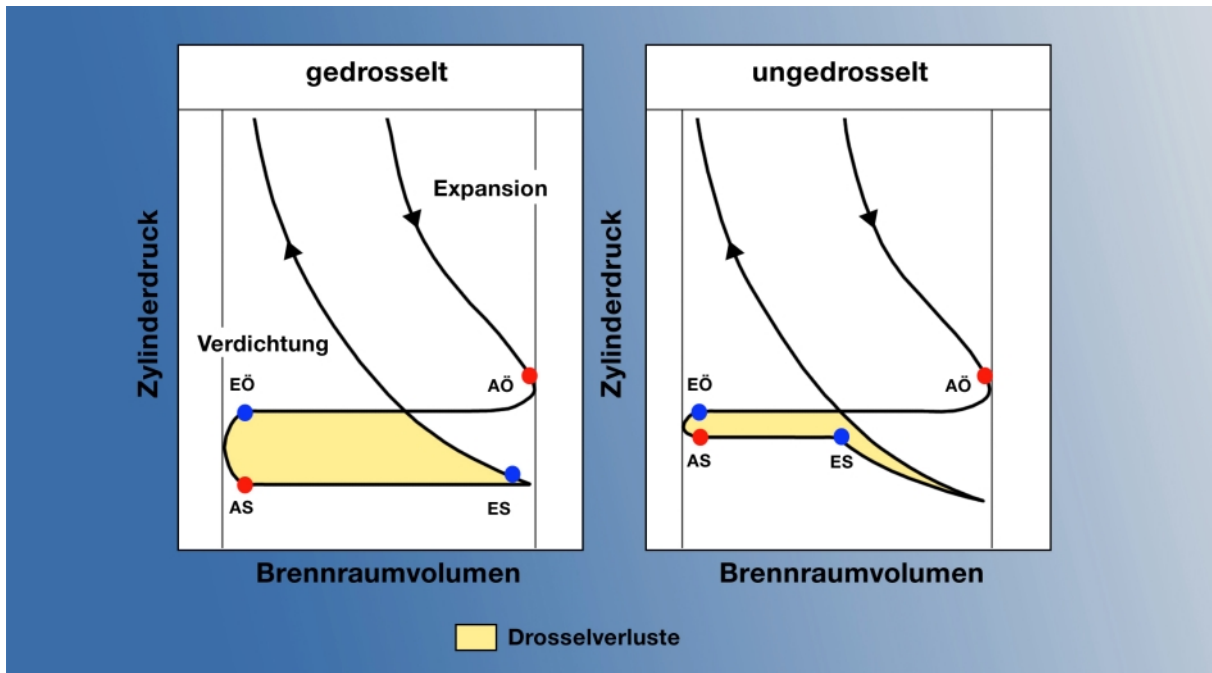


Abb.4 Vergleich Ladungswechselverluste

Zusätzlich wird in Kombination mit der Saugrohreinspritzung und dem Ansaugen durch sehr enge Ventilquerschnitte in der Teillast eine gute Gemischaufbereitung erreicht (Abb.5).

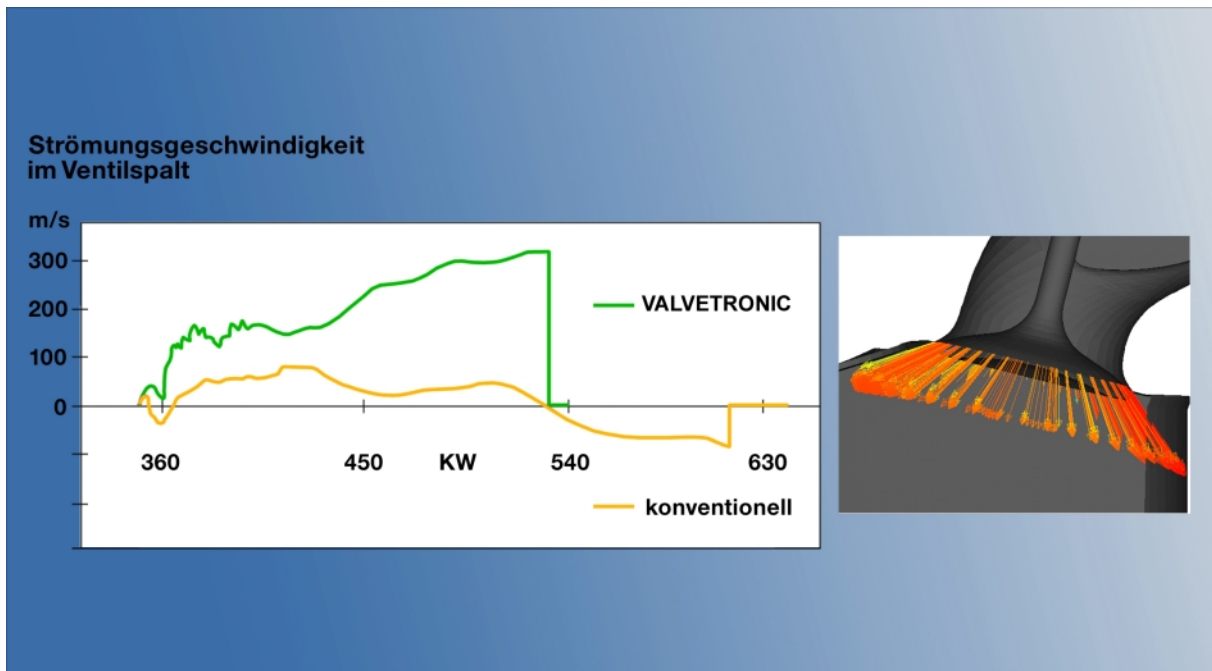


Abb.5 Vergleich Einstömgeschwindigkeit

Unter Betriebsbedingungen mit sehr kritischen Gemischbildungsverhältnissen, z.B. beim Kaltstart und anschließendem Warmlauf, werden mit der VALVETRONIC erhebliche Verbesserungen im thermodynamischen Wirkungsgrad erzielt. Durch die Einströmgeschwindigkeit von bis zu 300 m/s ergeben sich deutlich kleinere Tröpfchengrößen und eine verbesserte Gemischhomogenität (Abb.6). Der Verbrauchsvorteil beträgt im Warmlauf der Motoren bis zu 30%.

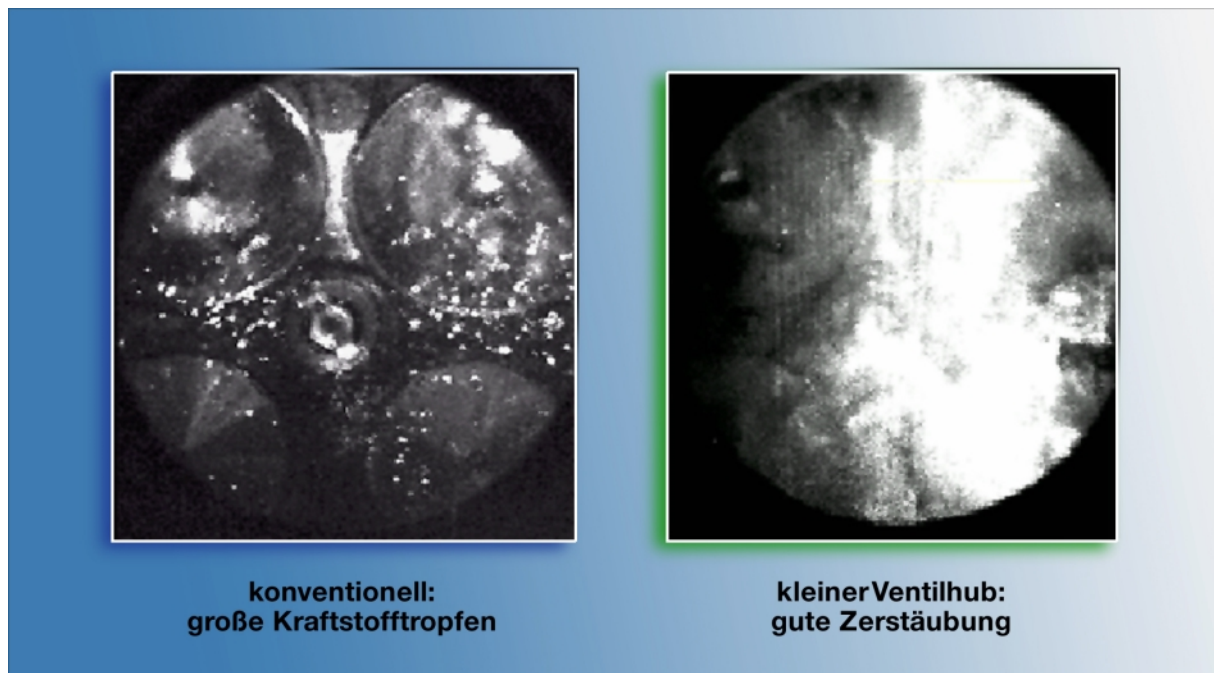


Abb.6 Vergleich Gemischhomogenität

4. Konstruktive Merkmale

4.1. VALVETRONIC

Die VALVETRONIC Technologie baut auf einer DOHC-Konstruktion mit Rollenschlepphebel und ruhendem HVA-Element auf. (Abb.7).

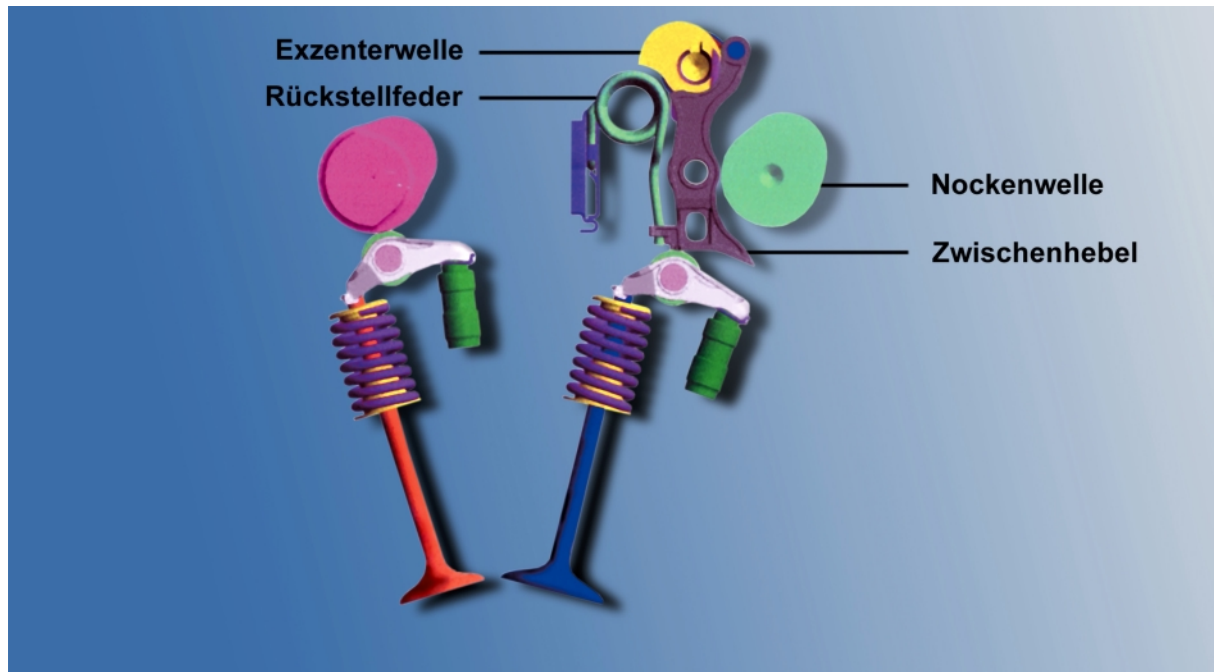


Abb.7 Konstruktiver Aufbau der VALVETRONIC

Zur stufenlosen Verstellung des Einlass-Ventilhubes wird zwischen der Nockenwelle und dem Schlepphebel ein Zwischenhebel eingefügt, der sich auf der Exzenterwelle abstützt. Die Kontur der Kontaktfläche des Zwischenhebels zum Rollenschlepphebel definiert die Ventilerhebungskurve. Durch Verdrehen der Exzenterwelle lässt sich der Drehpunkt des Zwischenhebels und damit das Übersetzungsverhältnis zwischen Nockenhub und Ventilhub stufenlos zwischen etwa 0,3 mm im Leerlauf und 9,7 mm bei Volllast verändern.

Die Exzenterwelle wird über ein Schneckengetriebe durch einen Elektromotor, der vom Fahrpedal über ein drive-by-wire System angesteuert wird, verstellt.

Auf dieser CD befindet sich zusätzlich eine Animation, die das Funktionsprinzip noch einmal verdeutlicht.

4.2. Zylinderkopf

Der Aluminium-Zylinderkopf wird im Niederdruckverfahren gegossen. Die Struktur ist durch Querwände besonders steif konstruiert. Diese begünstigen außerdem das angewandte Querstrom-Kühlungsprinzip, das eine sehr homogene Temperaturverteilung über die Motorlänge sicherstellt. Der Räderkasten für den Nockenwellen-Antrieb ist angegossen. Die zwei oberliegenden Nockenwellen werden von einer gemeinsamen Kette über die beiden VANOS-Einheiten angetrieben. Die Ventile sind V-förmig angeordnet und bilden einen Winkel von 30,5 Grad (Abb.8).

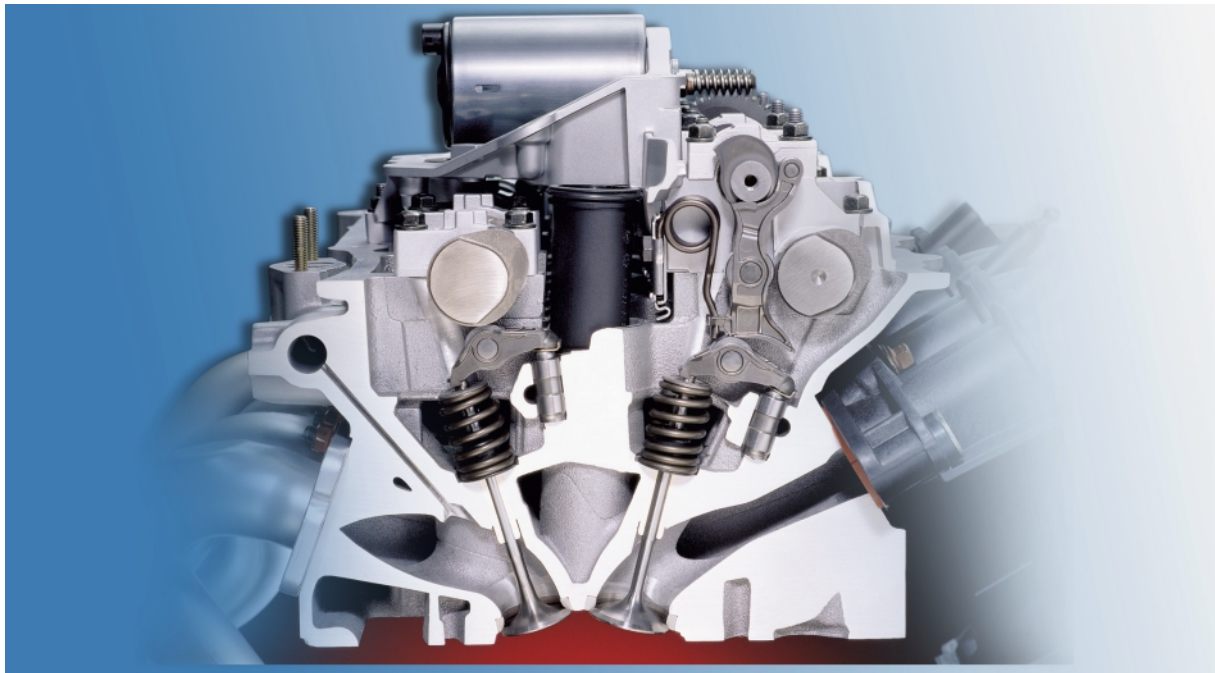


Abb.8 Zylinderkopf

Die gesamte VALVETRONIC Einheit wird in einem Camcarrier vormontiert und auf den Zylinderkopf aufgesetzt. Am vorderen Exzenterwellenende ist der hochgenaue Drehwinkelsensor angeordnet, der zur Lageregelung verwendet wird. Die Zylinderkopfhaube ist aus Kunststoff und aus Akustikgründen abgekoppelt.

4.3. Kurbelgehäuse

Das Kurbelgehäuse ist in open deck Bauweise konstruiert, wird in Druckgusstechnik gefertigt und hat eingegossene Graugussliner. Das Kurbelgehäuse ist in Kurbelwellenmitte geteilt; d.h. als bedplate Konstruktion ausgeführt. Der Räderkasten ist angegossen. Alle Konsolen und Aggregateträger sind so weit wie möglich in das Kurbelgehäuse integriert, um gute Akustik bei möglichst geringem Gewicht zu ermöglichen (Abb.9).

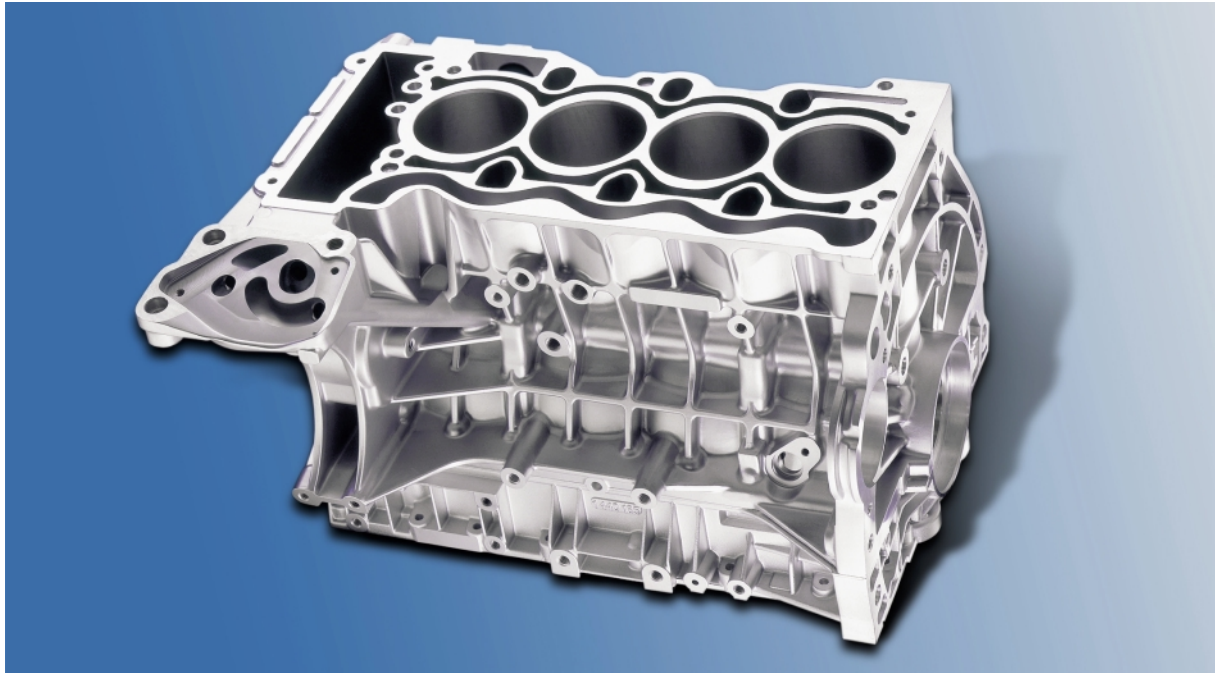


Abb.9 Kurbelgehäuse

Die bedplate Konstruktion ergibt eine sehr hohe Steifigkeit und damit beste Voraussetzungen für eine gute Akustik. Die Abdichtung des bedplates zum Oberteil erfolgt durch Flüssigdichtmittel, das nach der Montage durch einen bearbeiteten Kanal im bedplate eingespritzt wird und im weiteren Verlauf der Montage des Motors aushärtet.

Eine Besonderheit der Kurbelwelle ist der größere Lagerdurchmesser von 65 mm auf der Getriebeseite gegenüber 56 mm bei den restlichen Kurbelwellenlagern. Dadurch wird die Akustik verbessert ohne die Reibungseigenschaften nennenswert zu verschlechtern. Auch bei den großen Hubraumvarianten wird ausschließlich eine Gusskurbelwelle eingesetzt (Abb.10).

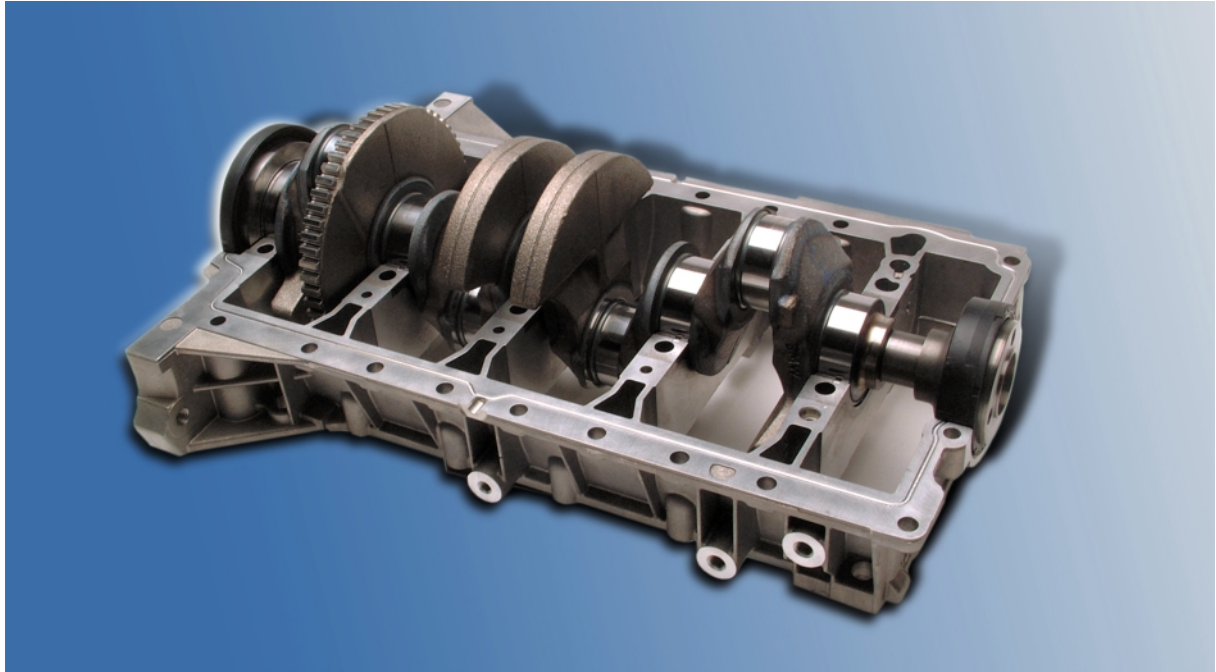


Abb.10 Bedplate mit Kurbelwelle

Das Pleuel ist als Trapezpleuel ausgeführt. Dadurch konnte die oszillierende Masse um 10% reduziert werden (Abb.11). In dem Motorkonzept werden Pleuellängen von 153 mm bis 147 mm dargestellt. Das Schubstangenverhältnis von 0,26 ist die Basis für optimale Reibleistungswerte und akustische Eigenschaften.

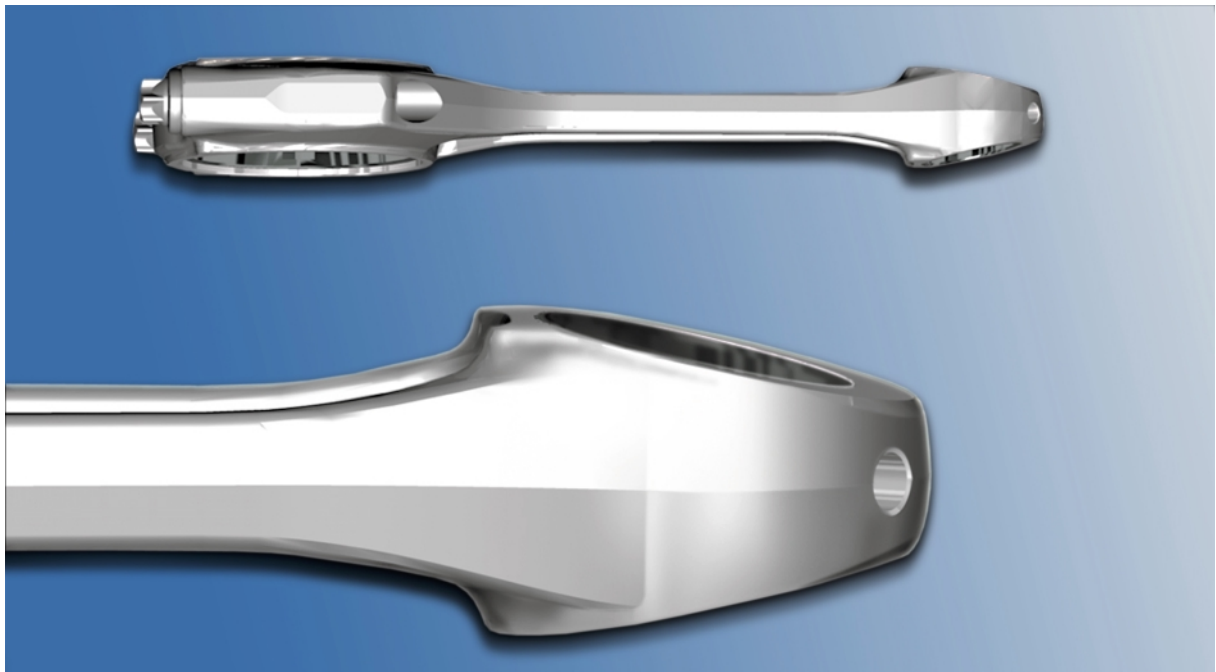


Abb.11 Trapezpleuel

Der Kolben ist spritzölgekühlt. Das Verdichtungsverhältnis beträgt 10,5 : 1. Eine adaptive Klopfregelung erlaubt den Betrieb des Motors mit Kraftstoffen in einem ROZ-Bereich zwischen 87 und 98.

Das Motorkonzept sieht eine modulare Ausgleichswelleneinheit vor. Diese stellt zusammen mit der Ölpumpe ein Modul dar (Abb.12). Die Ölpumpe dämpft wirkungsvoll Drehschwingungen. Die Ausgleichswelleneinheit wird über einen Kettentrieb von der Kurbelwelle aus angetrieben.

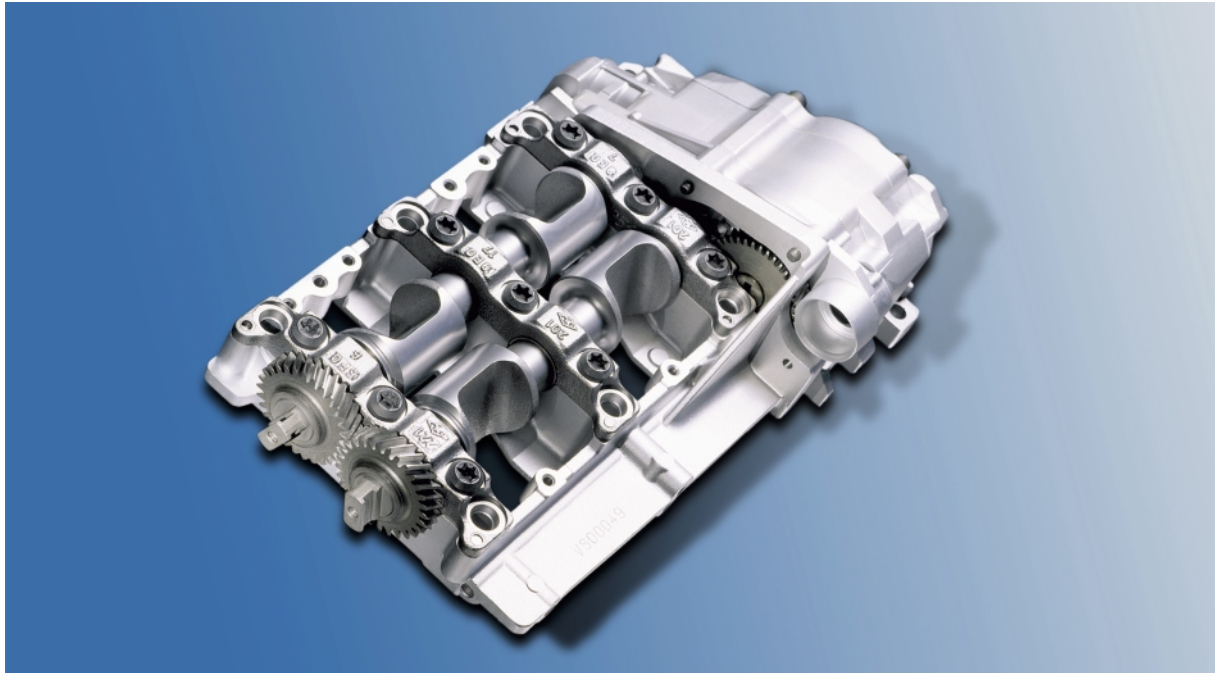


Abb.12 Ölpumpe mit Ausgleichswelleneinheit

Als Zylinderkopfdichtung wird eine Mehrlagenstahldichtung eingesetzt.

Der Kettentrieb für den Antrieb der Nockenwellen wird als komplettes, vormontiertes Modul, bestehend aus Kette, Kettenräder, Kettenspanner und den VANOS-Einheiten von oben in den Kettenkasten eingeführt und dann verschraubt.

Zur Darstellung eines sehr kompakten Motorpackages und zur Vereinfachung des Riementriebes werden Lenkhilfepumpe, Wasserpumpe und Thermostatgehäuse als eine kompakte Einheit zusammengefasst. Die Einheit wird direkt auf das Kurbelgehäuse verschraubt.

4.3. Motorperipherie

Die Sauganlage hat beim 1,8 l Motor eine feste Schwingrohrlänge von 561 mm. Für weitere Anwendungen ist eine Schalteinrichtung verfügbar, die im gleichen Gehäuse

eine Umschaltung der Schwingrohre von 354 mm auf 561 mm ermöglicht. Die Sauganlage wird aus verschweißten Kunststoffschalen aufgebaut und durch eine weiche Dichtung akustisch vom Zylinderkopf abgekoppelt.

Die im Bild dargestellte elektronische Drosselklappe wird für Diagnose-, Sicherheitsfunktionen und zur temporären Unterdruckerzeugung zur Spülung des Aktivkohlefilters verwendet (Abb.13).



Abb.13 Sauganlage

Der Fächerkrümmer realisiert eine lange Trennung der Zylindergruppen und schafft dadurch optimale Ladungswechselbedingungen bei allen Steuerzeiteinstellungen. Motornahe Vor-Katalysatoren stellen gutes Ansprungsverhalten nach dem Kaltstart sicher (Abb.14).

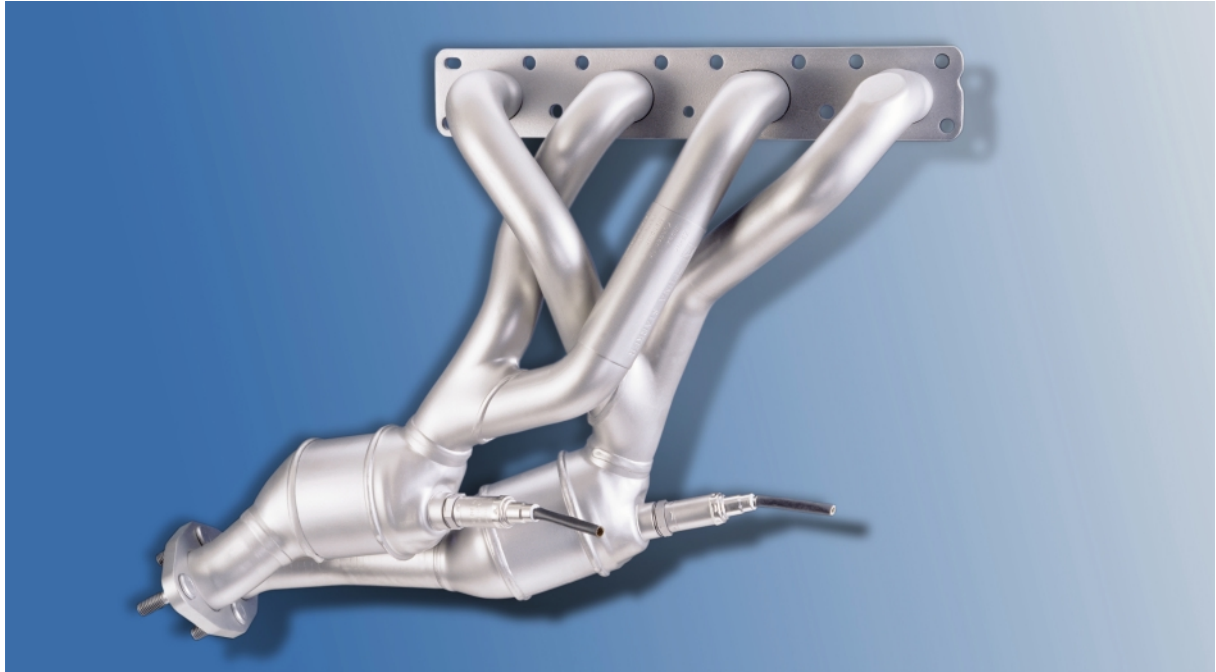


Abb.14 Fächerkrümmer mit Vor-Katalysatoren

4.4 Motordaten

Weitere im Text nicht im Detail beschriebene Motordaten enthält die Tabelle 1.

Hubraum effektiv	cm ³	1796
Hub	mm	81
Bohrung	mm	84
Hub/Bohrung	--	0,96
Leistung bei Drehzahl	kW U/min	85 5500
Drehmoment bei Drehzahl	Nm U/min	175 3750
Verdichtung	--	10,25
Ventilteller- \varnothing E/A	mm	32/29
Ventilhub \varnothing E/A	mm	0,3-9,7/9,7
Sauganlage	mm	D=38 /561mm
Kurbelgehäuse	--	Aluminium; keine Zwangsdurchströmung; eingegossene Grauguss-Laufbuchsen
Zylinderblockhöhe	mm	222,3
Zylinderabstand	mm	91
Hauptlager \varnothing	mm	56; hinteres Lager 65
Pleuellager \varnothing	mm	50
Pleuellänge	mm	153,1
Ventilwinkel	°	Einlass 14/Auslass 16,5
Phasenverstellung Einlass	°KW	stufenlos variabel über 60°
Phasenverstellung Auslass	°KW	stufenlos variabel über 60°
Gemischaufbereitung	--	Sequenzielle Multipoint-Saugrohr-Einspritzung; vollelektronischer Drosselklappensteller für Diagnosefunktionen, Sicherheitsfunktion und Tankentlüftung
Kraftstoff	ROZ	87-99; Klopfregelung
Emissionseinstufung	--	EU 4
Motorgewicht	kg	132

Tabelle 1: Daten 1,8 l Motor

5. Produkteigenschaften

5.1. Volllast

Die 1,8 l Variante des Motors hat gegenüber dem Vorgängermotor mit 1,9 l Hubraum einen verbesserten Drehmomentverlauf. Die Volllastwerte verbessern sich von 165 auf 175 Nm und von 77 kW auf 85 kW.

Im neuen 316ti Compact werden damit deutliche Verbesserungen in allen Fahrleistungsdisziplinen erreicht.

Die Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h reduziert sich um 9% auf 10,9 s.

Die Höchstgeschwindigkeit steigt von 190 auf 201 km/h (Abb.15).

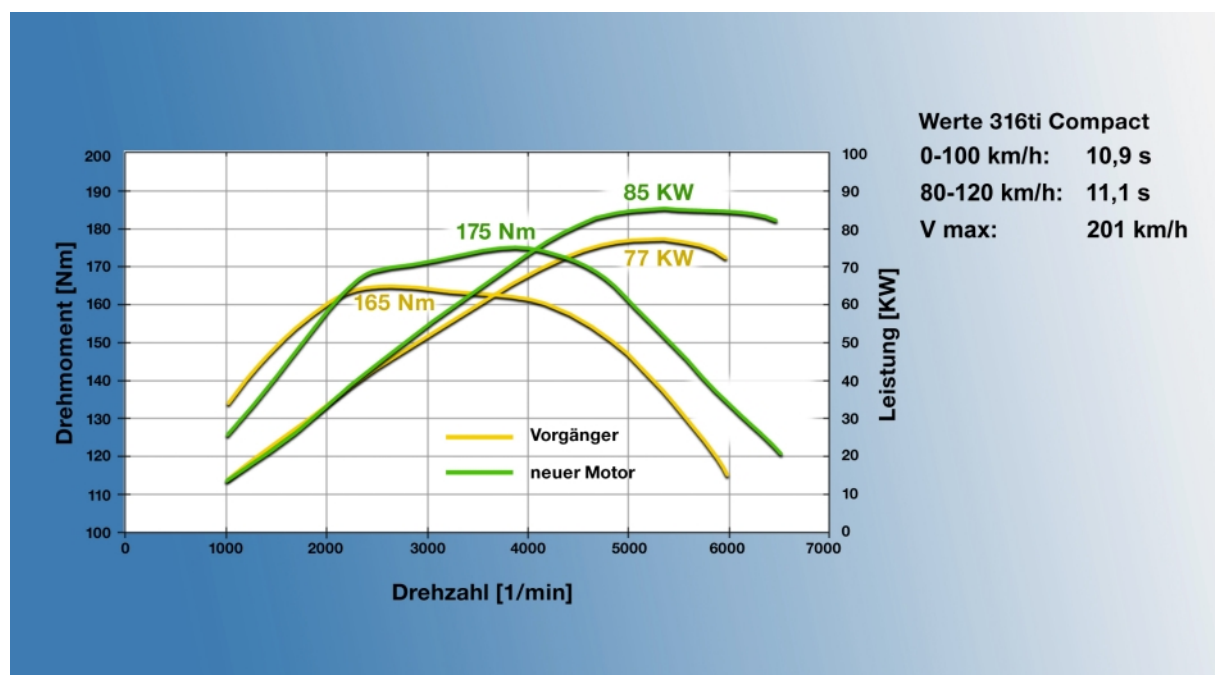


Abb.15 Vergleich Leistungsdaten

Neben den stationären Volllastwerten konnte auch das Instationärverhalten spürbar verbessert werden:

Die VALVETRONIC steuert die Füllung über die Stellgröße des Ventilhubes und der Öffnungsdauer unmittelbar am Brennraum. Die Verstellgeschwindigkeit der Exzenter-welle von 0,3 mm Ventilhub bis 9,7 mm Ventilhub beträgt 300 ms. Bei niedrigen Drehzahlen wird zur Darstellung der Volllastfüllung nur ein Ventilhub von 3 bis 4 mm benötigt, der schon nach 100 ms eingestellt ist. Zudem entfällt die Zeit für die Befüllung der Sauganlage.

Abb.16 zeigt den Drehmomentaufbau eines herkömmlichen Motors mit dem bekannten Saugrohrfüllverhalten und den des neuen Motors mit VALVETRONIC. Für den Kunden wird dieses Verhalten durch eine spürbar bessere Response erlebbar (Abb.16).

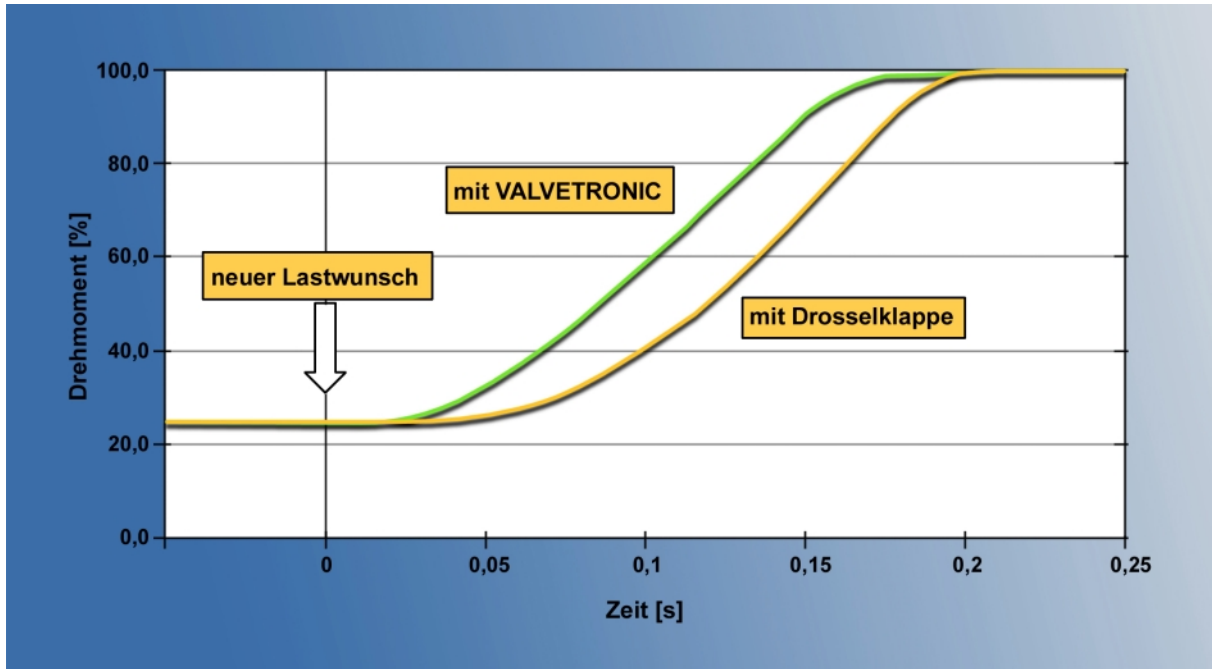


Abb.16 Vergleich instationärer Drehmomentaufbau

5.2. Verbrauch

Die Verbrauchsreduzierung wird maßgeblich durch die VALVETRONIC realisiert. In Kombination mit den reibungsreduzierenden Maßnahmen werden in weiten Kennfeldbereichen Verbrauchsverbesserungen von über 10% erreicht. Der Leerlaufverbrauch reduziert sich um ca. 25%. Straßenmessungen mit verschiedenen Fahrprofilen ergeben Verbrauchsverbesserungen von mehr als 10% im Kundenbetrieb. Im europäischen Verbrauchszyklus KV01 hat der neue Motor einen um 14% niedrigeren Kraftstoffverbrauch.

Damit wird im neuen BMW 316ti Compact mit 6,9 l/100 km erstmals ein Verbrauchswert von weniger als 7 Liter bei einem BMW Fahrzeug mit Ottomotor erreicht (Abb.17).

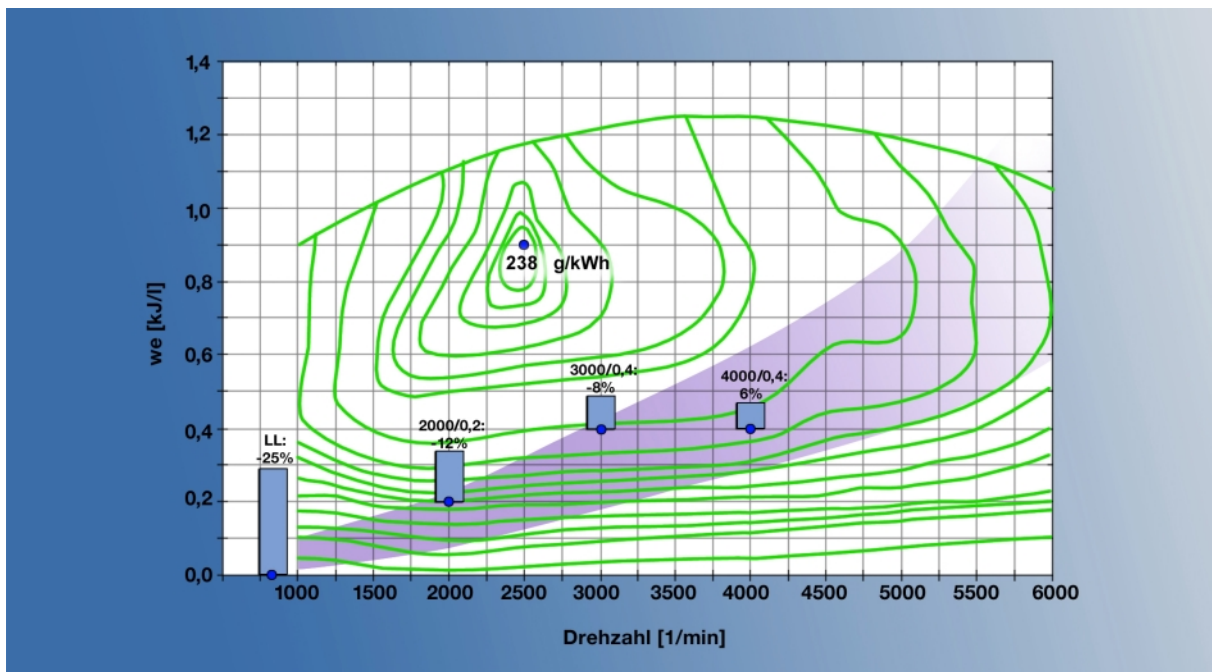


Abb.17 Verbrauchsreduzierung durch VALVETRONIC

5.3. NVH-Verhalten

Die Gesamtheit der NVH-verbessernden Maßnahmen, wie das Kurbelgehäuse mit bedplate, die Ausgleichswellen, die steife Anordnung der Nebenaggregate und die im Teillastbereich kleinen Ventilbeschleunigungen durch die VALVETRONIC ergeben ein Körperschallniveau, das sonst nur von 6-Zylinder-Reihenmotoren erreicht wird.

Im Bereich bis 2000 U/min reduziert sich der Schalleistungspegel gegenüber dem Niveau des Vorgängers um ca. 3 dB(A) (Abb.18).

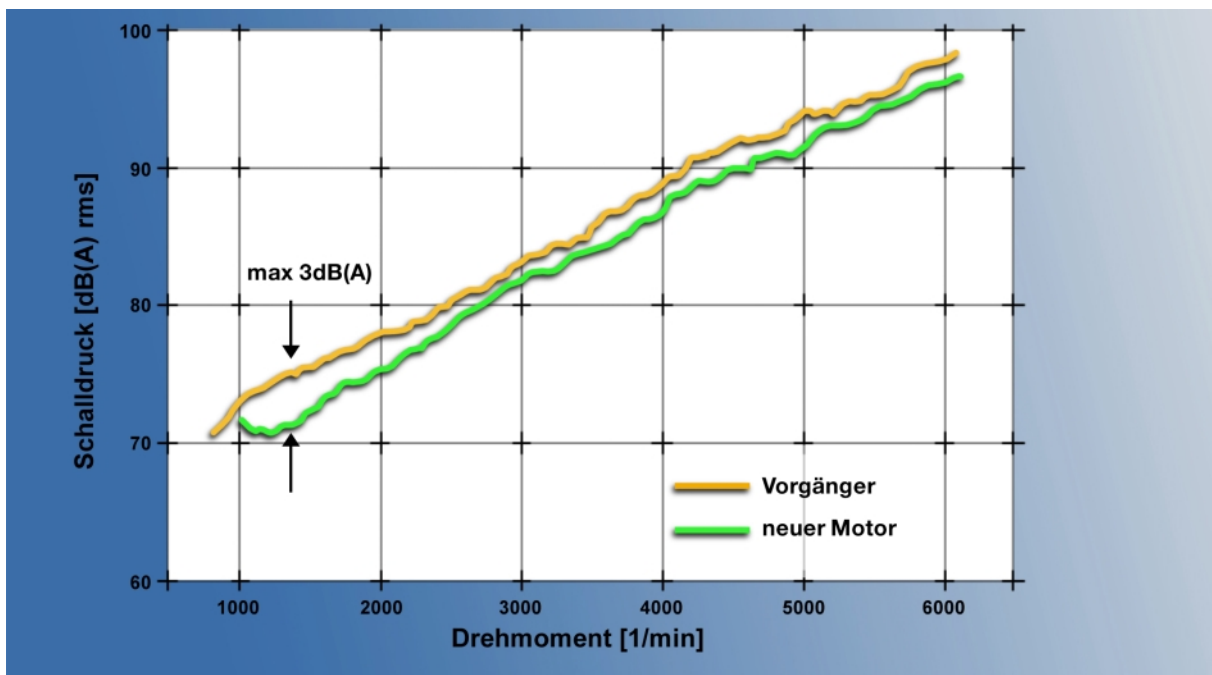


Abb.18 Akustikvergleich

5.4. Abgasemissionen

Der Motor ist in Europa nach EU4 zertifiziert. Es werden darüber hinaus alle weltweit bestehenden Abgasvorschriften ohne Einschränkungen beim Verbrauch erfüllt. Dabei besteht wegen des stöchiometrischen Betriebes keine Notwendigkeit des Einsatzes von schwefelfreiem Kraftstoff. Das Abgaskonzept umfasst die VALVETRONIC, motornahe Katalysatoren und einen zusätzlichen Unterbodenkatalysator (Abb.19).

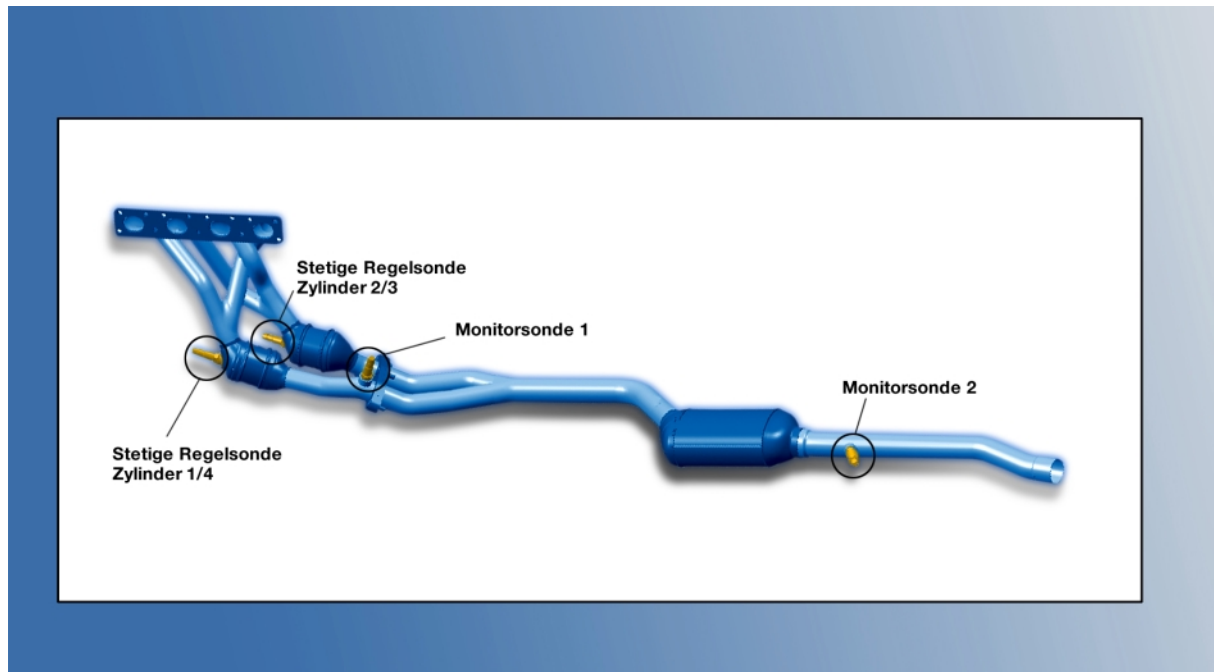


Abb.19 Abgasanlage

5. Zusammenfassung

Der neue 4-Zylindermotor ist der erste Vertreter einer neuen BMW Ottomotoren-Familie (Abb.20). Der Ersteinsatz erfolgt im 316ti Compact ab Mitte 2001.

Die VALVETRONIC ermöglicht eine bisher unerreichte Kombination aus niedrigem Verbrauch, exzellenter Laufruhe und hoher Leistung bei Ottomotoren.

Die VALVETRONIC hat keine Einschränkung bezüglich Kraftstoffqualitäten, erfüllt weltweit alle Emissionsanforderungen und ist derzeit dem Otto-DI-Brennverfahren überlegen.

BMW wird die Technologie des neuen 4-Zylinder Motors Zug um Zug in weiteren Motorbaureihen einsetzen.



Abb.20 Gesamtmotoransicht