

# Die Schwerpunkte der Otto-Motoren-Entwicklung von Mercedes-Benz

## *The (main) Objectives of Gasoline Engine Development at Mercedes-Benz*

Dipl.-Ing. Peter **Lückert**, Dipl.-Ing. Gerhard **Doll**, Dr.-Ing. Norbert **Merdes**,  
Dipl.-Ing. Anton **Waltner**, Dr.-Ing. Torsten **Eder**  
Daimler AG, Stuttgart

### **Zusammenfassung**

Neben einer erweiterten Downsizingstrategie im 4-Zylindersegment mit dem turboaufgeladenen 1,8 l Direkteinspritzer M 271 Evo setzt Mercedes Benz mit Einführung der neuen BlueDIRECT-Motorengeneration im Segment der V6- und V8- Otto-Motorisierungen neue Maßstäbe in Sachen Verbrauch, Fahrperformance und Komfort.

Hierbei stellt neben einer konsequenten Verringerung der Reibleistung, einer Reduzierung der Antriebsleistung von Nebenaggregaten sowie eines integrierten Öl- und Kühlmittel-Wärmemanagements die Direkteinspritzung mit strahlgeführter Verbrennung mittels Piezo-Injektoren eine zentrale Technologie dar, wie sie Mercedes-Benz bereits seit 2006 erfolgreich am Markt einsetzt.

Die konsequente Weiterentwicklung führte hierbei zur 3. Generation des Mercedes-Benz Brennverfahrens mit neuen, erweiterten Einspritz-Betriebsstrategien, sowohl für den Magerbetrieb als auch als homogenes Brennverfahren, unterstützt durch die Kombination mit einer Mehrfachfunkenzündung, die erweiterte Verbrauchspotenziale ermöglicht und ein hohes Zukunftspotenzial bietet.

Sowohl für saugmotorische Auslegungen als auch in Kombination mit Abgas-turboaufladung als homogenes und geschichtetes Brennverfahren können weitere Verbrauchspotenziale in Verbindung mit Downsizing dargestellt werden.

Einem modularen Einsatz dieser innovativen und zukunftsweisenden Technologien kommt hierbei nicht nur unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine besondere Bedeutung zu, sondern er ist auch Voraussetzung für die Umsetzung des hohen Qualitätsanspruchs der Marke Mercedes Benz seinen Kunden gegenüber. Ebenso ist er die Grundlage für weitere, zukünftige Anwendungen als Basis der Technologiestrategie bei den Ottomotoren zur Umsetzung nachhaltiger Verbrauchspotenziale in allen Fahrzeugsegmenten.

Die Einführung der BlueDIRECT-Otto-Motorengeneration unterstreicht die Zielsetzung Green Leadership und macht Mercedes-Benz zum Benchmark hinsichtlich Verbrauch in allen Segmenten mit 6- und 8-Zylinder Otto Motorisierungen.

## **Summary**

Mercedes-Benz raises the bar in terms of consumption, performance and comfort with the introduction of its next generation of V6 and V8 gasoline engines with BlueDIRECT technology, in addition to the company's continued strategy of downsizing in the 4-cylinder segment with its turbocharged, 1.8-liter M 271 Evo unit featuring direct injection.

Direct injection with spray-guided combustion via piezo injectors represents a key technology that Mercedes-Benz has offered customers since 2006 and integrates with ongoing efforts to reduce friction loss and the input power required by auxiliary equipment as well as active oil and coolant management.

Continued development has since led to the third generation of the Mercedes-Benz combustion system, which encompasses new, enhanced injection strategies for lean-burning and homogeneous combustion and is facilitated by multiple-spark ignition for even greater fuel savings and a promising future.

Further reductions in consumption can also be achieved with downsizing as it applies to naturally-aspirated and turbocharged engines employing homogeneous and stratified injection.

Modular application of these innovative and trend-setting technologies is not only attractive from an economical standpoint, but it is also a requirement that must be met in order to achieve the high level of quality customers associate with the Mercedes-Benz brand. As well it establishes the basis for additional applications that will help to ensure the sustained low fuel consumption of gasoline engines in all vehicle segments.

The launch of the next generation of gasoline engines, with BlueDIRECT technology, underscores the company's commitment to green leadership and makes Mercedes-Benz the benchmark with respect to consumption in all vehicle segments offering six- and eight-cylinder gasoline engines.

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der in den letzten Jahren geführten intensiven Diskussion zum Klimawandel in allen Teilen der Gesellschaft und der Zielsetzung eine nachhaltige Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen umzusetzen hat sich die Antriebsentwicklung in allen Fahrzeugsegmenten und für nahezu alle weltweiten Absatzmärkte auf die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs fokussiert.

Für Mercedes-Benz bilden hierbei die Weiterentwicklung der konventionellen Antriebe neben der Elektrifizierung des Antriebsstrangs durch eine Hybridisierung bis hin zum emissionsfreien Fahren mittels E-Antrieb bzw. der Brennstoffzelle sowie die verstärkte Anwendung von alternativen Kraftstoffen die Technologie-Roadmap für eine nachhaltige Mobilität, die den Anforderungen an Green Leadership der Daimler AG Rechnung trägt.

Der Weiterentwicklung konventioneller Antriebe kommt aufgrund ihrer Marktdurchdringung als dem mit Abstand größten Stellhebel bei der Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen eine besondere Bedeutung zu.

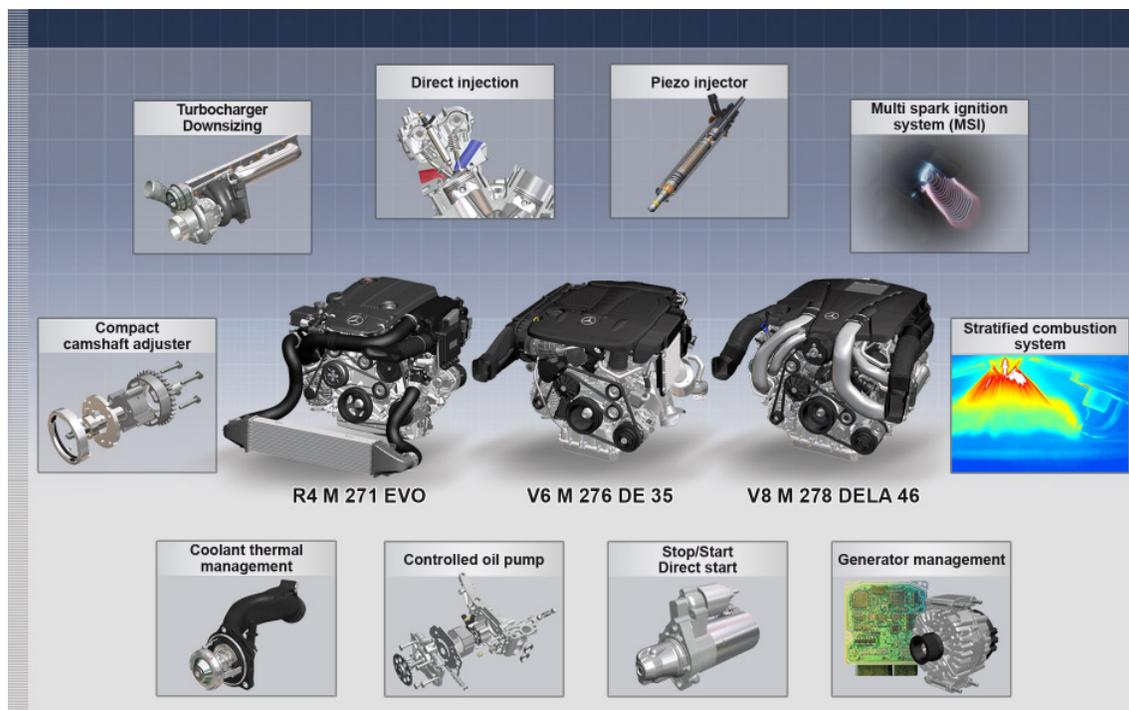


Abb. 1: Technologieportfolio Ottomotoren  
*Technology portfolio gasoline engines*

Insbesondere innerhalb der Ottomotorenentwicklung wurden bei Mercedes-Benz in den letzten drei Jahren die Weichen für ein innovatives Technologie-Portfolio gestellt (Abb. 1), das dem Anspruch auf eine nachhaltige Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs in allen Fahrzeugsegmenten gerecht wird, ohne hierbei Abstriche am Komfort oder der souveränen Antriebsperformance zu machen.

Neben der bereits in 2009 mit dem 1,8l 4-Zylinder mit Abgasturboaufladung und Direkteinspritzung begonnenen erweiterten Downsizing-Strategie eine flächen-deckende Einführung des neuen innovativen Technologieportfolios aus strahl-geführten Verbrennung mit Direkteinspritzung der 3. Generation, Mehrfachfunken-zündung sowie einem integrierten Nebenaggregate- und Wärmemanagement, beginnend mit der neuen V6 und V8 Motorengeneration unter der Bezeichnung BlueDIRECT, die aktuell in den Markt eingeführt wird.

Einem modularen Einsatz dieser innovativen und zukunftsweisenden Technologien kommt hierbei nicht nur unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine besondere Bedeutung zu, sondern ist auch Voraussetzung für die Umsetzung des hohen Qualitätsanspruchs der Marke Mercedes Benz gegenüber unseren Kunden.

Die Schwerpunkte der Ottomotorenentwicklung bei Mercedes Benz betreffen hierbei die drei Bereiche

- Brennvorfahrensentwicklung
- Downsizing / Aufladung
- Reduzierung von motorischen Verlustleistungen .

## **2 Brennvorfahrensentwicklung**

Neben der Entwicklung des in 2009 im 4-Zylindersegment eingeführten Direkt-einspritzverfahrens mit seitlicher Injektorlage in Kombination mit einer Abgasturboaufladung lag der Schwerpunkt insbesondere in der Weiterentwicklung des strahlgeführten Brennvorfahrens, das als sogenannte 2. Generation im CLS 350 CGI in 2006 Weltpremiere hatte und auf die 6-Zylinder Ottomotorisierungen der C- und E-Klasse ausgeweitet wurde.

Mit der Einführung der neuen V6- und V8-Motoren-Generation im Herbst dieses Jahres bringt Mercedes-Benz nun die 3. Generation der Direkteinspritzung in den Markt. Damit konnte eine nochmalige signifikante Effizienzsteigerung erzielt werden.

### **2.1 Konstruktive Grundlagen / Zylinderkopf- und Brennraumkonzept**

Konstruktive Basis des strahlgeführten Mercedes-Benz Brennvorfahrens ist die zentral angeordnete Injektorlage mit einem nach außen öffnenden Piezo-Injektor.

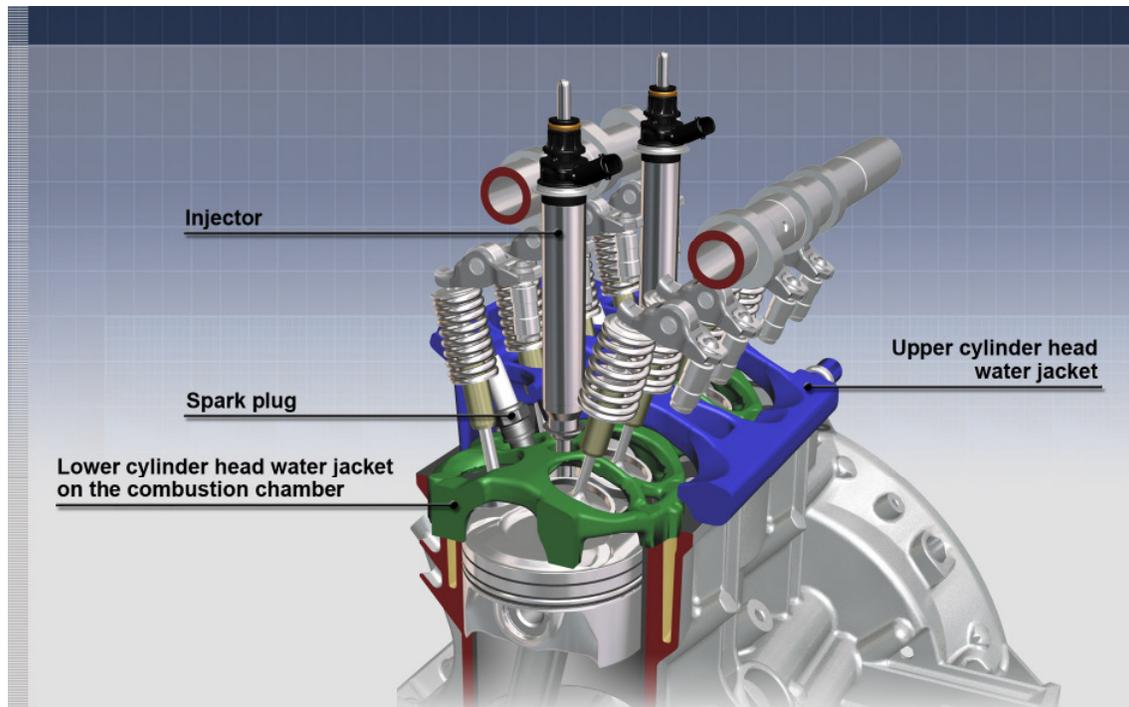


Abb. 2: Zylinderkopfkonzep V6/V8  
*Concept of cylinder head V6/V8*

Die zentrale Lage des Piezo-Injektors in Kombination mit seinen sehr guten Primäraufbereitungseigenschaften ist Grundlage für eine außerordentlich gute Homogenisierung des Kraftstoff/Luft-Gemisches im Brennraum, wobei sich mit dieser Anordnung auch eine sehr geringe Penetration der Brennraumwände mit Kraftstoff ergibt. Dies ist Grundlage für eine schnelle und vollständige Verbrennung, die zu einer geringen Klopfneigung gegen Ende der Verbrennung und niedrigen Emissionen führt.

Um im Zylinderkopf eine effiziente Kühlung besonders für erhöhte Anforderungen in Verbindung mit der Turboaufladung umzusetzen ist der Wassermantel zweiteilig ausgeführt. Das Brennraumdach wird hierbei durch einen Wassermantel mit geringen Querschnitten und hohen, turbulenten Strömungsgeschwindigkeiten, optimal gekühlt, während der obere Wassermantel durch seine größeren Querschnitte für eine gute Entdrosselung des gesamten Kreislaufs sorgt und damit eine reduzierte Antriebsleistung der Wasserpumpe ermöglicht.

Mit dem Piezo-Injektor können sehr geringe Kraftstoffmengen in kurzen Abständen reproduzierbar ohne nennenswerte Mengenvarianz eingespritzt werden. Dies ermöglicht Einspritzstrategien u. a. im Schicht- und Homogen-Schicht-Betrieb, die so mit keinem andern Einspritzsystem darstellbar sind. Die A-Düse des Piezo-Injektors zeichnet sich durch eine sehr stabile und reproduzierbare Strahlentwicklung aus, die Voraussetzung für einen robusten Schichtbetrieb ist. Darüber hinaus ermöglichen der hohe Durchfluss der A-Düse und die kurzen Schaltzeiten des Piezo-Aktors eine

große Mengenspreizung, womit das Einspritzsystem auch für zukünftige Kraftstoffe mit geringeren Heizwerten schon jetzt geeignet ist.

Bei der neuen V6 und V8 BlueDIRECT Motorengeneration bildet die Zündkerze im Hinblick auf eine optimale Benetzung im Kleinstmengenbereich als Basis für ein stabiles Schichtbrennverfahren einen Winkel von 22 Grad zum Injektor bei einem Bohrungs-Durchmesser von 92,9 mm (Abb. 3).

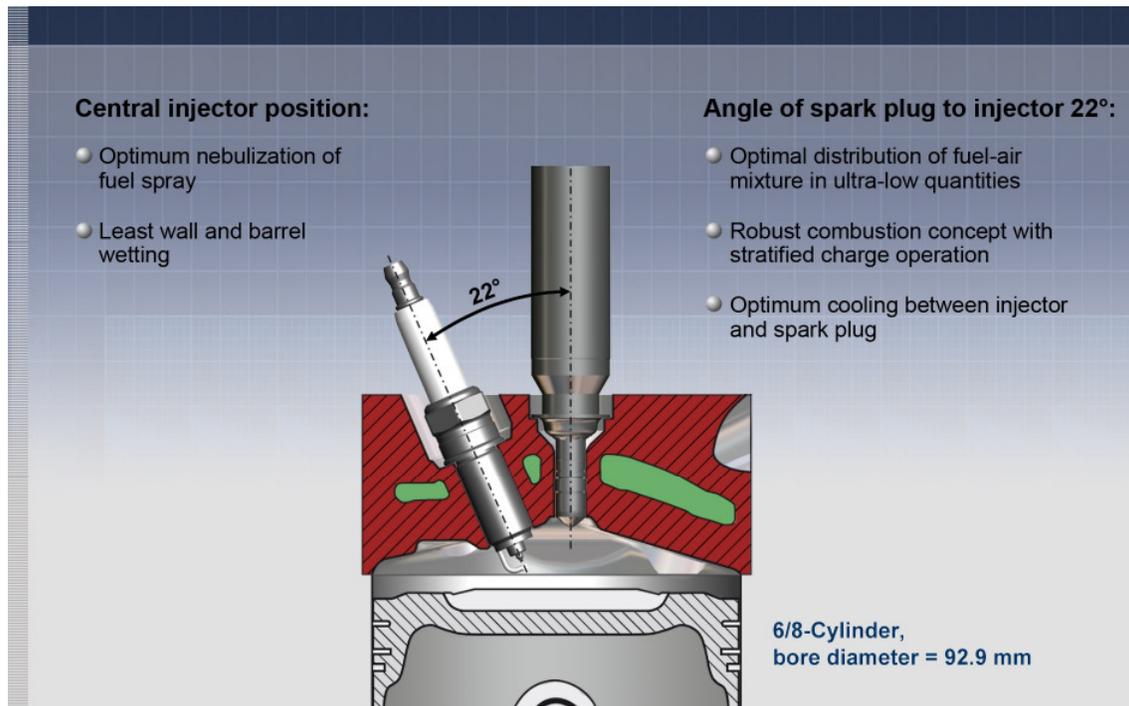


Abb. 3: Brennraumgeometrie V6/V8-Motorisierung  
*Geometry of the combustion chamber of V6/V8-engine versions*

Darüber hinaus bietet diese Winkelanordnung die Möglichkeit einer optimalen Kühlung zwischen Injektor und Zündkerze, was insbesondere bei der Verbindung von Mehrfachfunkenzündung und Aufladung von Bedeutung ist. Bei der Übertragung des Brennverfahrens auf Geometrien mit kleineren Bohrungen ist besonders die Darstellung einer optimalen Gemischaufbereitung in Zündkerzennähe bei Magerbrennverfahren mit dem Auswandern der Zündkerzenposition aus der Mitte von Bedeutung. Auf Basis von Simulationen zur Kinematik der Ladungsbewegung als auch durch diverse Einzylinderuntersuchungen zeigen sich Anordnungen mit weiterhin zentraler Injektorlage und außermittiger Zündkerzenanordnung zur heißeren Auslassseite hin mit einem steileren Winkel von 31 Grad als zielführend.

Die sehr gute Gleichverteilung des Temperaturniveaus im Brennraumdach auf Basis der Bohrung 92,9 mm beim V6 bzw. V8 konnte durch entsprechende Optimierung der Wassermantelgeometrie bereits auf Basis von numerischen Simulationen soweit optimiert werden, dass ein, zur großen Bohrung, vergleichbares Niveau erzielt

werden konnte. Im Vergleich dazu ist in Abb. 4 die Simulation der Temperaturverteilung am aktuellen 4-Zylinder M 271 Evo mit seitlicher Injektorlage dargestellt.

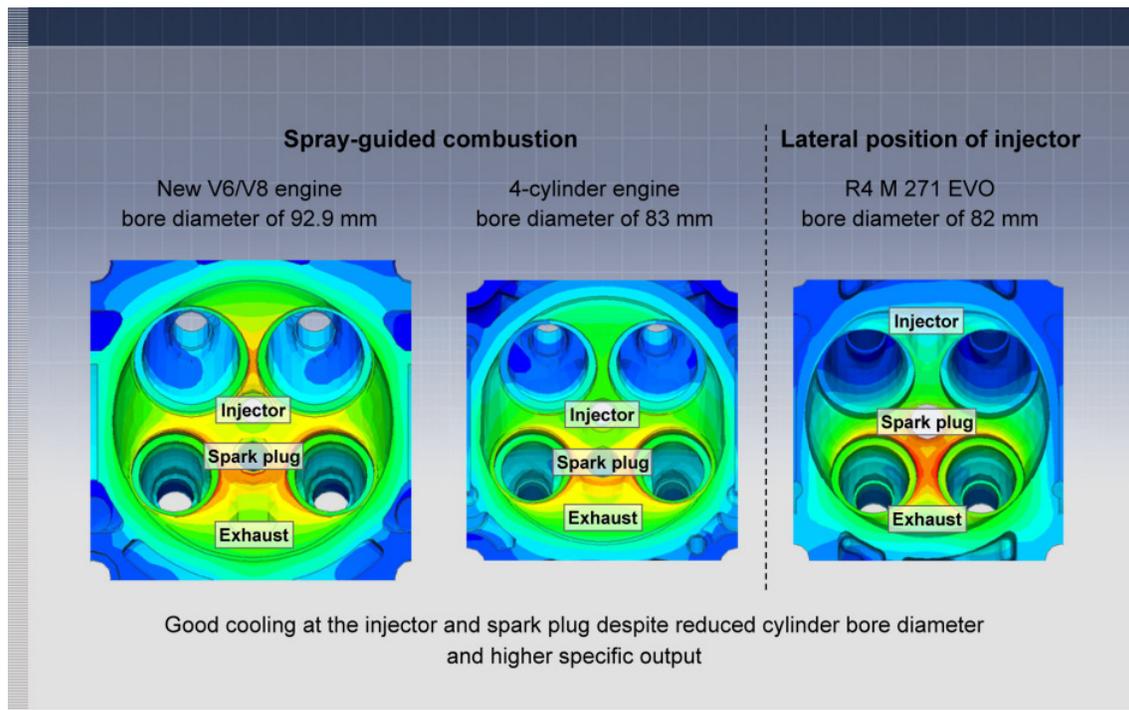


Abb. 4: Temperaturverteilung Zylinderkopf  
*Distribution of temperatures in the cylinder head*

## 2.2 Einspritzstrategie

Die Bedeutung einer Mehrfacheinspritzung für eine optimale Steuerung des Brennverfahrens ist ebenfalls beim Übergang auf kleinere Geometrien substantiell. Gegenüber einer Einfacheinspritzung können bei vergleichbarem Lambda durch eine Mehrfacheinspritzung die Nachteile einer Wand- und Kolbenbenetzung deutlich reduziert werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings die hohe Präzision des Timings ebenso wie eine reproduzierbare und geringe Kleinstmengenvarianz, deren Potenziale mit dem Piezo-Injektor in idealer Weise umgesetzt werden können.

Welche Verbesserungen hierdurch erzielbar sind zeigt beispielhaft die Gemisch-aufbereitung in der Katheizphase (Abb.5).

Ausgehend von einer 3-fach-Einspritzung kann die relative Partikelanzahl mittels Piezo-Injektor um über 60% gegenüber der Mehrlochdüse reduziert werden. Die Serienapplikation des neuen V6 liegt mit einer 5-fach Einspritzung sogar um über 80% unter dem Niveau der Basis mit Mehrlochventil (MLV). Aufgrund der sehr guten Kleinstmengenfähigkeit besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Einspritzungen noch weiter zu erhöhen. So kann mit einer 8-fach-Einspritzung die relative Partikelanzahl

sogar um über 95% reduziert werden, was als wichtige Basis zur Erfüllung zukünftiger Abgasgesetzgebungen dient.

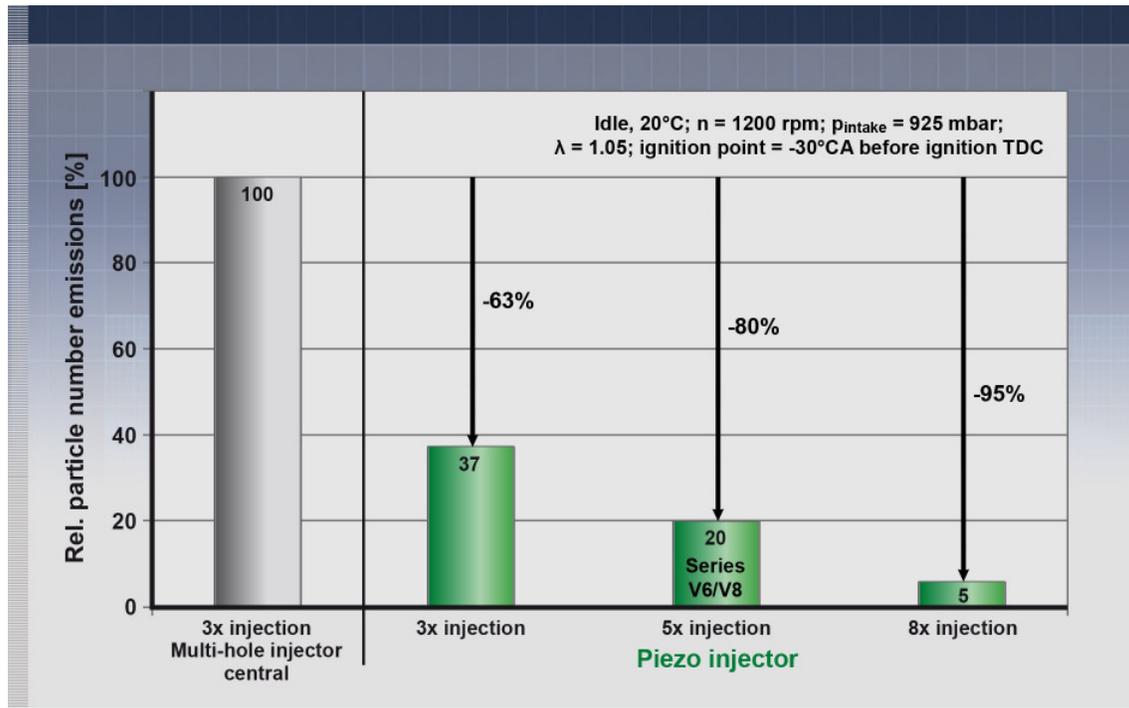


Abb. 5: Reduktions-Potenziale Piezo-Mehrfacheinspritzung auf Partikelemissionen  
*Potentials for reduction of particle-emissions by Piezo-multi-injections*

### 2.3 Mehrfachfunkenzündung

Mit den neuen V6- und V8-Motoren wird die strahlgeführte Verbrennung erstmals mit einer Mehrfachfunkenzündung kombiniert. Ziel der Entwicklung war es, insbesondere die Robustheit im Schichtbetriebs weiter zu steigern, um auch unter kritischen Randbedingungen zum Zündzeitpunkt eine sichere Entflammung zu gewährleisten, sodass Betriebspunkte des Motors genutzt werden können, die eine weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen zulassen.

Das Konzept der eingesetzten Mehrfachfunkenzündung basiert auf einer Flexibilisierung der Energiezufuhr, d.h. die gespeicherte Energie des Zündtransformators auf das für den ersten Funkendurchbruch nötige Maß zu beschränken und nach dem Funkendurchbruch in kurzer zeitlicher Abfolge die Brennphase des Funkens mit nachgelieferter Energie aus der Spule zu unterstützen. Diese Art der zweiphasigen Energiebereitstellung wird als „schnelle Mehrfachzündung“ bzw. schnelle „Multi-Spark-Ignition (MSI)“ bezeichnet. Mit steigender Anzahl von Folgefunkens, d.h. mit wachsender Gesamtenergie, bildet sich ein Plasmakanal mit großer räumlicher Ausdehnung und Dichte aus. Die MSI basiert auf der Optimierung

von konventionellen Zündungskomponenten (Spule-Boot-Zündkerze). Über die Ansteuerung der MSI kann die Zeit bis zu einem Folgefunkens als auch die Brenndauer für den jeweiligen Betriebspunkt optimal angepasst werden. Die signifikante Performancesteigerung konnte auf Basis einer 12V-Bordnetz-Versorgung unter Reduzierung des Bauraumes und des Gewichtes dargestellt werden.

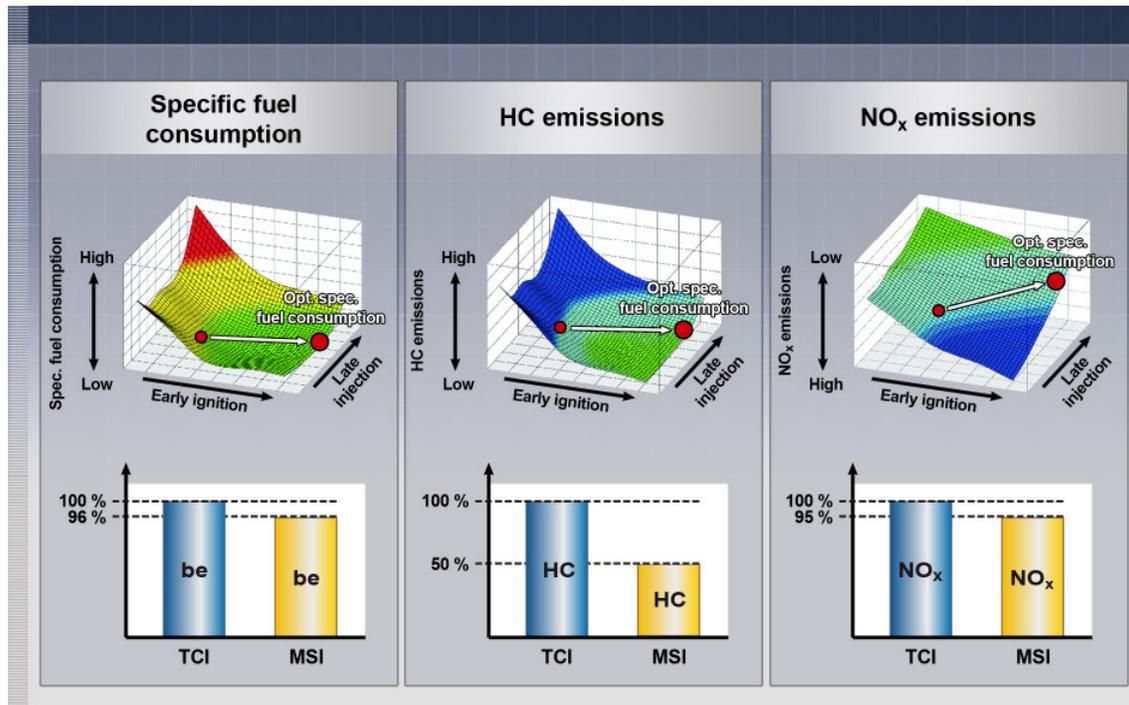


Abb. 6: Verbesserungspotenzial Verbrauch und Emissionen durch Mehrfachzündung  
*Potential for improvement of fuel consumption and emissions by multi-spark-ignition*

Durch den Einsatz der MSI wird das bereits sehr große Robustheitsfenster des Mercedes-Benz Brennverfahrens nochmals deutlich erweitert. Betriebspunkte mit kritischen Entflammungsbedingungen durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder hohen Kraftstoffeintrag an der Zündkerze mit der Gefahr eines sporadischen Erlöschens des Zündfunkens können durch die schnelle Ausbildung von Folgefunkens stabilisiert werden. Dies ermöglicht die Verlegung des Applikationspunktes hin zu thermodynamisch günstigeren Betriebspunkten und somit eine weitere Reduzierung sowohl des spezifischen Kraftstoffverbrauchs als auch der NO<sub>x</sub>- und der HC-Rohemissionen.

In Abb.6 ist das Verbesserungspotenzial im Lastpunkt 1800/min und  $p_{mi}=5,5$  bar dargestellt. Durch die Verlagerung der Verbrennung in thermodynamisch günstigere Betriebspunkte werden im stationären Motorbetrieb Verbrauchsreduzierungen von ca. 4% bei gleichzeitiger Verbesserung der Stickoxidemissionen um ca. 5% und eine Absenkung der HC-Emissionen um ca. 50% erzielt. Die teilweise deutlichen

Verbesserungen lassen sich reproduzierbar darstellen, wenn die Zündung während der Einspritzung abgesetzt und das Risiko des Erlöschens des Funkens durch die Ausbildung von Folgefunken minimiert wird.

Mit Hilfe der schnellen Mehrfachfunkenzündung ist so eine weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im NEFZ von ca. 2% durch Optimierung der Verbrennungsschwerpunktlage gegenüber der bisherigen Serienapplikation des E 350 CGI mit der Direkteinspritzung der zweiten Generation möglich geworden.

## 2.4 Neue Betriebsarten

Während beim bisherigen V6 M 272 DE 35 nur der Homogen- und Schichtbetrieb genutzt wurden, kommen nun mit der Einführung der 3. Generation der Direkteinspritzung die neuen Betriebsarten Homogen-Schicht (HOS) und Homogen-Split (HSP) zum Einsatz.

In Abb. 7 sind die Bereiche für die verschiedenen Betriebsarten des M 276 DE 35 dargestellt; rechts daneben eine vereinfachte Darstellung der Einspritzstrategien.

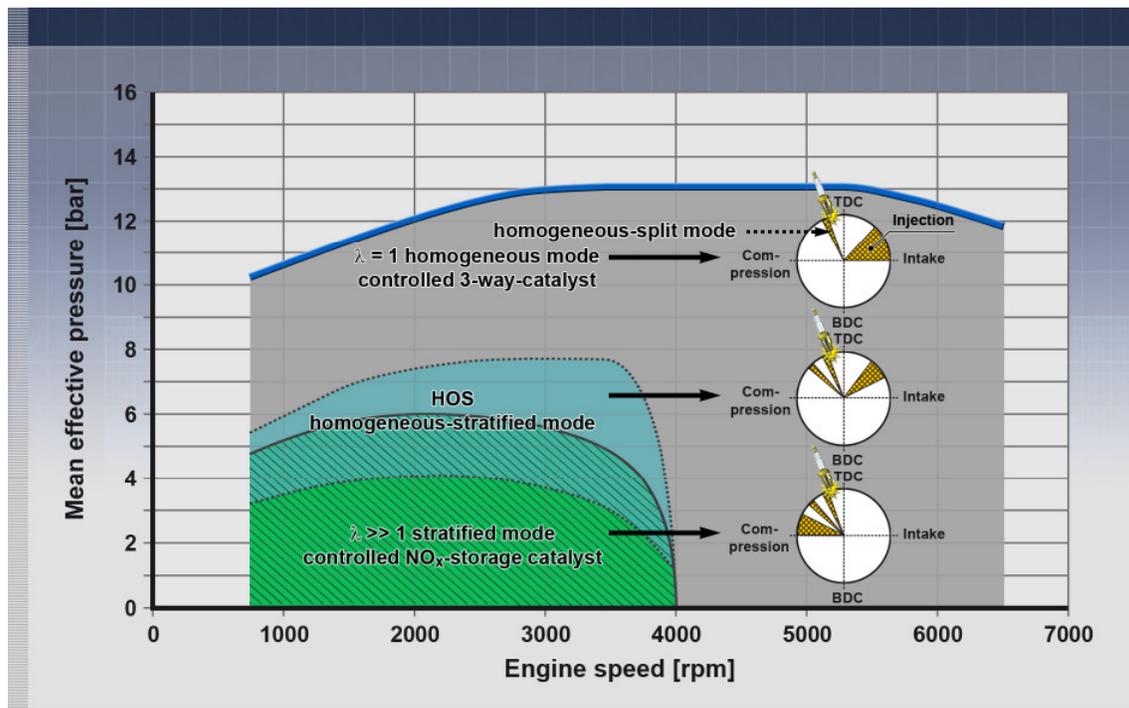


Abb. 7: Die Betriebsarten im Motorkennfeld am Beispiel des V6 M 276  
*The operating modes in the engine map by way of example V6 M 276*

### 2.4.1 Homogen Schicht (HOS)

Beim V6 M 276 DE 35 konnte mit dem Einsatz des strahlgeführten Mercedes-Benz Brennverfahrens in Kombination mit der MSI der nutzbare Kennfeldbereich, in dem der Motor mit magerem Gemisch betrieben werden kann, ausgeweitet werden. Mit steigender Last nimmt im Schichtbetrieb das Luft/Kraftstoff-Verhältnis im Brennraum ab, wodurch lokal sehr inhomogene Gemischverteilungen entstehen. Um diese Problematik zu umgehen und zusätzlich den „Mager“-Betriebsbereich ausweiten zu können, wurde die Betriebsart Homogen-Schicht entwickelt. Wie der Name ausdrückt, wird hier eine Kombination aus Saughub- und Kompressionshubeinspritzung genutzt, um innerhalb eines mageren, homogenen Grundgemisches im Kerzenbereich eine Ladungsschichtung zu erzeugen,

Welche Verbrauchsvorteile mittels HOS erreicht werden können, ist in Abb. 8 dargestellt. Aufgrund der günstigeren Gemischzustände, wird in der Betriebsart HOS bereits ab einer Last von  $p_{me}=4$  bar der gleiche Verbrauch erzielt wie im klassischen Schichtbetrieb. Wird die Last weiter erhöht, ergeben sich deutliche Vorteile für die neue Betriebsart, die beim M 276 DE 35 bis zu einer Last von  $p_{me}=7$  bar aufgrund der Lambda-Grenze genutzt werden kann. Bei aufgeladenen Motoren bestimmt dagegen die Auslegung des Aufladeaggregates die Lastgrenze. Bei Lasten  $p_{me}$  kleiner 4 bar weist nach wie vor der Schichtbetrieb die größten Verbrauchspotentiale auf.

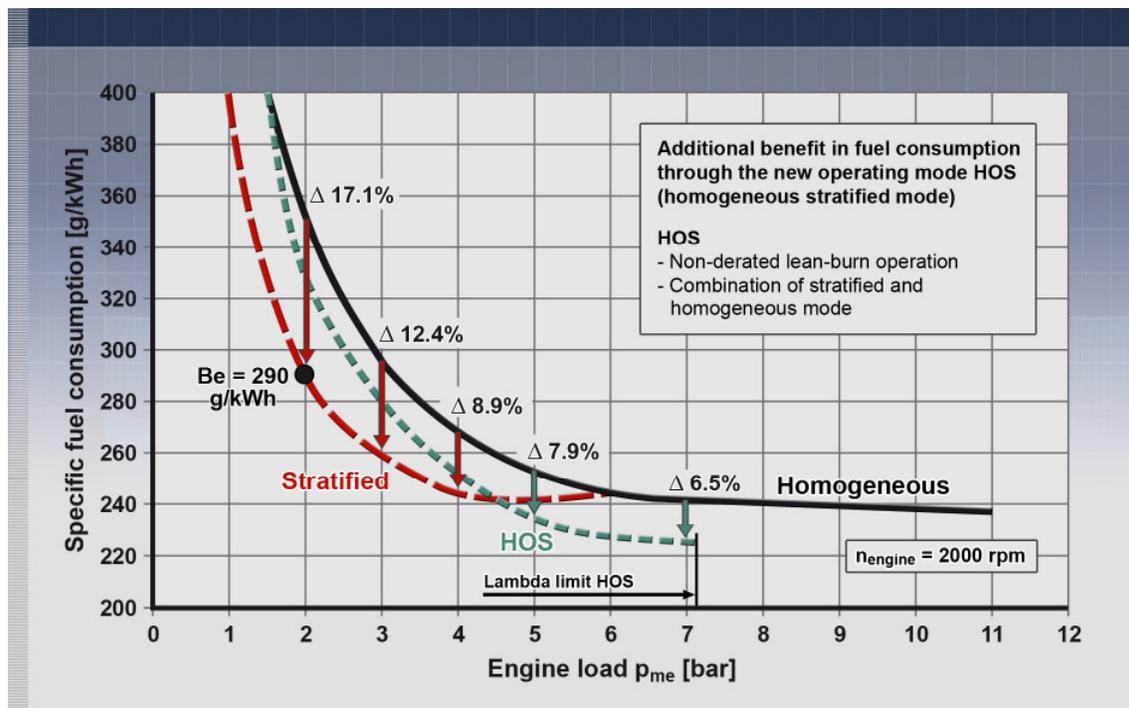


Abb. 8: 3,5l V6: Zusätzlicher Verbrauchsvorteil durch HOS bei 2000 1/min  
 3,5l V6: Additional advantage of fuel consumption by HOS at 2000 rpm

### **2.4.2 Homogen Split (HSP)**

Um im Homogenbetrieb z. B. die Ladungswechselerluste zu minimieren, werden die Motoren in der Regel mit möglichst hohen Restgasraten betrieben. Nachteil hierbei ist, dass u. a. die Zyklenstreuung deutlich zunimmt und sich somit ein rauher Motorlauf ergibt. Mit der ebenfalls neuen Betriebsart „Homogen-Split“ (HSP) können auf Basis des homogenen Brennverfahrens die Zyklenschwankungen unter schwierigen Brennbedingungen signifikant reduziert werden.

Hierbei handelt es sich grundsätzlich um eine homogene stöchiometrische Verbrennung bei der über 95 % der Menge im Ansaughub einfach oder mehrfach eingespritzt wird und eine sehr kleine „Zünd“-Einspritzung zur Stabilisierung der Verbrennung.

Es zeigt sich, dass es unter Ausnutzung der speziellen Eigenschaften der Piezo-Einspritztechnik gelungen ist, neue Einspritzstrategien zu entwickeln, die in Kombination mit der MSI neue Verbrauchspotenziale erschließen. Es sind je nach Fahrzyklus dadurch zusätzlich bis zu 4% Verbrauchseinsparungen möglich.

### **2.5 Kombination mit Aufladung**

Wie in Abb. 8 gezeigt, begrenzt bei einem Saugmotor die Lambda-Grenze den möglichen Lastbereich im HOS-Betrieb. Vergleichbar dem Dieselmotor, kann auch beim Ottomotor mittels Aufladung der Lastbereich der Magerbrennverfahren deutlich ausgeweitet werden, sodass die Grenzen des HOS Betriebs auf ein Lastniveau von ca.  $p_{me}=12$  bar am Beispiel eines V6 Motors verschoben werden kann. Damit lassen sich auch oberhalb der heute gültigen Testzyklen nennenswerte Verbrauchsvorteile erzielen, mit entsprechenden zusätzlichen Vorteilen für den Kundenbetrieb mit höheren Lastanteilen (Abb. 9).

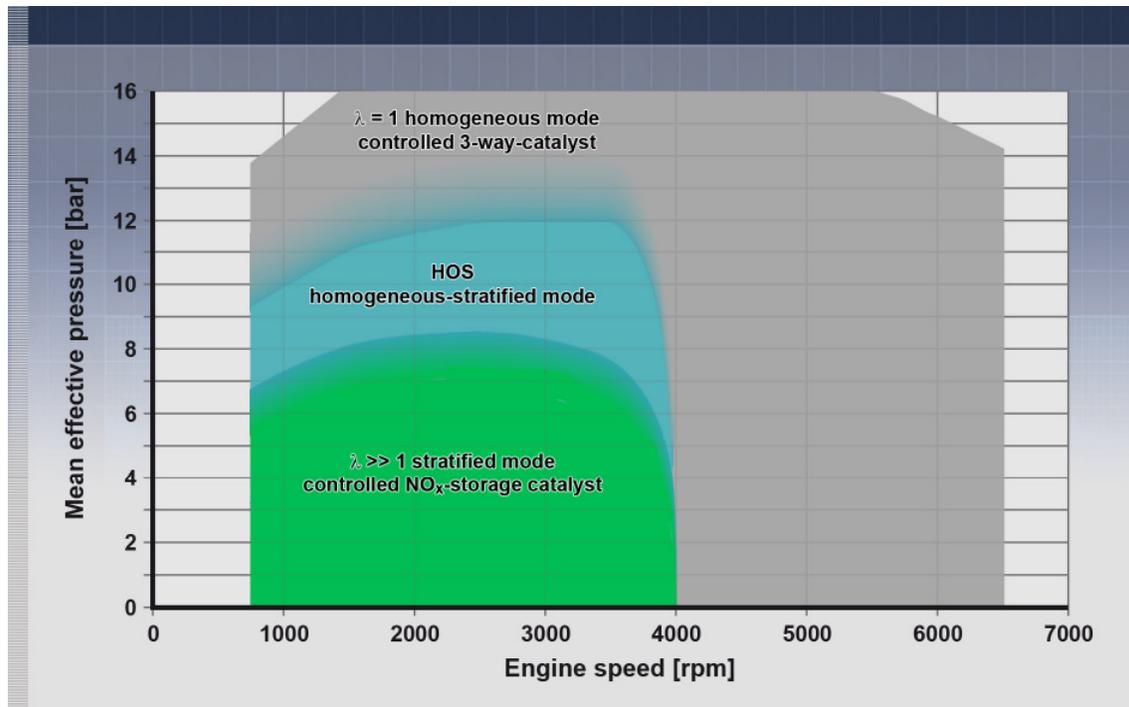


Abb. 9: Erweiterung Schichtlade- und HOS-Betrieb bei Aufladung  
*Extension of stratified-charge- and HOS-operation-areas with turbocharging*

## 2.6 HSP in Kombination mit variabler Ventilhubsteuerung

In Abb. 10 wird aufgezeigt, welche Vorteile in der Gemischaufbereitung sich mit der Homogen-Split Betriebsart in Verbindung mit einer variablen Ventilhubsteuerung darstellen lassen. Hier sind für einen 1,6l 4-Zylinder Motor mit strahlgeführten Brennverfahren und einer Einlaßventilhubumschaltung unterschiedliche Maßnahmen der Turbulenzsteigerungen zur Verbesserung der AGR-Verträglichkeit dargestellt. Gegenüber Maskierungen oder einem Ventilhubphasing, kann mittels HSP die mit Abstand höchste Turbulenzsteigerung erzielt werden. Dieses Beispiel zeigt, dass es unter Verwendung eines Piezo-Injektors mit einer nach außen öffnenden Düse möglich ist, Turbulenz-Niveaus über die Einspritzung zu generieren, was sonst nur mit größeren Eingriffen in die Einlasskanal- (Tumble-Blech) oder Brennraumgeometrie (z. B. Maskierung) möglich ist, wobei letztere immer mit Füllungs- nachteilen einher gehen.

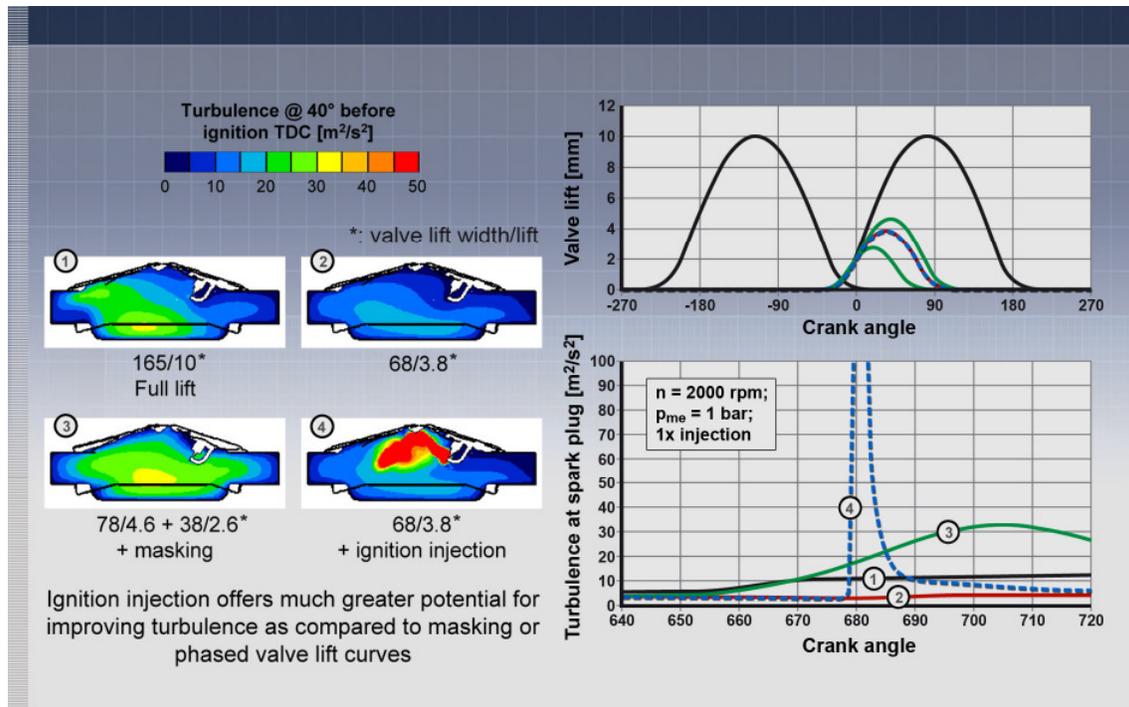


Abb. 10: Potenziale der Zündeneinspritzung (HSP) bei variabler Ventilhubsteuerung  
*Potentials of ignition injection (HSP) at variable valve lift operation*

### 3 Downsizing / Aufladung

#### 3.1 Vierzylinder-Motorisierung M 271 Evo

Bereits seit 2002 setzt Mercedes-Benz mit dem M 271 durchgängig in allen Fahrzeugen mit RWD-Antrieb einen kompressor aufgeladenen 1,8l 4-Zylinder-Ottomotor ein. Mit einem Leistungsspektrum von 115 kW bis zu 135 kW und einem Drehmoment bis zu 250 Nm stellte dieses Aggregat bereits seit Jahren eine sehr erfolgreiche Downsizingstrategie mit guten Verbrauchs- und Fahrleistungswerten dar.

Im Rahmen der Weiterentwicklung dieses Aggregates wurden mit dem M 271 Evo in 2009 die durchgängige Direkteinspritzung mit seitlicher Injektorlage und Mehrlochentilen sowie die Umstellung auf eine Abgasturboaufladung vorgenommen.

Durch die innere Gemischbildung und den Einsatz von schnellen Phasenstellern auf der Ein- und Auslassseite war es möglich, mittels Darstellung eines positiven Spülgefälles im instationären Niederdrehzahlbereich, das sogenannte Scavenging, ein dem bisherigen Kompressor im Kundenbetrieb vergleichbares Ansprechverhalten zu ermöglichen.

Zur optimalen Ausnutzung der Abgasenthalpie erfolgte eine Auslegung auf eine maximale Abgastemperatur von 1050 Grad C.

Mit unveränderten Hubraum von 1.8 l konnte damit das Leistungsspektrum auf bis zu 150kW gesteigert werden, insbesondere jedoch das Drehmoment auf 310 Nm, bereits bei knapp unter 2000 1/min angehoben werden. Aufgrund der Umstellung auf Direkteinspritzung konnte trotz der Erhöhung des Aufladegrades die Verdichtung von 8,5 auf 9,3 : 1 gesteigert werden, womit eine deutliche Effizienzsteigerung und damit Verbrauchsreduzierung möglich wurde.

### **3.2 Neue V8 Motorengeneration BlueDIRECT M 278**

Mit Einführung der neuen V6- und V8-Motoren ab diesem Herbst setzt Mercedes-Benz ebenfalls im Topsegment der Achtzylindermotorisierung mit dem neuen 4,6l V8 M 278 ein Hubraum-Downsizing und eine Abgasturboaufladung um.

In Verbindung mit dem strahlgeführten Brennverfahren mit Direkteinspritzung der 3. Generation, der Mehrfachzündung und einer Biturboaufladung mit einem Waste Gate Abgasturbolader pro Zylinderbank war es möglich eine besonders verbrauchs-effiziente Aufladung darzustellen mit einem Instationärverhalten das in diesem Segment neue Maßstäbe setzt.

Die Auslegung verfolgte hierbei das Ziel, einerseits trotz Aufladung einen sehr guten Teillastwirkungsgrad zu erhalten und andererseits ein, dem hubraumgrößerem Vorgänger Saugmotor, mindestens vergleichbares Ansprechverhalten zu realisieren.

In Verbindung mit der bereits erwähnten zweiteiligen Zylinderkopfkühlung ist hierfür eine hinreichend dimensionierte Ladeluftkühlung auf Basis eines Luft – Wasser Ladeluftwärmetauschers und deren einlasskanalnahe Anordnung eine wichtige Voraussetzung gewesen.

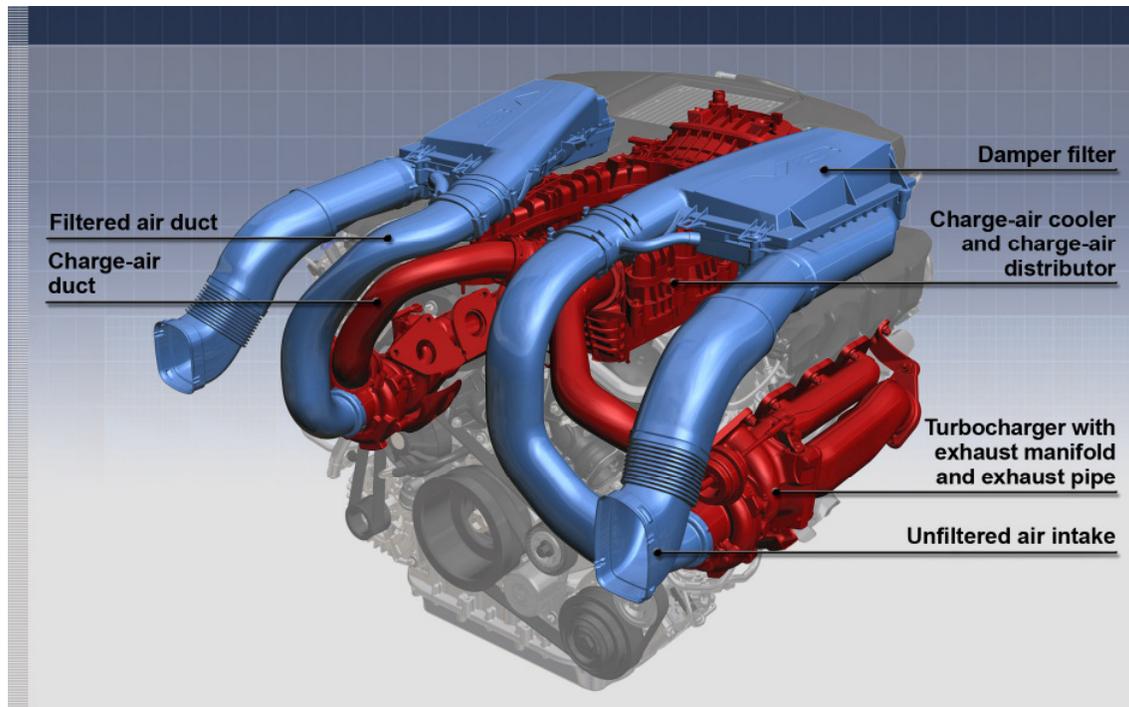


Abb. 11: Anordnung Ladeluftkühler und Aufladeeinheiten beim 4,6 l V8 M 278  
*Arrangement of charge-air cooler and supercharging modules at 4,6 l V8 M 278*

Abb.11 zeigt den kompletten Umfang der Luftführung in seiner sehr kompakten Anordnung, der deutlichen Anteil am guten dynamischen Ansprechverhalten bei Lastanforderungen hat (in blau die Roh- und Reinluftführung, in rot verdichtete Luft, Ladeluftkühlung und Abgasführung).

Da es gelang, die heiße Gasführung mit den Turboladern jeweils außen an den Zylinderköpfen unterzubringen, konnte das groß dimensionierte Ladeluftkühlermodul mit einem Luft-Wasser-Ladeluftkühler und Ladeluftverteiler im Innen-V des Motors, unmittelbar vor dem Zylinderkopfflansch, angeordnet werden.

In dieser Gesamtkonfiguration war es möglich die Grundverdichtung des bisherigen Kanaleinspritz-Saugmotors von 10,5 ebenfalls beim Lademotor beizubehalten, womit ein sehr guter Teillast-Wirkungsgrad umgesetzt werden konnte.

Turbine und Verdichter sind optimiert auf die vorgegebene Konzeptleistung ausgelegt worden und realisieren so einerseits das sehr gute Ansprechverhalten und andererseits ein günstiges Verbrauchsverhalten. Ein weiterer wichtiger Aspekt bezüglich Regelverhalten, Dynamik und Emissionsoptimierung war der Einsatz eines unterdruckbetätigten Waste-Gates, ergänzt um eine mechanische Unterdruckpumpe für eine schnellstmögliche Unterdruckbereitstellung.

Hierdurch konnte auf ein Schubumluftventil am Verdichter verzichtet werden.

Der spezifische Aufladegrad liegt mit knapp 19 bar  $p_{me}$  bzw. 152 Nm/l eher moderat. Hiermit konnte allerdings die signifikant hohe Grundverdichtung von 10,5 :1 bei einer unveränderten Auslegung auf eine Super bleifreie Kraftstoffqualität von ROZ 95 umgesetzt werden, was für den praktischen Kundenbetrieb in diesem Fahrzeugsegment von besonderer Bedeutung ist.

### 3.3 Auflade- und Downsizingstrategie

Im Hinblick auf eine möglichst effiziente Aufladung stellt sich für den klopfbegrenzten Ottomotor in besonderem Maße die Frage nach dem optimalen Aufladegrad, insbesondere im Zielkonflikt zwischen maximalen Drehmoment und Nennleistung. Mit zunehmenden Aufladegrad muss die Verdichtung reduziert werden, wodurch sich der Teillast-Wirkungsgrad verschlechtert, zudem würden auch ggf. erforderliche Verstärkungsmaßnahmen am Triebwerk zu einer zusätzlichen Reibleistung führen.

Der Einfluss des Aufladegrades bei konstant gehaltenem Drehmoment und gleicher Leistungsanforderung ist somit ein entscheidender Parameter für den Verbrauch.

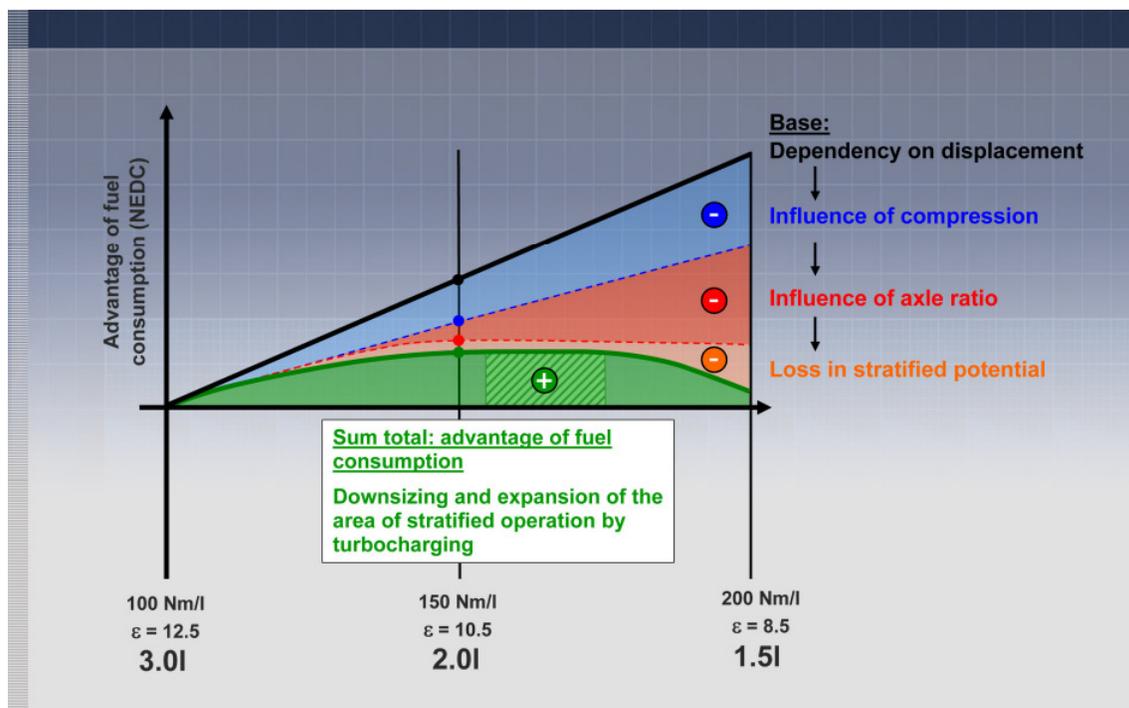


Abb. 12: Downsizingpotenziale in Abhängigkeit vom Aufladegrad und Triebstrangauslegung  
*Potentials of downsizing dependent on supercharging rate and drive-train layout*

Auf Basis von empirisch abgeglichenen Gesamttriebstrangsimulationen, die für die im NEFZ geltenden Betriebsbedingungen als prozentuale Verbrauchverbesserung in Abb. 12 dargestellt sind und sich auf Direkteinspritzmotoren mit jeweils gleicher Kraftstoffauslegung (ROZ95) beziehen, wurde für die relevanten Parameter

- Verdichtungsauslegung
- Achs- bzw. Getriebeauslegung
- Einfluss von Teillastbrennverfahren, hier das Schichtpotenzial,

die Abhängigkeit vom Aufladegrad als ein Maß des Downsizings qualitativ aufgetragen. Prämisse ist hierbei ein vergleichbares Technologieset für ein unverändertes Fahrzeugkonzept.

Die grundsätzliche Verringerung des Hubraums bei gleichzeitiger Aufladung, d.h. das klassische Downsizing bietet hierbei zunächst ein deutliches Verbrauchspotenzial.

Mit zunehmenden Aufladegraden ist jedoch die Grundverdichtung zu reduzieren, wodurch ein Wirkungsgradverlust in der Teillast eintritt.

Ein weiterer gegenläufiger Effekt ist das Anfahrverhalten, das bei konventioneller Aufladung mit abnehmendem Hubraum aufgrund der geringeren Saugvolllast des Grundmotors schlechter wird und eine kürzere Anfahrübersetzung erforderlich macht. Diesem Effekt kann durch zusätzliche Variabilitäten des Turboladers wie zum Beispiel einer zweistufigen Aufladung oder der Kombination aus Turboaufladung und Kompressor begegnet werden.

Der dritte gegenläufige Effekt betrifft die Verringerung des Verbrauchs bei Einsatz eines Teillastbrennverfahrens wie z.B. der Schichtaufladung.

D.h. auf Basis einer einstufigen Abgasturboaufladung und einem Grundmotor mit einer konstanten Verdichtung, die sich naturgemäß an der Volllast orientieren muss, ergibt sich mit dem Anspruch eines zum Saugmotor aus Kundensicht vergleichbaren Ansprechverhaltens eine optimale Verbrauchsauslegung des Downsizings, bzw. des Aufladegrades in der Größenordnung von 150-170 Nm/l bei Magerbrennverfahren und von ca. 170-185 Nm/l bei Brennverfahren mit stöchiometrischen Kraftstoff/Luftgemisch (Abb. 12) .

#### **4 Reduzierung der motorischen Verlustleistungen**

Neben der Optimierung der Brennverfahren, des Ladungswechsels sowie der Aufladung stellt die Reduzierung der Verlustleistung bei den heutigen Verbrennungsmotoren den dritten zentralen Baustein zu Steigerung der Effizienz dar.

Hierbei können im Wesentlichen drei Schwerpunkte unterschieden werden:

1. Reduzierung der mechanischen Verlustleistung durch tribologische Maßnahmen an allen Lagerstellen und Reibpartnern der Laufbahn/Kolben und des Steuerungsantriebs
2. Reduzierung der Verlustleistung im Ölkreislauf und der Nebenaggregate
3. Integriertes Wärmemanagement.

#### 4.1 Ölkreislauf

Im Ölkreislauf der Ottomotoren, beginnend mit dem M 271 Evo werden bei Mercedes Benz geregelte Ölpumpen nach dem Flügelzellenprinzip eingesetzt. Durch die bedarfsgerechte Volumenregelung der Ölpumpen wird die Antriebsleistung deutlich reduziert. Im Vierzylinder Motor M 271 Evo kommt eine Flügelzellenpumpe mit 5 Kammern zum Einsatz, der Regeldruck beträgt 4,2 bar. Bei den neuen V6 und V8 Motoren der BlueDIRECT-Generation kommen Flügelzellenpumpen mit 7 Kammern und zusätzlicher Zweistufenregelung zum Einsatz.

Neben der klassischen Volumenregelung kann bei diesen Pumpen eine Schaltung auf zwei unterschiedlichen Druckniveaus erfolgen, wobei das untere Druckniveau unterhalb des Öffnungsdrucks der Kolbenspritzen liegt, damit kann kennfeldabhängig die Antriebsleistung zusätzlich reduziert werden.

Der V8 M 278 DELA 46 erhält so zum Beispiel ebenso wie der V6 eine Flügelzellen-Ölpumpe mit automatischer Mengenregelung auf Basis zweier kennfeldgesteuerter Hauptkanaldruckstufen.

Durch dieses Regelungskonzept lassen sich die Schmier- und Kühlstellen des Motors abhängig von Motorlast und Motordrehzahl absolut und insbesondere im Teillastbereich mit deutlich niedrigerer Antriebsleistung versorgen als dies mit einer unregelmäßig Pumpen möglich wäre.

Abb. 13 zeigt die Kennfeldbereiche niedrigen und hohen Druckes im Hauptölkanal.

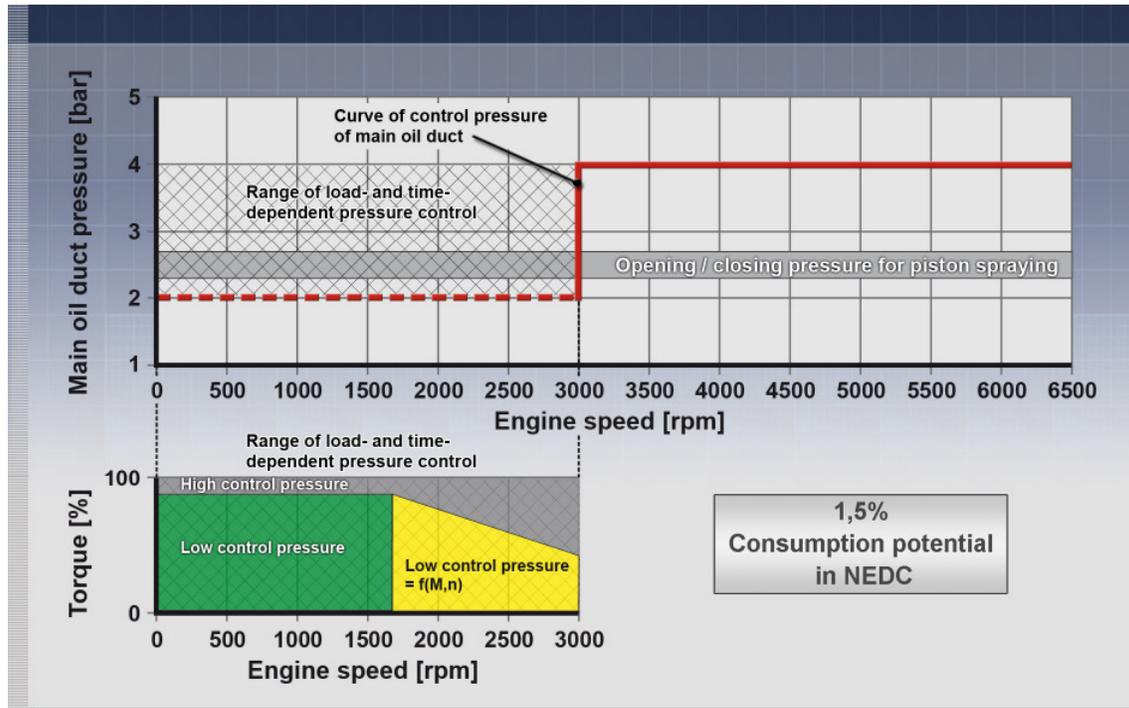


Abb. 13: Kennfeldbereiche niedriger und hoher Druckes im Hauptölkanal  
*Map area of low and high pressure in main oil gallery*

Während in der hohen Druckstufe mit 4 bar alle Schmier- und Kühlstellen des Motors maximal mit Öl versorgt werden, wird der Volumenstrom in der niedrigen Druckstufe (2 bar) auf das für einen sicheren Betrieb erforderliche Maß reduziert und gleichzeitig die Ölspritzen zur Kühlung des Kolbenunterbodens abgeschaltet.

Das Einsparpotenzial dieser Betriebsstrategie liegt bei rund 1,5 % im NEFZ, im Realbetrieb liegen die Einspareffekte noch darüber.

Ebenfalls zur Reduzierung der Antriebsleistung trägt der um 40% reduzierte Ölmengebedarf der Nockenwellenversteller gegenüber der Vorgängerausführung bei, die als modulare Einheitskomponenten in allen Ottomotoranwendungen zum Einsatz kommen.

## 4.2 Wärmemanagement und Kühlkreislauf

Durch konsequente Verringerung der hydraulischen Druckverluste und Detailverbesserungen der Kühlung gegenüber bisherigen Systemen – dazu gehört auch der zweiteilige Wassermantel im Zylinderkopf - konnten die Antriebsleistungen der Wasserpumpen trotz gesteigerter Motorleistung und zusätzlicher Kühlmittelbedarfe

wie z.B. durch die Abgasturboaufladung verringert werden, gleichzeitig wurde die Regelbarkeit verbessert.

Das Wärmemanagementkonzept regelt den Wasserkreislauf in drei Stufen während der Aufheizphase:

1. Startphase - „Stehendes Wasser“:

nach dem Kaltstart zur schnellen Aufheizung und damit schnellen Reduzierung der inneren Reibung am Grundmotor. Die Wasserpumpenförderung wird durch ein verschlossenes Thermostat und ein Abschaltventil vor dem Heizungsanschluss komplett unterbunden.

2. Aufwärmphase/Kurzstreckenbetrieb - „Motorkreislauf ohne Fahrzeugkühler“ im Kurzschluss; d.h. auch bei zusätzlichem Wärmebedarf durch die Fahrzeugheizung wird ein Kühlkreislaufbetrieb bis zu einer max. Kühlmitteltemperatur von 105 Grad C zunächst weiterhin komplett unterbrochen um ein Minimum an innerer Reibleistung des Grundmotors zu erzielen.

3.+4. Misch- und „Kühlerkreislauf“:

Bei Erreichen der reibungsoptimalen max. Wassertemperatur von 105°C wird der Kühlerbetrieb aktiviert, werden für einen Vollastbetrieb darüber hinaus oder kennfeldabhängig niedrigere Wassertemperaturen zur Beibehaltung des optimalen Zündzeitpunkts erforderlich, erfolgt eine entsprechende Regelung, die bis zu einer Temperatur von ca. 82°C im Eintritt abgesenkt werden kann.

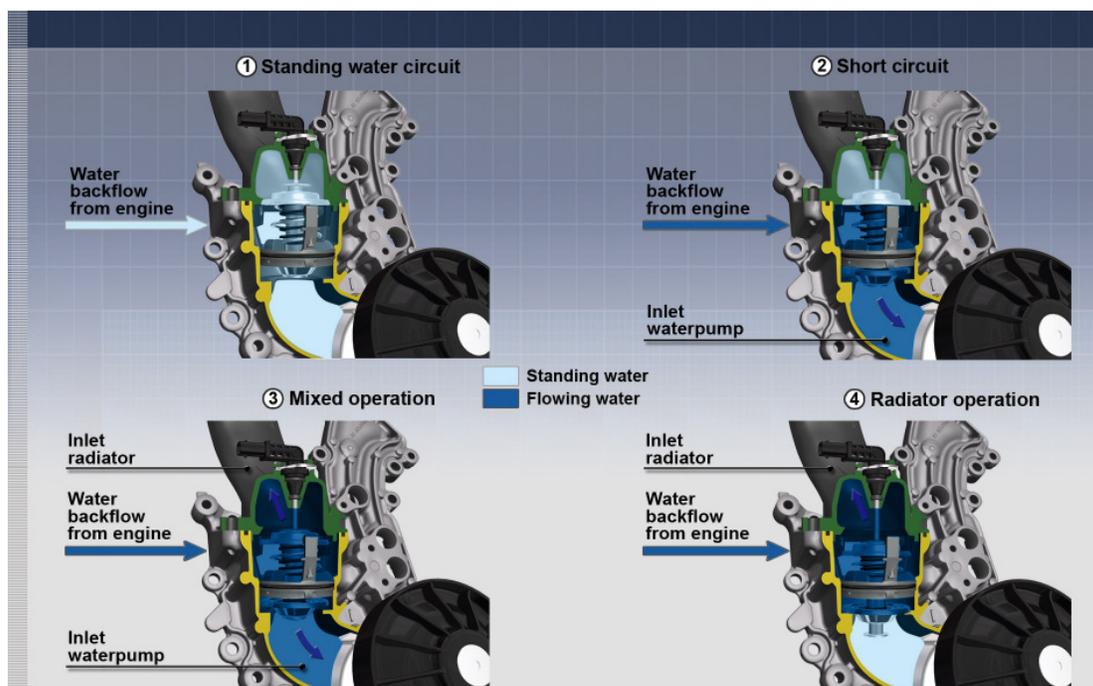


Abb. 14: Betriebsstellungen Zweitelthermostat am V6/V8  
*Operating positions of the 2-disk thermostat at V6/V8*

Die Umsetzung dieser Regelstrategie erfolgt über einen sogenannten Zweitellert-hermostat. Als Stellglied wird dabei eine beheizte Thermostatpatrone genutzt. Die einzelnen Betriebsstellungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

## 5 Stopp/Start

Neben dem bereits mit dem M 271 Evo in 2009 in Verbindung mit dem 6-Gang Handschaltgetriebe eingesetzten Stopp/Start – System erfolgt mit der neuen V6/V8-Motorengeneration erstmals der Einsatz der Direkt-Start-Stopp-Funktion in Verbindung mit dem Automatgetriebe 7G-TRONIC PLUS. Diese wird ebenso beim 4-Zylinder im ersten Quartal des nächsten Jahres für die Automatversionen eingeführt.

Bei der Stopp/Start-Einrichtung der V6/V8 Motoren handelt es sich um eine starterunterstützte Direktstartfunktion in Kombination mit einer Motor-Stopp-Funktion. Abhängig von freischaltenden Betriebsparametern schaltet sie den Motor im Fahrzeugstillstand und bei betätigter Fußbremse ab und leitet den schnellen Motordirektstart beim Lösen der Fußbremse ein.

Die Direktstart-Funktion nutzt die Tatsache, dass mit präzisiertem Timing der Einspritzung und Zündung der unmittelbar erste Verdichtungshub eines Zylinders schon für eine kontrollierte Verbrennung genutzt werden kann.

Abb. 15 zeigt die Zusammenhänge im Vergleich zu einem Motor mit Saugrohrein-spritzung.

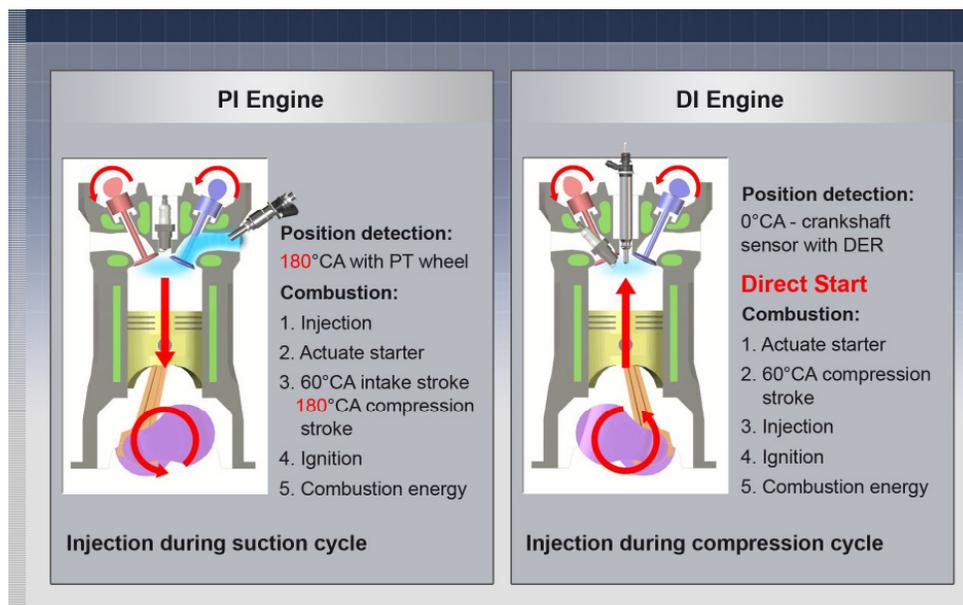


Abb. 15: Vergleich des Motorstarts bei Saug- und Direkteinspritzmotor  
*Comparison of engine start at PI- and DI-engine*

Präzise Sensorik und ein fein abgestimmtes Motormanagement stellen das Erkennen des allerersten Zylinder-OT sicher und sorgen für komfortablen Hochlauf des Motors.

Beim Abstellen des Motors wird im Motorauslauf die Winkelstellung der Kurbelwelle durch einen Kurbelwellensensor, der auch Rückwärtsdrehung erkennt, erfasst, so dass die Synchronisation mit dem Motorsteuergerät auch bei stehendem Motor erhalten bleibt. Damit ist beim Start nach kurzem Andrehen des Motors durch den Anlasser (ab ca. 60° KW) sofort eine zuverlässige Einspritzung und Zündung des ersten Zylinders möglich.

Bei diesem Verfahren braucht der Starter nur noch einen Erstanschub zu leisten und der Motor startet sehr schnell und komfortabel.

Die besonderen Herausforderungen beim Start mit Wandler-Automatik-Getriebe sind:

- verzögerungsfreies Anfahren bei Vollgas
- komfortables Anfahren beim Start, ohne oder mit nur leichtem „Gasgeben“ (Kriechstart).

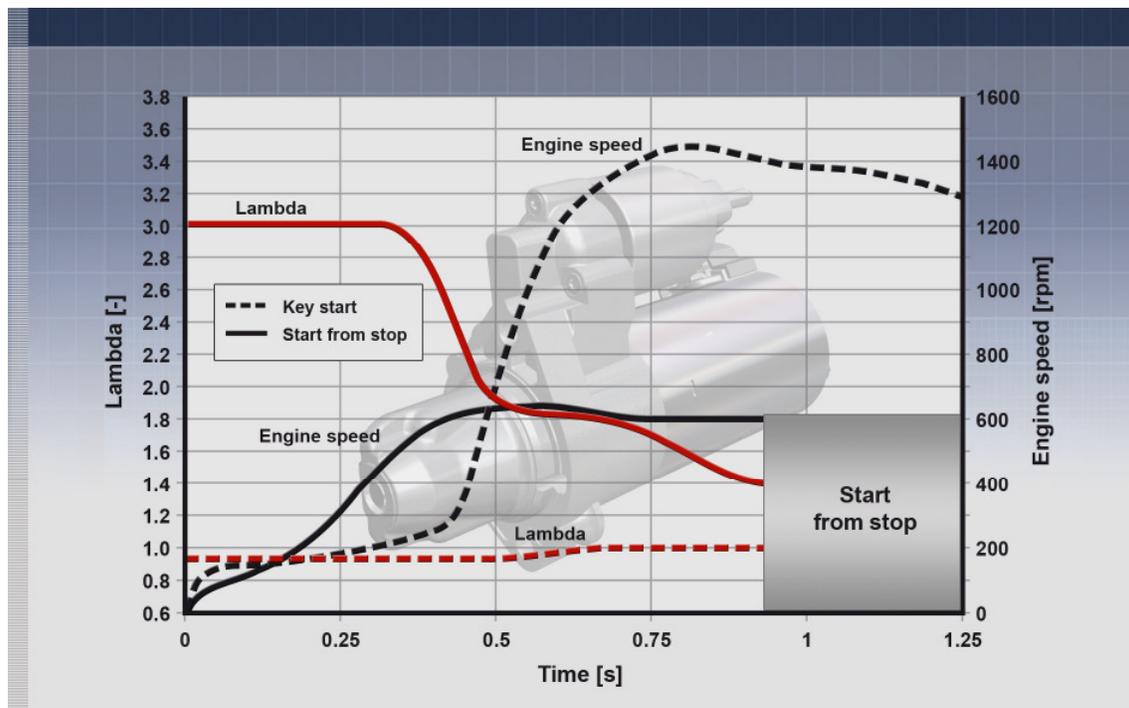


Abb. 16: Magerstartfähigkeit am V6 aus dem Stopp-Mode  
*Lean mixture starting ability from stop-mode of the V6-engine*

In Abb. 16 sind die Startbedingungen zwischen einem klassischen Schlüsselstart und dem Start aus dem Stoppmodus für den sog. „Kriechstart“, wie er z.B. beim Stop-and-Go Verkehr erfolgt, am Beispiel des neuen 3,5l V6 M 276 dargestellt.

Durch die sehr präzise und schichtfähige Piezo-Einspritzung wird problemlos ein Magerstart initialisiert und damit das Drehmoment bereits ab der ersten Zündung dem gewünschten Betriebspunkt angepasst, trotz des auf Umgebungsdruck gefüllten Saugrohres. Mit diesem extrem mageren Gemisch durch die Schichteinspritzung wird der Motor wirkungsgradoptimal gestartet. Lediglich Feinkorrekturen des Drehzahlverlaufs werden mit Hilfe der Zündungsverstellung vorgenommen. Damit sind in der Gesamtbilanz bereits Abstellzeiten ab 1,5 Sekunden lohnenswert. Zudem ermöglicht diese Betriebsstrategie einen sehr schnellen Start von unter 350 ms, der insbesondere mit den höheren Anforderungen in Verbindung mit einem Automatgetriebe als komfortabel wahrgenommen wird.

In der Betriebsstrategie wird festgelegt, ob gegebenenfalls Stoppverhinderer, wie Klimatisierungsbedarf, Bordnetzzustand usw. Vorrang gegenüber dem Abstellvorgang haben. Damit sind die Fahrzeuggrundfunktionen sichergestellt, der Motor wird im Leerlauf nur abgeschaltet, wenn seine Antriebsenergie nicht benötigt wird.

Neben den bereits erwähnten Lagesensoren ist getriebeseitig eine elektrische Zusatzölpumpe zur Aufrechterhaltung des Wandlerdrucks erforderlich. Zudem werden Starter und Anlasserzahnkranz deutlich robuster ausgelegt.

Die Verbrauchseinsparung durch Stopp/Start im NEFZ beträgt ca. 5%

## **6 Motorische Ergebnisse**

### **6.1 Fahrdynamik/Performance**

Mit dem innovativen Technologie-Portfolio der neuen BlueDIRECT- Motoren-generation wird ein neuer Maßstab an Verbrauchseffizienz gesetzt, ohne dabei auf die Mercedes-Benz typischen Markenwerte wie souveräne Fahrleistungen und hohen Komfortanspruch zu verzichten.

Mit dem neuen 3,5l V6 M 276 wird die Leistung gegenüber der Vorgänger-motorisierung in der S-Klasse um rund 12% auf 225 kW bzw. 306 PS gesteigert und das Drehmoment auf 370 Nm angehoben.

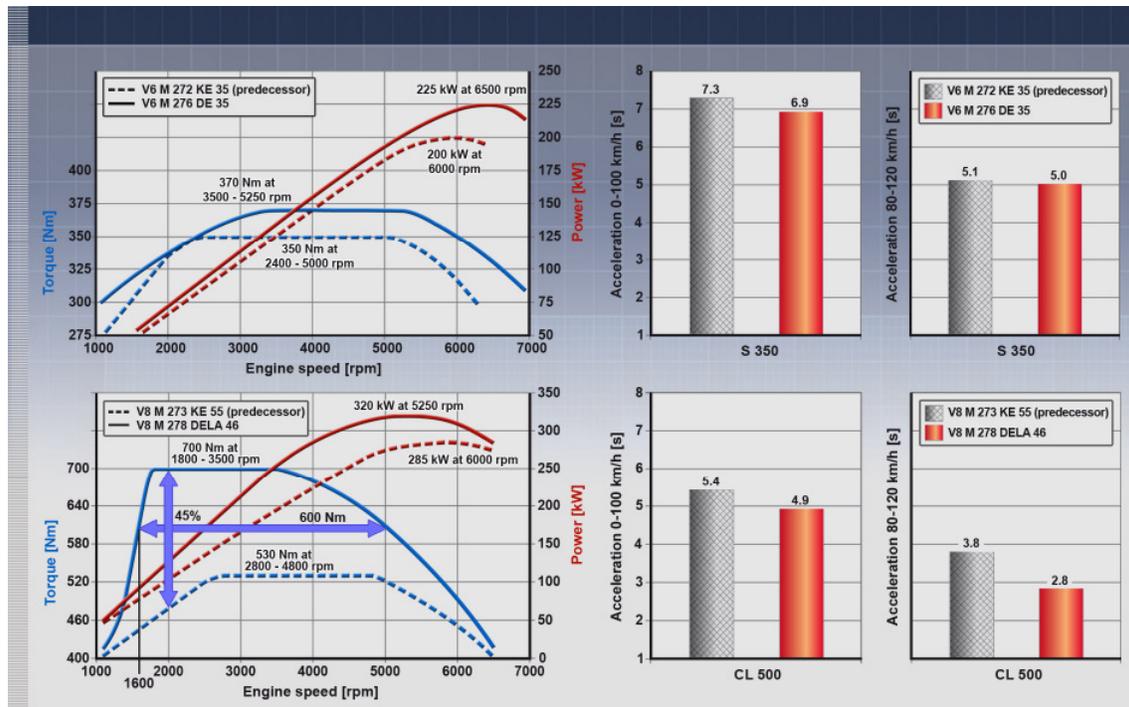


Abb. 17: Leistungs-, Drehmoment- und Fahrleistungswerte der V6/V8-Motoren im Vergleich zum Vorgänger  
*Power, torque and vehicle performance of the V6/V8-engines in comparison to the predecessor*

Mit dem neuen aufgeladenen 4,6l V8 M 278 werden gegenüber dem bisherigen 5,5l Saugmotor aufgrund der signifikanten Drehmomenterhöhung insbesondere im unteren Drehzahlbereich deutliche Verbesserungen erzielt, so stehen mit 700 Nm über 50% mehr Drehmoment bereits ab 1800 1/min im Vergleich zum Vorgänger zur Verfügung, über 600 Nm liegen in einem Drehzahlbereich von 1600- 5000 1/min an (Abb.17).

Entsprechend souverän fallen die mit dem V8 in der S-Klasse erzielbaren Fahrleistungen aus mit einem 0-100 km/h Wert von nur noch knapp 5 sec. Noch beeindruckender ist allerdings die Verbesserung der Elastizität um knapp 30% für die Beschleunigung von 80 auf 120 km/h.

## 6.2 Verbrauchswerte

Mit den eingesetzten Technologien wurden signifikante Verbrauchsreduzierungen umgesetzt (Abb. 18).

Im C 200 CGI wird mit dem 4-Zylinder-M 271 Evo mit 135 kW bzw. 184 PS mit dem 7G-TRONIC PLUS Automatgetriebe und Stopp/Start, das ab 3/11 auf den Markt

kommt, der NEFZ Verbrauch um rd. 10% abgesenkt und mit einem CO<sub>2</sub>-Wert von 150 g/km ein sehr guter Wert erzielt.

Mit Einführung der neuen BlueDIRECT V6- und V8-Motorengeneration mit strahlgeführter Verbrennung mit Piezo Direkteinspritzung, Mehrfachfunkenzündung, einem integrativen Öl- und Kühlmittelmanagement sowie Direkt-Stopp/Start System werden Bestmarken in Sachen Verbrauchseffizienz im Vergleichssegment gesetzt.

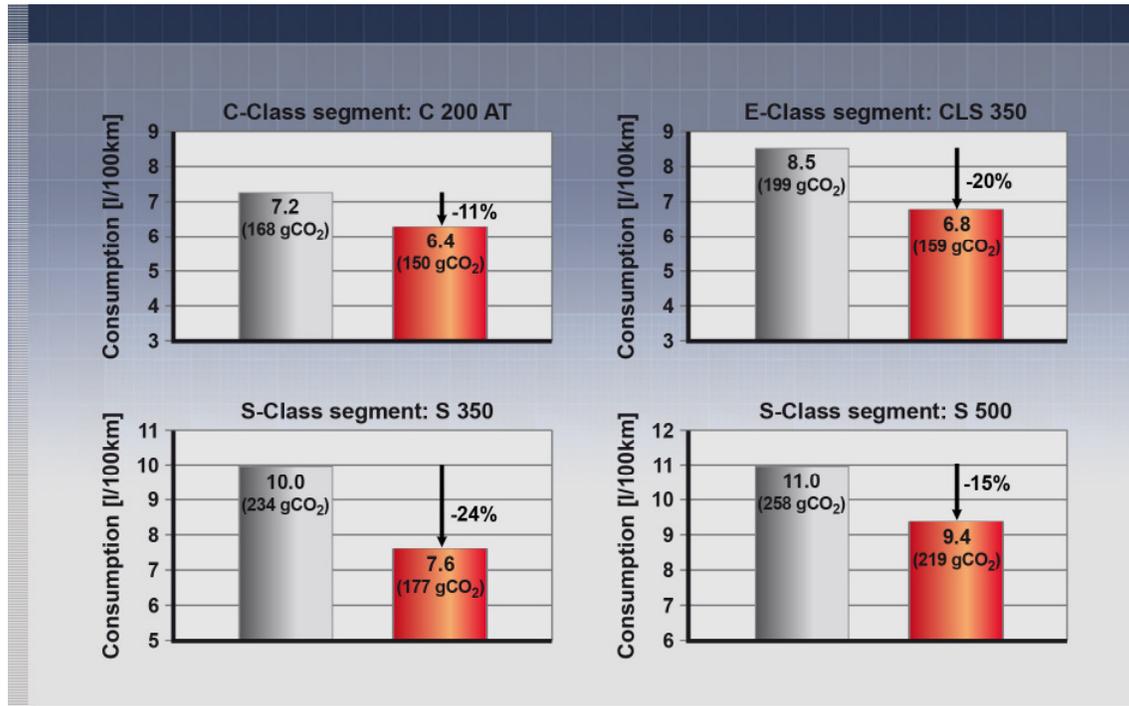


Abb. 18: NEFZ-Verbrauchswerte im Vergleich zur Vorgängermotorisierung  
*NEDC fuel consumption figures in comparison to the predecessor engine*

Gegenüber der jeweiligen Vorgängermotorisierung werden Verbrauchsverbesserungen von nochmals bis zu 24 % erzielt.

Mit einem CO<sub>2</sub> Wert von unter 160 g/km werden mit dem neuen CLS 350 im E-Klasse Segment im Leistungsbereich der 300 PS Motorisierungen ebenso neue Maßstäbe gesetzt wie mit dem S 500 im V8 Top Segment der S-Klasse, wo mit dem neuen 4,6 l Biturbo mit 435 PS und 700 Nm mit einem volumetrischen Verbrauch von 9,4 l/100km Verbrauchswerte erzielt werden, die auf einem Niveau liegen, das bislang allenfalls von 6-Zylindern deutlich geringerer Leistung und Drehmoment, oder Hybridfahrzeugen erreicht wurden.

**Literaturhinweise**

- [1] P. Lückert, F. Kreitmann, N. Merdes, R. Weller, A. Rehberger, K. Bruchner, K. Schwedler, H. Ottenbacher, Daimler AG, Stuttgart  
Der neue 1,8l 4-Zylinder Turbo-Direkteinspritz-Ottomotor für alle PKW mit Standardantrieb von Mercedes-Benz  
30. Int.Wiener Motorensymposium 2009
  
- [2] A. Waltner, P. Lückert, G. Doll, H. Herwig, R. Kemmler, H. Weckenmann, Daimler AG, Stuttgart  
Der neue V6-Ottomotor mit Direkteinspritzung von Mercedes-Benz  
31. Int.Wiener Motorensymposium 2010
  
- [3] G. Doll, P. Lückert, H. Weckenmann, R. Kemmler, A. Waltner, H. Herwig, Daimler AG, Stuttgart  
Der neue V8-Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung von Mercedes-Benz  
31. Int.Wiener Motorensymposium 2010