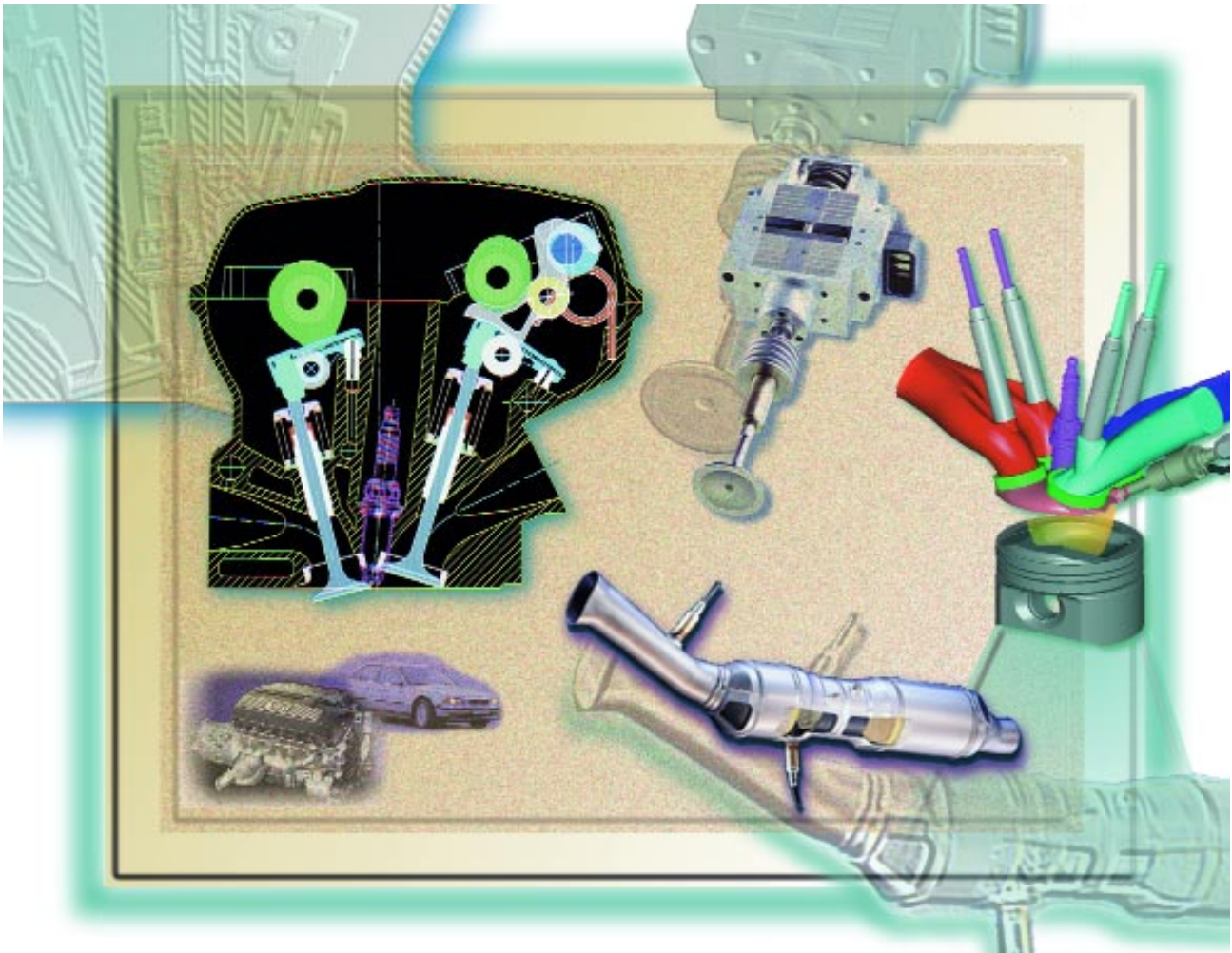
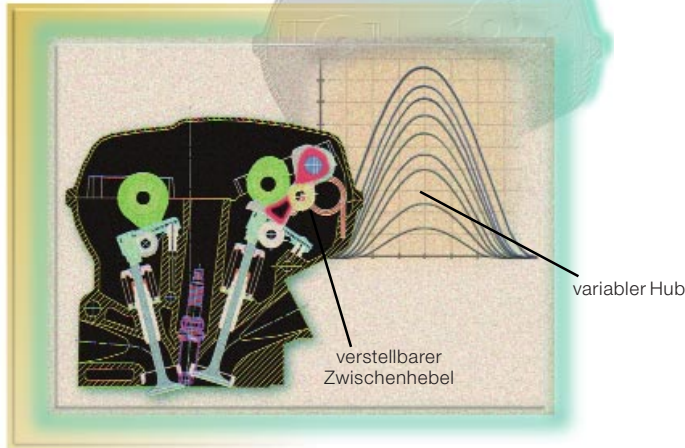


Noch weniger Verbrauch und Emissionen gehören mehr denn je zu den Prioritäten im Motorenbau. Darauf sind auch die zentralen BMW Entwicklungen im Bereich der Ottomotoren ausgerichtet: Der von BMW patentierte vollvariable Ventiltrieb und die Direkteinspritzung, kombiniert mit teils neuartigen Katalysatorsystemen.



## Mechanischer vollvariabler Ventiltrieb



Seit mehr als 20 Jahren dominieren zwei Ziele die Motorenentwicklung: Immer weniger Verbrauch und immer weniger Emissionen. Danach, aber fast schon gleichauf, folgen die Forderungen nach mehr Drehmoment, Leistung und Komfort.

Zu den entscheidenden Einflußgrößen gehört hier die Steuerung des Gaswechsels. Sie ist bis heute ein Kompromiß zwischen Verbrauch, Drehmoment, Emissionen und Komfort. Teilvariable Ventilsteuerungen wie das BMW Doppel-VANOS System in der jüngsten Generation der Sechszylindermotoren lösen diesen Zielkonflikt weitgehend. Mit einer Ausnahme – des Verbrauchs. Der Grund: Sie verändern zwar Beginn und Ende von Ansaug- und Auslaßvorgang; welche Menge bzw. Masse dabei in den oder aus dem Zylinder kommt, können sie aber nicht regulieren. Auf der Einlaßseite ist diese Regelung aber unverzichtbar – man würde ohne die dafür zuständige Drosselklappe als „Verlängerung“ des Gaspedals immer Vollgas fahren.

Diese Regelung durch die Drosselklappe hat allerdings Nachteile: Je mehr sie den Zustrom an Frischgas begrenzt, desto größer wird der Unterdruck zwischen Klappe und Zylinder. Und das kostet Leistung, sprich Treibstoff.

### Die drosselfreie Laststeuerung: Der Mensch macht es vor.

Zur Lösung dieses Problems hat es sich einmal mehr bewährt, auf das Vorbild Natur zu sehen – in diesem Fall auf die menschliche. Man kann nämlich durchaus den Ladungswechsel beim Verbrennungsmotor mit dem Ein- und Ausatmen beim Menschen vergleichen. Bei hohem Leistungsbedarf atmet der Mensch tief und lang. Braucht er weniger Luft, drosselt er nicht die Luft, sondern atmet einfacher kürzer und flacher. Übertragen auf die Technik spricht man von einer drosselfreien Steuerung: Der Motor kann freier atmen.

Es gibt zwei Möglichkeiten, mit Hilfe der Ventile die in den Zylinder gelangende Masse zu steuern: Entweder unmittelbar über die Dauer der Ventilöffnungszeit oder mittelbar über den Ventilhub. BMW hat beide Verfahren entwickelt.

### Ladungssteuerung über Ventilhub: Der mechanische vollvariable Ventiltrieb

Aufbauend auf der stufenlos verstellbaren Doppel-VANOS-Technologie entstand der mechanische vollvariable Ventiltrieb – mit zusätzlich stufenlos verstellbarem Ventilhub der Einlaßventile, der die Öffnungsdauer reduziert. Und das funktioniert so: Zwischen Nockenwelle und dem Einlaßventilpaar jedes Zylinders ist ein von der Motorsteuerung verstellbarer Hebel plaziert. Je nach Einstellung überträgt der Hebel die Erhebung der Nocken nun als größere und damit längere oder kleinere, kürzere Öffnungsphase.

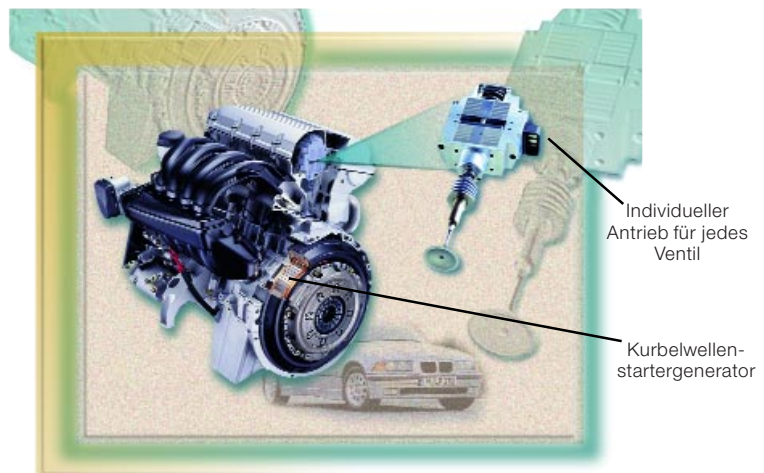
Die mit diesem Konzept der drosselfreien Laststeuerung erreichten Verbrauchsvorteile bewegen sich im Bereich von zehn Prozent im EU-Zyklus.

Die Faustformel heißt dabei: Je weniger das Gaspedal gedrückt wird, desto größer der zusätzliche Spareffekt – je nach Motorlast sogar bis zu 18 Prozent.

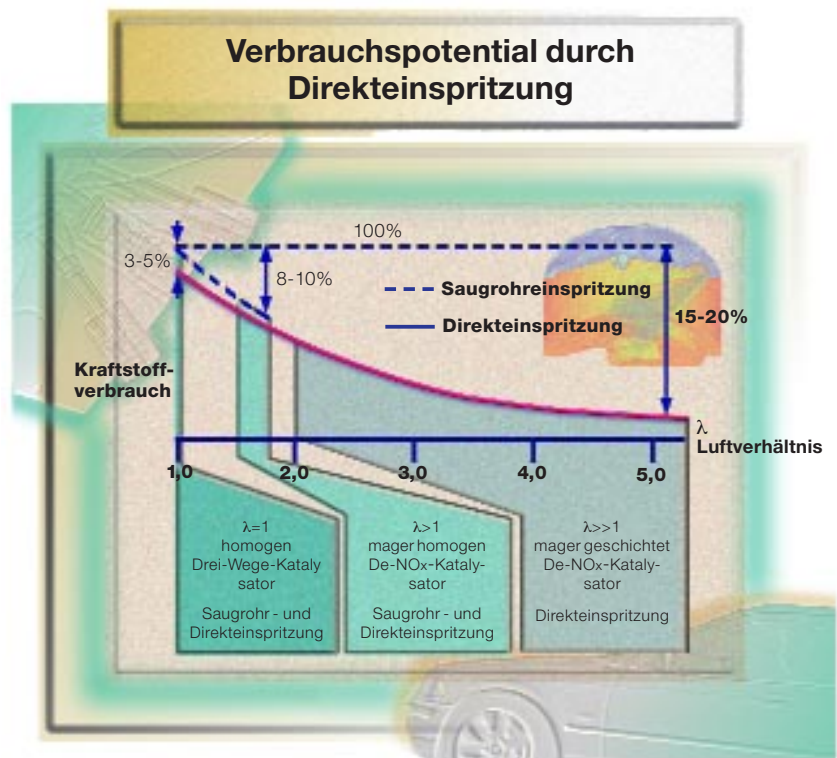
### Zylinderindividuelle Ladungssteuerung: Der elektromechanische Ventiltrieb

Eine Steigerung der Steuerungsfähigkeiten ist nur noch dadurch möglich, daß jedes Ventil seinen eigenen Antrieb bekommt und dieser bedarfsgerecht betätigt werden kann. Die Lösung für noch mehr Variabilität heißt elektromechanischer Ventiltrieb. Dabei bewegt sich ein Anker am Ventilende durch Federkraft zwischen zwei Magneten. Sie halten den Anker lediglich in den Endpositionen – Ventil offen oder Ventil geschlossen – fest. Über die Möglichkeiten hinaus, die bereits der mechanische vollvariable Ventiltrieb erschließt, vereinigt die elektromechanische Variante mehrere Motorkonzepte in einem. So können bedarfsgerecht zwei, drei und für maximale Motorleistung vier Ventile aktiviert werden. Ein Nebeneffekt des elektromechanischen Ventiltriebs darüber hinaus: Durch die schnelle Ventilbewegung ist das Vollastpotential hauptsächlich bei niedrigen Drehzahlen höher als bei einem Motor mit Nockenwelle: das Drehmoment steigt um fünf Prozent.

## Elektromechanischer Ventiltrieb



## Verbrauchspotential durch Direkteinspritzung



### Kraftwerk ersetzt Anlasser und Lichtmaschine: Der Kurbelwellenstartergenerator

Für den Antrieb der elektromechanischen Ventilsteuerung muß natürlich auch die notwendige Energie bereitgestellt werden. Dafür definierte BMW ein ebenfalls neues Generatorkonzept, den Kurbelwellenstartergenerator (KSG).

Dieses direkt auf der Kurbelwelle zwischen Motor und Getriebe angeordnete Kraftwerk vereint mehrere Funktionen: bei laufendem Motor die Generatorfunktion mit einem Wirkungsgrad von über 80 Prozent, bei stehendem Motor die Starterfunktion. Mit dem KSG entfallen die typischen Anlaßgeräusche, er bringt den Motor zudem schnell auf eine hohe Drehzahl und verringert damit die Emissionen in der Startphase. Das leistungsfähige Aggregat liefert gleichzeitig genügend Energie für die ständig zunehmende Anzahl an anderen elektrischen Funktionen, die den konventionellen riemenangetriebenen Generator bereits an seine Grenzen führen.

### Bis zu 20 Prozent sparsamer: Der Ottomotor mit Direkteinspritzung

Neben der drosselfreien Steuerung ist die Optimierung der Verbrennung der zweite Weg zur Verbesserung der Thermodynamik. Der direkt einspritzende Ottomotor kombiniert beides. Um 15 bis 20 Prozent sparsamer können Ottomotoren durch die Direkteinspritzung arbeiten. Die verbrauchssenkende Wirkung der Direkteinspritzung bei Teillast beruht auf zwei prinzipbedingten Ursachen:

- Ein Vorteil ist ein höheres darstellbares Dichtungsverhältnis
- der zweite Vorteil ist die weitgehende Vermeidung von Drosselverlusten bei Teillastbetrieb, da auch sehr magere Gemische durch Schichtung der Zylinderladung verbrennen.

Dem stehen allerdings auch Nachteile gegenüber: Durch die magere Verbrennung mit Sauerstoffüberschuß kann das Prinzip des heute üblichen Dreiwege-Katalysators nicht zur Abgasreinigung eingesetzt werden.

Durch den relativ hohen Sauerstoffgehalt im Abgas bleibt die Reduktion der Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) aus. Neue Konzepte wie die Speicherkat-Technologie sind zur Einhaltung anspruchsvoller Grenzwerte erforderlich.

### Sparsam durch Schichten: Konzentriertes Gemisch nur noch um die Zündkerze

Das große Plus, das die Direkteinspritzung gegenüber der heute bei Ottomotoren üblichen Kraftstoff-Einspritzung in das Saugrohr hat, ist die Gemischbildung im Brennraum selbst. Es wird nur Luft durch die Einlaßventile angesaugt und anschließend verdichtet. In den mit komprimierter Luft gefüllten Brennraum kann jederzeit, also nun auch erst unmittelbar vor der Zündung der Kraftstoff eingespritzt werden. Dabei ist es durch die Auslegung von Brennraum und Einspritzdüse möglich, zündfähiges Gemisch nur in direkter Umgebung der Zündkerze zu erzeugen. Im Rest des Brennraumes wird das Gemisch dagegen zur Zylinderwand hin immer magerer. Im Idealfall ist an der Wand nur reine Luft vorhanden.

Der hohe Luftanteil bedeutet einerseits eine effizientere Verbrennung. Andererseits kann die Drosselklappe wesentlich weiter oder ganz geöffnet werden, was den Motor freier atmen läßt – der Energieaufwand für die Gaswechsalarbeit wird noch mehr als beim vollvariablen Ventiltrieb reduziert. Also nochmals weniger Verbrauch.

Steigen Last und Drehzahl allerdings, bringt die Schichtung keine Vorteile mehr. Doch hat das DI-Prinzip auch dann Vorteile: das Zerstäuben des Kraftstoffs direkt im Brennraum kühlt

den Zylinderinhalt ab, die Gefahr der Selbstentzündung (Klopfeigung) verringert sich und die Verdichtung kann erhöht werden. Das wiederum bedeutet unter allen Betriebsbedingungen weniger Verbrauch.

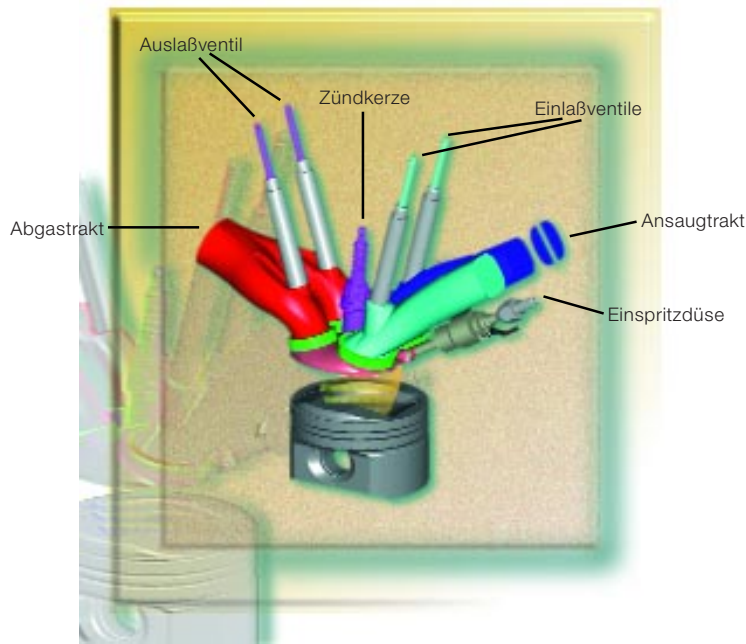
### Zylinderkopf und Brennraum: Neue Technik optimiert Magerbetrieb

In der Theorie einfach, verlangt ein den hohen BMW Ansprüchen genügender DI-Ottomotor freilich noch detaillierte Entwicklungsarbeit. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Optimierung von Brennverfahren, Einspritz- und Abgasystem. So verlangt beispielsweise die effektive Verbrennung eine intensive Bewegung des Gemischs, die allerdings je nach Last und Drehzahl unterschiedlich erzeugt werden muß. Dafür konstruierten BMW Ingenieure eine Steuerung, mit der in einem Vierventil-Zylinderkopf ein Einlaßkanal pro Zylinder geschlossen werden kann. Im Magerbetrieb strömt dadurch die gesamte Luftmasse nur noch durch den zweiten Einlaßkanal. Der ist so geformt, daß sich die gewünschte intensive Ladungsbewegung im Brennraum einstellt. Bei höheren Drehzahlen und Lasten öffnen sich dagegen beide Einlaßkanäle, so daß Verluste beim Ladungswechsel und damit an Leistung vermieden werden.

### Entwicklungsbedarf Regelstrategie: Neue Aufgaben für die Motorsteuerung

Die jeweils optimale Betriebsart muß über die Motorsteuerung geregelt werden. Diese Regelstrategie gilt es noch zu perfektionieren. Weil im drosselfreien Betrieb der Unterdruck im Saugrohr entfällt, muß außerdem durch

## Ottomotor mit Direkteinspritzung (DI Konzept)



geeignete Maßnahmen für die notwendige Versorgung des Bremskraftverstärkers gesorgt werden. Und um den Speicherkatalysator im optimalen Rhythmus vom Speicher- auf den Konvertierungsmodus anzusteuern sind ebenfalls zusätzliche Funktionen erforderlich.

Insgesamt ist mit der Lösung dieser Aufgaben noch ein nicht unerheblicher Entwicklungsaufwand verbunden. In Anbetracht des hohen Verbrauchspotentials, das den Benzinmotor im Wirkungsgrad dem Diesel annähert, treibt BMW diese Technologie mit Nachdruck voran.

### Sauber in die Zukunft: Neue Katalysator-Technologie für neue Motoren

Die Optimierung des Wirkungsgrades ist freilich nur eine der beiden Hauptanforderungen, denen sich die Motorentwickler stellen. Die andere, manchmal auch konträre, aber nicht minder anspruchsvolle ist die weitere Minimierung der Schadstoffemissionen. Und da teilt sich die Aufgabe bei BMW in zwei Fraktionen:

- Optimierung der Katalysator-Anordnung und -Beschichtung für konventionelle Ottomotoren
- Entwicklung neuer Katalysatorsysteme für den direkteinspritzenden Ottomotor

Mit Einführung des Katalysators wurden die Fahrzeugemissionen um rund 90 Prozent reduziert. Durch konsequente Weiterentwicklung der Motoren, der Motorsteuerungen, des Gemischbildungssystems und der Katalysator-Technologie konnten die Restemissionen bis heute um weitere

60 Prozent reduziert werden. Damit liegt die Gesamtbilanz der Abgasreinigung heute bei 96 Prozent.

Aufgrund der zukünftigen gesetzlichen Anforderungen ist nun eine weitere Halbierung der Restemissionen erforderlich, also eine weitere Steigerung der Konversionsrate auf 98 Prozent. Der Vorteil: Der Katalysator erreicht diesen Umsatz im überwiegenden Teil seines Betriebs heute schon. Der Nachteil: Rund 80 Prozent der Fahrzeugemissionen werden in den ersten beiden Minuten nach dem Kaltstart ausgestoßen. Der Grund: Um die limitierten Abgaskomponenten Kohlenwasserstoff (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) in unschädliche Gase umzusetzen, benötigt der Katalysator heute eine Mindesttemperatur von 250 bis 300 Grad.

Was also benötigt wird, sind Katalysator-Systeme mit möglichst kurzer Aufheizzeit. Bei der klassischen Position des Katalysators unter dem Wagenboden verlieren die Abgase durch die relativ weite Entfernung vom Motor jedoch zuviel an Hitze, um den Konverter schnell genug auf Arbeitstemperatur zu bringen. Dazu gibt es – vereinfacht – drei Möglichkeiten:

- Unterboden-Katalysator mit motornahem Vorkatalysator und Sekundärlufteinblasung
- motornaher, zweiteiliger Hauptkatalysator oder
- elektrisch beheizter Unterbodenkatalysator

Neben der Anordnung des Katalysators kann auch der Monolith als Träger der aktiven Beschichtung optimiert werden. Monolithen mit hoher Zellen-

zahl bieten beispielsweise eine große aktive Oberfläche mit verbesserten Konvertierungsraten. Andererseits erhöht sich dadurch der Abgasgegen- druck, was dünnere Wandstärken nur teilweise ausgleichen können. Für die optimale Anströmung wurden außerdem verschiedene geometrische Formen entwickelt. Über die Beschichtung läßt sich die Anspringtemperatur weiter absenken. Während etwa frühere Substanzen bei rund 280 Grad ansprangen, reichen heute bereits 250 Grad aus. Ein hoher Palladiumanteil in der Beschichtung und Sekundärlufteinblasung aktivieren den katalytischen Prozeß sogar schon ab 170 Grad.

Insgesamt betrachtet hat jede Katalysatorauslegung aber ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Neben den Kosten spielen dabei insbesondere der zur Verfügung stehende Bauraum, Motorleistung, Gewicht und Akustik entscheidende Rollen. Um vor diesem Hintergrund jeweils optimale Lösungen verwirklichen zu können, entwickelt BMW praktisch für jeden Fahrzeugtyp individuell angepaßte Katalysator-Anlagen.

### Vorbildlich: Neue BMW Sechszylinder mit motornahem Katalysator, Lufteinblasung und Doppel-VANOS

Bei den Sechszylindermotoren ist die Variante mit motornahem Katalysator verwirklicht. Der vordere, motornähere Monolith nimmt dabei zwar nur ein Drittel des gesamten Katalysatorvolumens ein, ist aber dafür mit der dreifachen Edelmetallmenge beladen. Um möglichst schnell möglichst hohe Konversionsraten zu erreichen, bläst die elektrische Sekundärluftpumpe in der Warmlaufphase Luft in das Abgas- system und erzeugt so einen Sauerstoffüberschuß. Dadurch verkürzt sich die Anspringzeit des Katalysators um nahezu die Hälfte. Diese Katalysator- anlage unterschreitet die amerikanischen LEV-(Low Emission Vehicle) und sogar ohne Lufteinblasung die EU 3- Grenzwerte. Das US-Limit erlaubt unter anderem nur noch den Ausstoß von 0,075 Gramm Kohlenwasserstoff pro Meile, das neue europäische Abgas- gesetz 0,2 Gramm Kohlenwasserstoff pro Kilometer. Der Sechszylinder mit 2,8 Liter Hubraum unterschreitet zudem die nationalen D4-Grenzwerte.

# Ottomotor- und Katalysatorsysteme mit Zukunft

Verbrauch

Emission

Ziele

Wirkungsgrad  
 $\eta$

Vollvariable  
Ventiltriebe

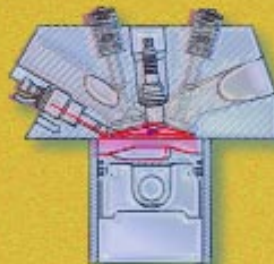
Ottomotoren mit  
Direkteinspritzung



Mechanischer  
vollvariabler  
Ventiltrieb



Elektromechanischer  
Ventiltrieb



Motor-  
konzepte

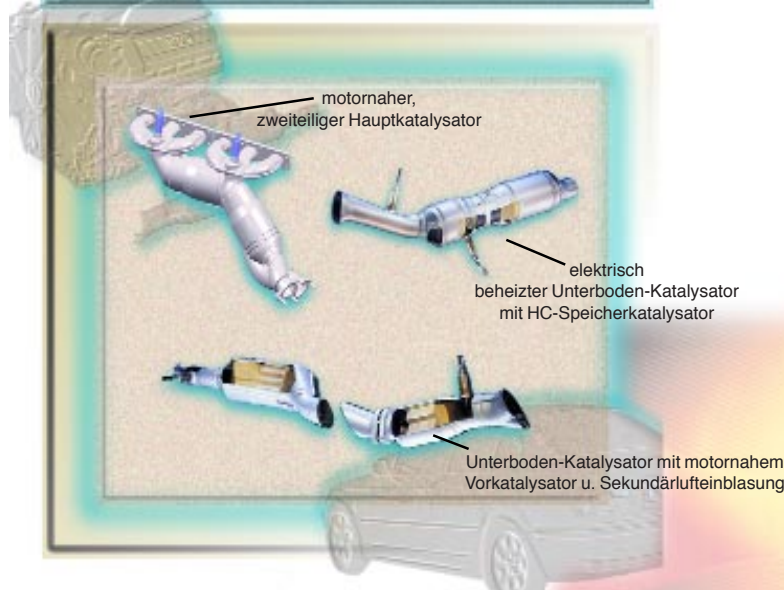
Abgasnachbehand-  
lung durch geregelten  
Dreiwegekatalysator  
 $\lambda=1$

Abgasnachbehand-  
lung durch neue  
Katalysatorsysteme  
 $\lambda > 1$



Abgasnach-  
behandlung

## Abgasnachbehandlung durch neue Katalysatorsysteme



### Erfüllen ebenfalls bald serienmäßig LEV und EU 3: Acht- und Zwölfzylinder

Bei den Acht- und Zwölfzylindermotoren sind die Platzverhältnisse aufgrund der V-Anordnung der Zylinder jedoch deutlich anders. Deshalb und wegen der hohen Motorleistung besteht die jüngste Katalysator-Generation für die BMW Achtzylinder aus einer geteilten Anlage mit Vor- und Hauptkatalysator. Die Katalysator-Anlage für den Zwölfzylindermotor setzt sich aus einem HC-Speicherkatalysator, einem elektrisch beheizten und einem konventionellen Katalysator zusammen, alles komplett unter dem Wagenboden platziert. Der Speicherkatalysator nimmt in den ersten Sekunden nach dem Kaltstart die Kohlenwasserstoffe auf, bis der elektrisch beheizte Katalysator den nachfolgenden Monolithen erwärmt hat. Auch diese Systeme erfüllen die Vorschriften von LEV, EU 3 und D4.

### Entwicklung neuer Technologie: Speicherkatalysator für den Direkteinspritzer

Ganz spezielle Anforderungen stellt ein direkteinspritzender Ottomotor an die Abgasreinigung. Der sparsame Betrieb, den diese Art der Gemischbildung ermöglicht, kommt durch den Luftüberschuß bei der Verbrennung zustande. Das bedeutet die Abkehr vom sogenannten stöchiometrischen Gemisch, auch mit  $\lambda=1$  bezeichnet. Dieses Mischungsverhältnis von 1 Teil Kraftstoff zu 14,5 Teilen Luft benötigt der heute übliche Dreiwege-Katalysator, um die limitierten Abgas-Bestandteile umzusetzen.

Der Otto-DI arbeitet jedoch mit 20fachem und noch höherem Luftanteil. Damit können die Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) im Abgas nicht umgewandelt werden. Neue Katalysator-Beschichtungen, die mit diesem sauerstoffhaltigen

Abgas arbeiten können, werden zwar erforscht, doch eine alltagstaugliche Lösung steht noch aus. Also behilft man sich mit einem Trick: Die überschüssigen Stickoxide werden vor oder in dem Katalysator gespeichert und bei fetterem Gemisch mit weniger als 14,5 Anteilen Luft wieder freigesetzt. Solche luftarmen Betriebsphasen entstehen beispielsweise bei hoher Last, können aber auch von der Motorsteuerung als kurze Spitze von wenigen Sekunden erzeugt werden.

### Haben noch Entwicklungsbedarf: Sensorik und Speichermaterial

So einfach das Prinzip in der Theorie scheint, so schwierig ist es in der Praxis zu beherrschen. Im wesentlichen sind es drei Hürden, die im

Weg stehen: Erstens fehlen noch geeignete Sensoren, die den Ladezustand des  $\text{NO}_x$ -Speichers hinlänglich genau erkennen können. Zweitens reagieren seine Speichermetalle auf zuviel Schwefel im Kraftstoff ähnlich empfindlich wie der klassische Katalysator auf Blei. Der Sprit an den deutschen Tankstellen enthält derzeit aber rund zehnmal soviel Schwefel, wie dem Speicherkatalysator zugemutet werden kann. Und drittens sind die Speichermaterialien noch nicht so temperaturfest, wie sie für einen alltagstauglichen Betrieb sein müßten.

Wenn diese Probleme so gelöst sind, daß sie auch den hohen BMW Anforderungen gerecht werden, rückt der Ottomotor mit Direkteinspritzung in greifbare Seriennähe. Die BMW Entwickler sind da sehr zuversichtlich.

ALex – Aktuelles Lexikon

„Ottomotorenentwicklung“

© BMW AG, AK-3, November 1998

## Funktionsprinzip $\text{NO}_x$ -Speicher-Katalysator

