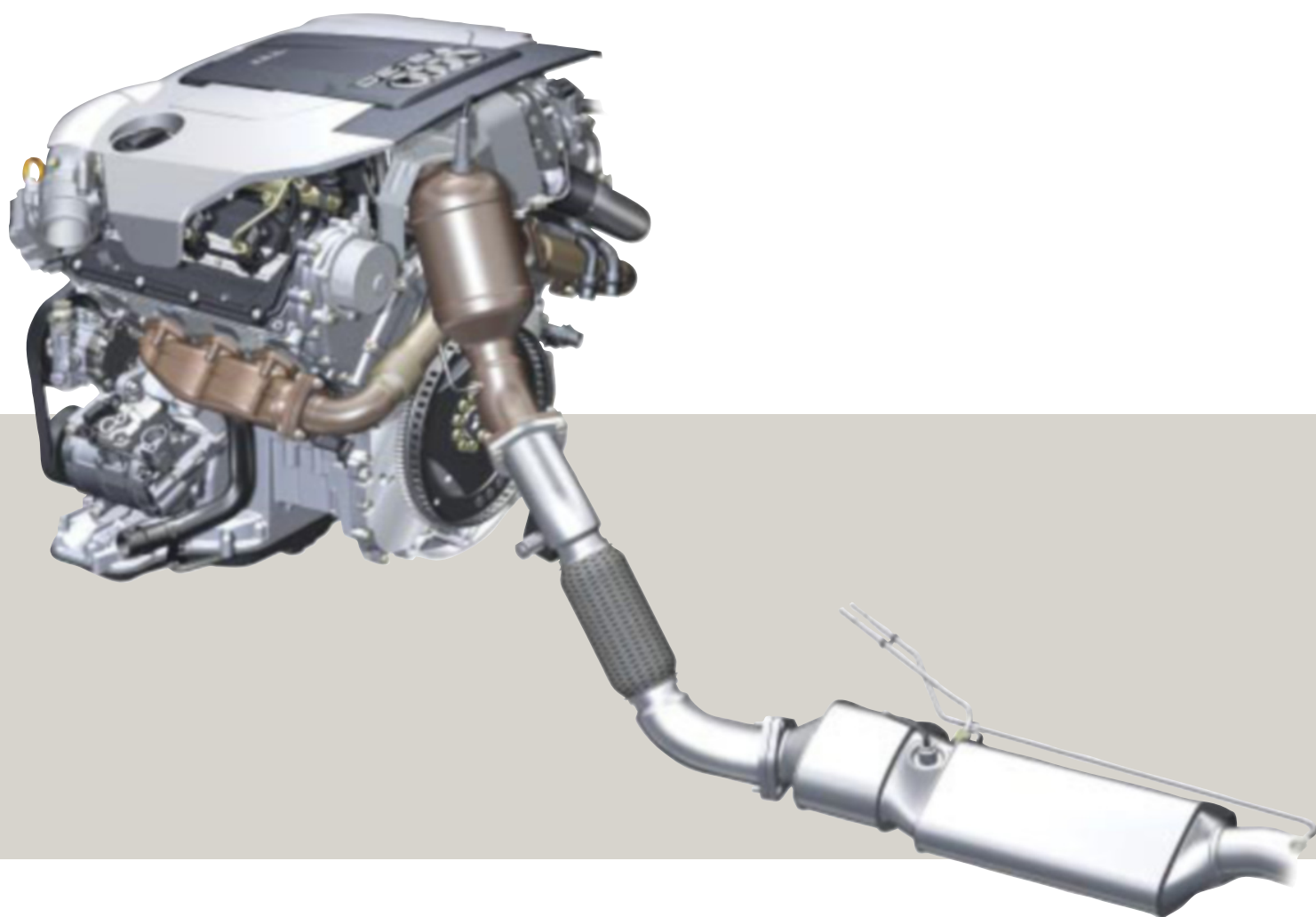


Der neue 3,0-I-V6-TDI-Motor von Audi

Teil 2: Thermodynamik, Applikation und Abgasnachbehandlung

Im ersten Teil dieses Beitrags [1] wurden Konstruktion und Mechanik des neuen 3,0-I-V6-TDI Motors von Audi beschrieben. In diesem zweiten Teil geht es um die Entwicklung der Thermodynamik, Applikation und Abgasnachbehandlung. Der neue Dieselmotor hat eine Leistung von maximal 171 kW bei 4000/min und ein Drehmoment von 450 Nm zwischen 1400 bis 3250/min. Er wird zunächst im Audi A8 und A6 in Verbindung mit dem neuen Sechsgang-Automatikgetriebe mit quattro-Antrieb eingesetzt.



1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Jahr 1997 ging der 2,5-l-V6-TDI-Motor in Produktion. Dieser kam mit seiner letzten Entwicklungsstufe von maximal 132 kW und Abgasstufe Euro 4 auch bei Fahrzeugen der Oberklasse zum Serieneinsatz [2]. Für den neuen Audi A6 und den A8 wurde ein V6-TDI-Motor mit 3 l Hubraum entwickelt. Er ist nach dem 4,0-l-V8-TDI [3] der zweite Dieselmotor, der auf der neuen Audi-V-Motorenfamilie basiert. Allerdings wurde der Zylinderabstand von 88 auf 90 mm vergrößert. Familienmerkmal ist der getriebeseitige Kettentrieb und resultierend daraus eine extrem kurze und kompakte Bauweise. Die Einspritzung übernimmt – erstmalig beim V6-TDI-Motor von Audi – ein Piezo-Common-Rail-System der dritten Generation von Bosch [4]. Der maximale Einspritzdruck beträgt 1600 bar. Die Ziele für die Entwicklung von Thermodynamik und Abgasnachbehandlung waren:

- höchste spezifische Leistung
- hohes Motordrehmoment
- beste Fahrleistungen insbesondere hinsichtlich Ansprech- und Beschleunigungsverhalten bei gleichzeitig niedrigen Verbrauchswerten
- exzellente Verbrennungsakustik
- Einhaltung der strengen Emissionsgrenzwerte Euro 4 allein durch innermotorische Maßnahmen
- optional ein wartungsfreies CSF-Partikelfiltersystem (Catalysed Soot Filter).

Um das Potenzial mehrerer hochkomplexer Systeme zu nutzen, wurden umfangreiche Untersuchungen zum Brennverfahren und zur Applikation durchgeführt. Die Wechselwirkungen der verschiedenen Systeme und Parameter konnten nur unter Zuhilfenahme von DoE (Design of Experiment) zielgerichtet untersucht und analysiert werden. Mit diesen Ergebnissen wurde das Brennverfahren definiert und die Applikationsdaten festgelegt.

2 Brennverfahren und Applikation

Das vom 4,0-l-V8-TDI bekannte Audi TDI-Brennverfahren mit vier Ventilen und Common-Rail-Einspritzsystem wurde für diesen Motor komplett überarbeitet. Dabei wurden insbesondere folgende Einflussfaktoren auf die dieselmotorische Verbrennung betrachtet:

- Drallregelung und Füllung
- Brennraumform und Verdichtung
- Einspritzsystem mit Mehrfacheinspritzung
- Abgasrückführung mit gesteuerter Kühlung
- Abgasturboaufladung und Ladeluftkühlung.

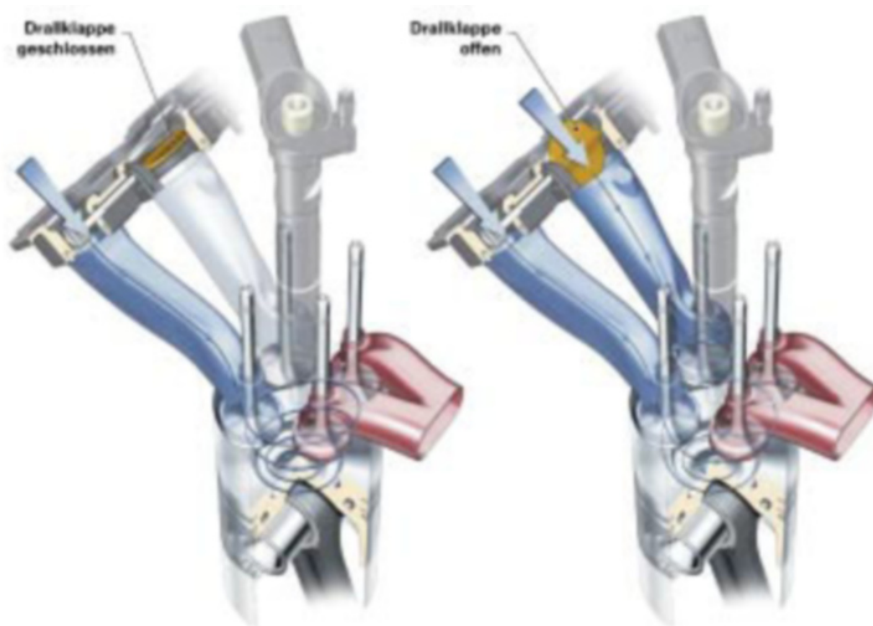
2.1 Vierventil-Technologie mit elektronischer Drallregelung

Beim 3,0-l-V6-TDI wird erstmals das neue Vierventil-Konzept umgesetzt. Zur Erzielung einer höheren mechanischen Festig-

2.1 Vierventil-Technologie mit elektronischer Drallregelung

Bild 1: Audi-Vierventil-Verfahren mit elektronischer Drallregelung

Figure 1: Audi four-valve cylinder layout with electronic swirl control



Die Autoren



Dipl.-Ing. Richard Bauder ist Leiter der Entwicklung Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dipl.-Ing. Dieter Brucker ist Thermodynamiker in der Abteilung Thermodynamik und Applikation Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz ist Leiter der Aggregate-Entwicklung bei der Audi AG in Ingolstadt.



Dr. rer. nat. Henning Lörch ist Teamkoordinator in der Abteilung Abgasnachbehandlung Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dipl.-Ing. Axel Macher ist Applikateur in der Abteilung Thermodynamik und Applikation Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dipl.-Ing. Zaccaro-Giovanni Pamio ist Leiter der Abgasnachbehandlung Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dipl.-Ing. Thomas Reuss ist Leiter Thermodynamik und Applikation 3,0-l-V6-Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dipl.-Ing. Ralph Riegger ist Fachreferent in der Abteilung Thermodynamik und Applikation Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.



Dr.-Ing. Hans-Josef Schiffgens ist Leiter Thermodynamik und Applikation Dieselmotoren bei der Audi AG in Neckarsulm.

2.1 Vierventil-Technologie mit elektronischer Drallregelung

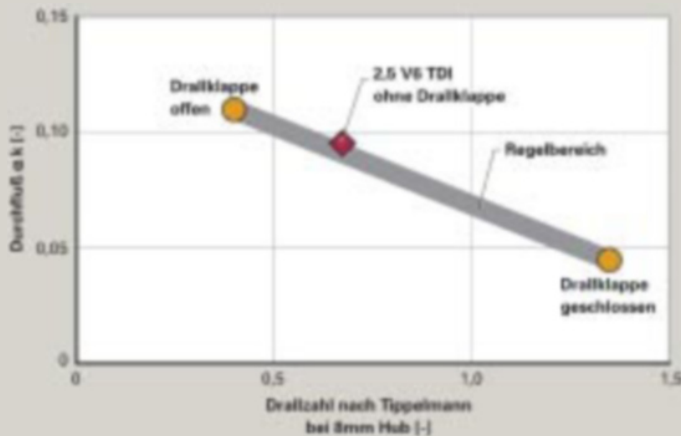


Bild 2: Drallvariationen und Durchfluss
Figure 2: Swirl variations and through-flow

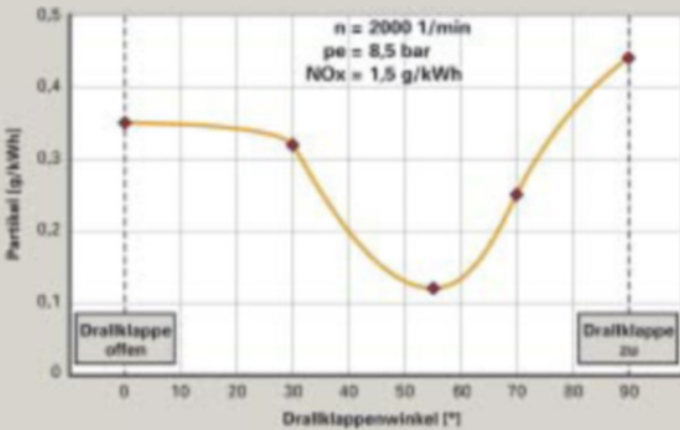


Bild 3: Einfluss der Drallklappenstellung auf die Partikelemissionen
Figure 3: Influence of swirl flap position on particle emissions

2.2 Brennraum

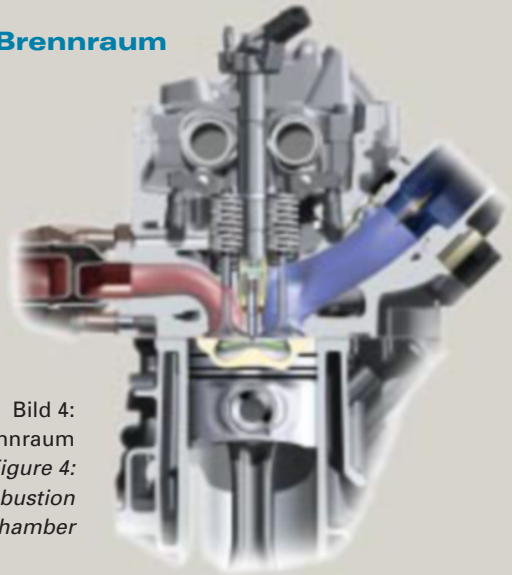


Bild 4:
Brennraum
Figure 4:
Combustion
chamber

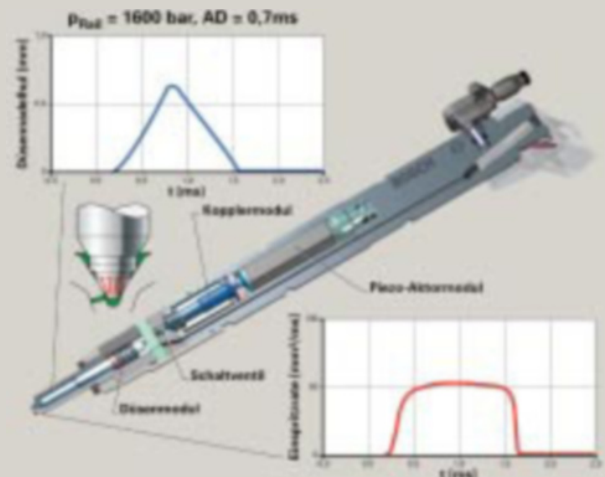


Bild 5: Piezo-Inline-Injektor der 3. Generation
Figure 5: Third-generation piezo inline injector

keit und besseren Kühlung (Querstrom statt Längskühlung) wurde der Ventilsterm etwas zurückgedreht, so dass jeweils die zwei Ein- und Auslassventile von einer Nockenwelle betätigt werden, **Bild 1**.

In Verbindung mit der geregelten Drallklappe konnte durch eine konsequente Kanalentwicklung eine höhere Spreizung des Dralls erreicht werden – also ein weiterer Bereich zwischen hohem und niedrigem Drall. Erstmals können durch die elektronisch geregelte Ansteuerung der Drallklappe auch Zwischenstufen kennfeldabhängig eingestellt werden, **Bild 2**.

Bei geschlossenem Spiralkanal stellt sich ein hoher Drall von etwa 1,35 ein. Bei geöffneter Klappe wird ein Drall von lediglich 0,4, bei einem guten Durchfluss von

0,11 erreicht. Der Vorgängermotor 2,5-l-V6-TDI erzielte einen Durchfluss von 0,09 bei einem festen Drall von 0,67.

Im unteren Drehzahl- und Lastbereich ist die Klappe zur Erzielung niedrigster Emissionen geschlossen, das ergibt einen hohen Drall. Bei niedrigen Drehzahlen und höheren Lasten ergibt eine Zwischenstellung mit mittleren Drall beste Emissionen. Bei höheren Drehzahlen und für höchste Leistung ist die Drallklappe voll geöffnet, dies ist ein Bereich mit niedrigem Drall. Den Einfluss der Drallklappenstellung auf die Partikelemissionen an einem ausgewählten Kennfeldpunkt mit relativ hoher Last zeigt **Bild 3**.

Durch die geregelten Drallklappen können noch deutlich niedrigere Partikelwerte bei vorgegebenem Euro 4- NO_x -Niveau er-

reicht werden. Vorteilhaft ist dies bei relativ hohen Lasten, wo ein ganz geschlossener Einlasskanal zu Füllungsseinbußen und damit zu einem höheren Partikelaustritt führt. Des weiteren ist die Entdrosselung auch für den Verbrauch vorteilhaft. Diese Möglichkeit ist insbesondere für Automatturbo-Antriebe notwendig, da durchschnittlich höhere Lasten als mit Standardantrieb gefahren werden.

Der Einsatz der lagegeregelten Drallklappe, die in Abhängigkeit von Last und Drehzahl den optimalen Kompromiss zwischen den Anforderungen hinsichtlich Emissionen, Verbrauch und Drehmoment/Leistung ermöglicht, bildet die Basis zur Erzielung der Emissionsstufe Euro 4 nur mit innermotorischen Mitteln.

2.2 Brennraum

Für eine schadstoffarme und effiziente Verbrennung müssen die Brennraumform, die Luftbewegung im Brennraum und die Einspritzung gezielt aufeinander abgestimmt werden. Durch umfangreiche Untersuchungen wurden folgende Parameter im Hinblick auf niedrigste Emissionen und Kraftstoffverbräuche sowie höchste Leistungswerte bei gleichzeitig hoher mechanischer Festigkeit des Kolbens optimiert:

- Brennraummuldengeometrie
- Drallausbildung in der Mulde
- Verdichtungsverhältnis
- Strahlauffreffpunkt und freie Strahlänge
- Einspritzdüsengeometrie und -durchfluss.

Bild 4 zeigt die Anordnung von Injektor, Einspritzstahnen und Kolbenmulde. Es wurde ein Kolben ohne Ventiltaschen und einem maximalen Muldendurchmesser von 50 mm gewählt. Die Verdichtung konnte mit 17:1 sehr niedrig ausgelegt werden, weil das Piezo-Common-Rail-System mit zweifacher Voreinspritzung sehr gute Kaltstarteigenschaften und eine ausgezeichnete Verbrennungakustik auch bei niedrigsten Außentemperaturen ermöglicht.

Als Einspritzdüse kommt eine neu entwickelte Mikro-Sacklochdüse mit sieben Spritzlöchern und einem Spritzwinkel von 158° zum Einsatz, **Bild 5**. Das gute Strahlbild in Kombination mit dem sehr kleinen Schadvolumen der Düse durch das Mikro-Sackloch und der hohe Einspritzdruck führen zu einer hervorragenden Gemischbildung und damit zu einer sehr emissionsarmen und effizienten, verbrauchsgünstigen Verbrennung.

2.3 Einspritzsystem

Die Kraftstoffeinspritzung übernimmt ein Bosch Common-Rail-System der 3. Generation. Erstmals werden schaltschnelle und kompakte Piezo-Inline-Injektoren mit einem maximalen Einspritzdruck von 1600 bar eingesetzt, **Bild 5**.

Der Piezoaktor schaltet in weniger als einer zehntausendstel Sekunde und wurde nahe der Düsennadel in den Injektor integriert. Dadurch konnten die bewegten Bauteile und Massen gegenüber herkömmlichen Magnetventilinjektoren deutlich reduziert werden. Die Bewegung des Piezopakets wird über ein Servoventil reibungsfrei auf die Düsennadel übertragen. Im Vergleich zu bisherigen Injektoren werden doppelt so schnelle Düsenschaltzeiten realisiert. Durch die hohe Schaltgeschwindigkeit lassen sich die Abstände zwischen den einzelnen Einspritzungen

2.3 Einspritzsystem

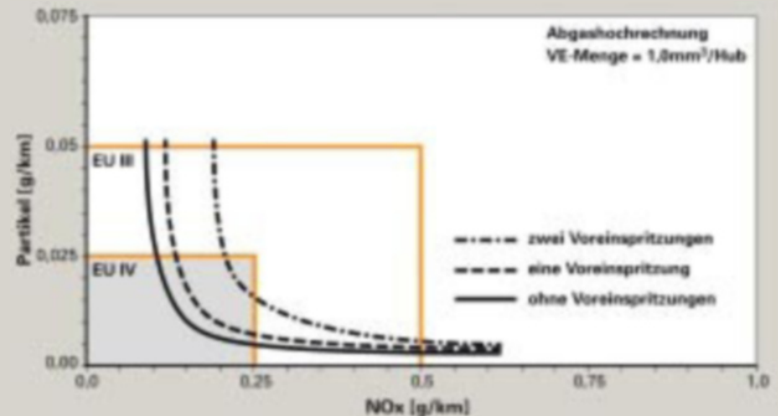


Bild 6: Einfluss der Voreinspritzung auf die NO_x - und Partikel-Emissionen
Figure 6: Influence of pilot injection on NO_x and particle emissions

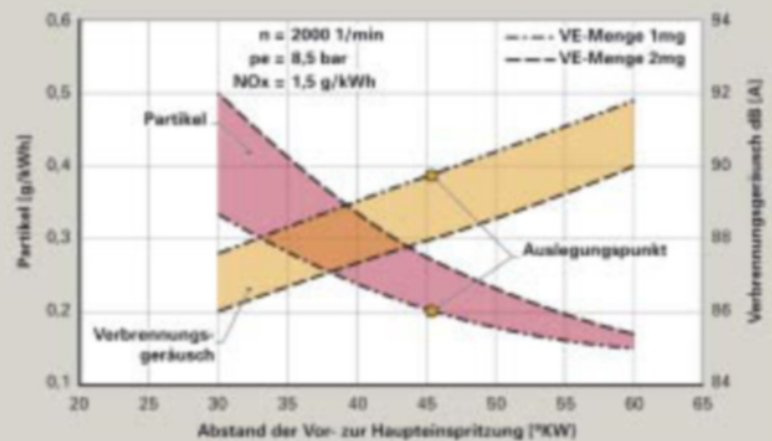


Bild 7: Wechselwirkung Akustik/Emissionen mit einfacher Voreinspritzung
Figure 7: Interaction between acoustics and emissions with a single pilot injection phase

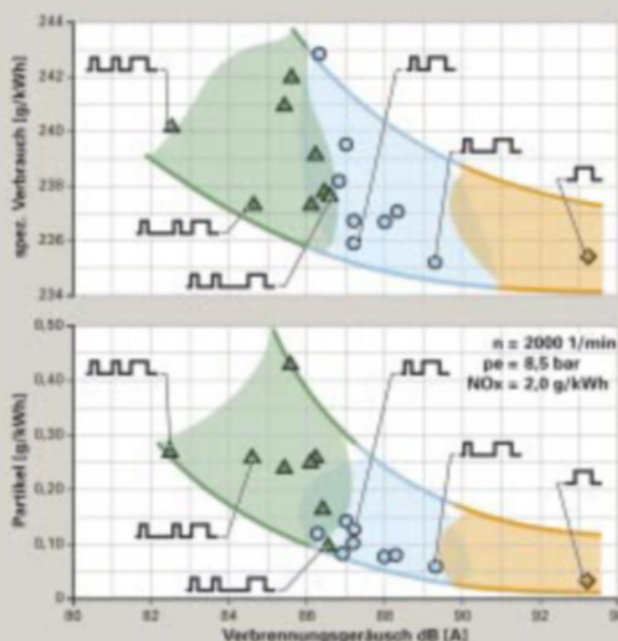


Bild 8: Einfluss der Einspritzparameter auf die Partikelemissionen und das Verbrennungsgeräusch
Figure 8: Influence of fuel injection parameters on particle emissions and combustion noise

verringern und die Einspritzsequenz dem jeweiligen Betriebspunkt des Motors anpassen.

Die einzelnen Einspritzungen können eng aufeinander im Abstand von etwa 50 Mikrosekunden folgen – im Vergleich zur 2. Generation eine Verbesserung um den Faktor 40. Die neue Injektorgeneration erlaubt bis zu fünf Einspritzungen pro Arbeitsspiel. Des weiteren konnten die minimal zulässigen Voreinspritzmengen und die Toleranzen im Vergleich zur 2. Generation deutlich von 1,5 auf 1,0 mm³/Hub reduziert werden, eine wichtige Voraussetzung für niedrigste Partikelemissionen. In enger Zusammenarbeit mit Bosch wurde der Injektor und das Düsenmodul hinsichtlich seiner Mengen-Langzeitstabilität insbesondere bei hohen Raildrücken entscheidend weiterentwickelt. Den Einfluss der Anzahl der Voreinspritzungen auf die NO_x- und Partikelemissionen bei einer konstanten Voreinspritzmenge von 1 mm³/Hub zeigt **Bild 6**.

Es wird deutlich, dass der PM/NO_x-Trade-off mit steigender Anzahl der Voreinspritzungen immer ungünstiger wird, die besten Emissionen werden also ohne Voreinspritzung erreicht. Auf der anderen Seite sind Dieselmotoren ohne Voreinspritzung aufgrund der schlechten Verbrennungsakustik nicht akzeptabel.

Die hohe Dynamik und die damit verbundene Flexibilität des Piezosystems erlaubt es, diesen Zielkonflikt Verbrennungsakustik/Emissionen nahezu aufzuheben, da im ganzen Betriebsbereich eine weiche Verbrennung ohne große Emissionsnachteile umgesetzt werden kann. Beispielhaft in einem wichtigen Betriebspunkt wird der Einfluss des Abstands zwischen einer Vor- und der Haupteinspritzung auf die Partikelemission und das Verbrennungsgeräusch bei konstanten NO_x-Emissionen aufgezeigt, **Bild 7**.

Eine Voreinspritzung, die möglichst nah bei der Haupteinspritzung liegt, bringt beste Akustik aber schlechtere Partikelemissionen – und umgekehrt gilt: Eine weit abgesetzte Voreinspritzung bewirkt niedrigere Partikelwerte bei schlechterer Akustik. Eine größere Voreinspritzmenge ergibt eine bessere Akustik aber schlechtere Partikelwerte. Dabei ist zu beachten, dass die Anforderungen bezüglich der Mengentoleranz bei naher Voreinspritz zunimmt.

Einen Überblick, welchen Einfluss die Einspritzparameter auf die Partikelemissionen und das Verbrennungsgeräusch bei konstanten NO_x-Emissionen in einem ausgewählten Kennfeldpunkt besitzen, zeigt **Bild 8**. Die hier untersuchten Parameter sind:

2.3 Einspritzsystem

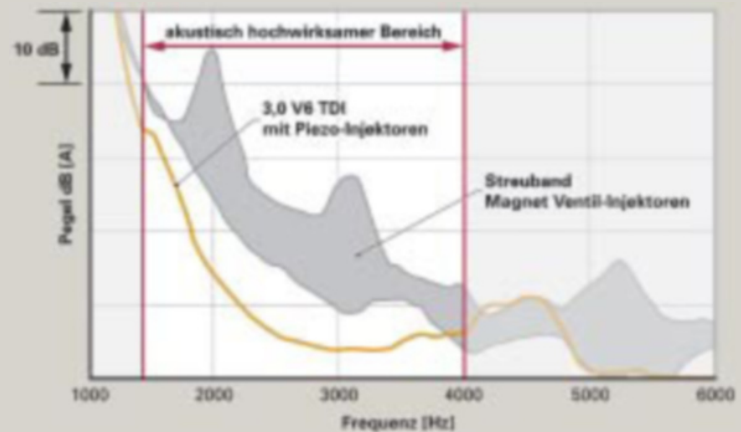


Bild 9: Vergleich Verbrennungsanregung Magnetventil-/Piezo-Injektor im Leerlauf

Figure 9: Comparison between combustion noise occurrence on engines with solenoid-valve and piezo injectors at idle speed

2.4 Aufladung und Ladeluftkühlung

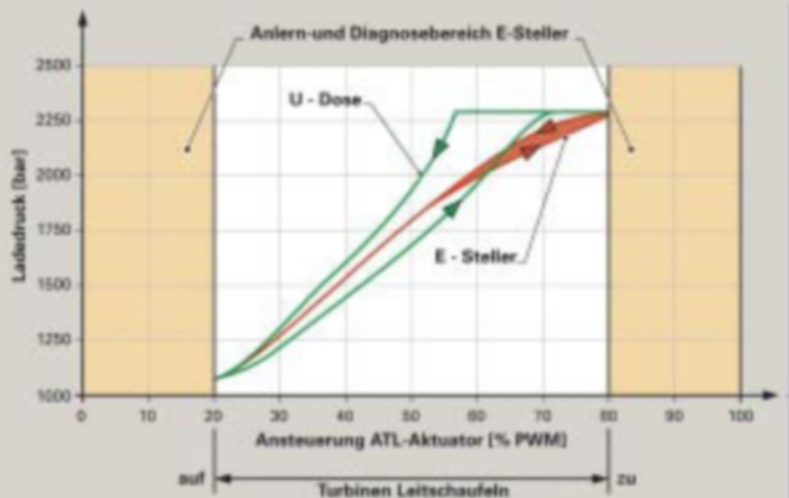


Bild 10: Verstellkinematik der variablen Turbinengeometrie

Figure 10: Variable turbine geometry adjusting kinematics

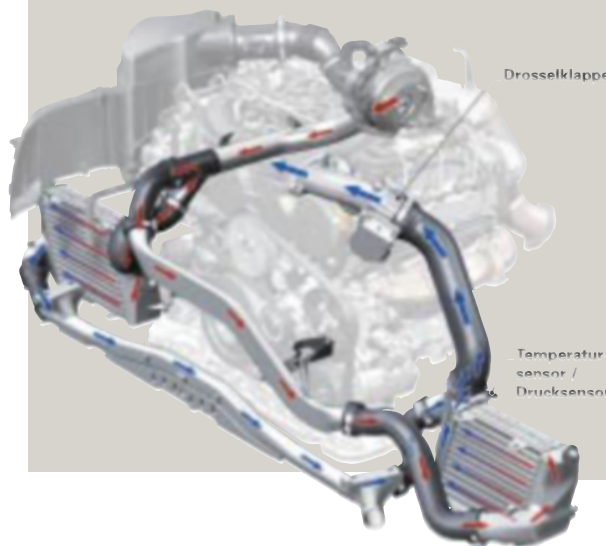


Bild 11: Ladeluftkühleranordnung im neuen A8

Figure 11: Arrangement of charge-air inter-coolers in the new Audi A8

- Anzahl der Voreinspritzungen
- Voreinspritzmenge
- Abstand der Voreinspritzungen
- Einspritzdruck.

Es wird deutlich, dass durch eine geschickte Wahl der Einspritzparameter bei konstanter Verbrennungskinetik und NO_x -Emission ein Optimum hinsichtlich Verbrauch und Partikelemissionen erreicht werden kann. Für den neuen Audi 3,0-l-V6-TDI wurde die Einspritzstrategie in allen Fahrzeugen so gewählt, dass zum einen die Euro 4 Grenzwerte innermotorisch erreicht werden und gleichzeitig die Kundenanforderungen hinsichtlich Verbrauch, Akustik, Leistung und Drehmoment optimal erfüllt werden.

Eine gute Leerlaufakustik ist für ein Fahrzeug der Luxusklasse selbstverständlich. Auch in dieser Disziplin kann das neue Piezo-Einspritzsystem seine Vorteile eindrucksvoll unter Beweis stellen. Bild 9 zeigt, dass das Verbrennungsgeräusch beim 3,0-l-V6-TDI nur noch einen untergeordneten Einfluss auf das Leerlaufgeräusch besitzt. Bestimmend sind überwiegend die mechanischen Geräusche der bewegten Bauteile.

2.4 Aufladung und Ladeluftkühlung

Ein wichtiges Entwicklungsziel war es, schon bei niedrigen Drehzahlen ein hohes Drehmoment und insbesondere einen spontanen Drehmomentaufbau darstellen zu können. Dies wurde mit einem Abgas-turbolader mit variabler Turbinengeometrie von Borg Warner Turbosystems erreicht, der zur exakten und schnelleren Einstellung der Leitschaufeln einen elektrischen Stellmotor einsetzt.

Bild 10 zeigt bei konstanter Drehzahl und einer Variation des Ladedrucks die Unterschiede zwischen einer Unterdruckdose und dem gewählten elektrischen Stellmotor. Es wird deutlich, dass die Regelcharakteristik des E-Stellers deutliche Vorteile besitzt, da sie eine geringe Hysterese im Stellmechanismus hat und damit eine eindeutige Zuordnung zwischen Ansteuerung und Ladedruck ermöglicht. Dadurch kann unter anderem der Abstand zur Pumpgrenze verringert werden. Weitere Vorteile sind die exakte Vorsteuerung und damit bestes Ansprechverhalten und Emissionen sowie die Lagerückmeldung für eine exaktere EOBD-Diagnose.

Ein Temperatursensor am Turbineneingang sorgt dafür, dass die zulässige Abgastemperatur von 820°C nicht überschritten wird. Dies erlaubt eine hohe Motorleistung ohne Bauteilüberlastung.

In gleicher Weise wichtig für einen spontanen Drehmomentaufbau ist eine

2.5 Abgasrückführung

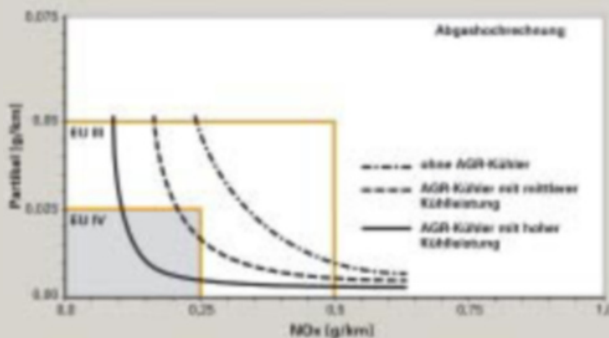


Bild 12:
Einfluss AGR-Kühlung auf Emissionen
Figure 12:
Influence of EGR cooling on emissions

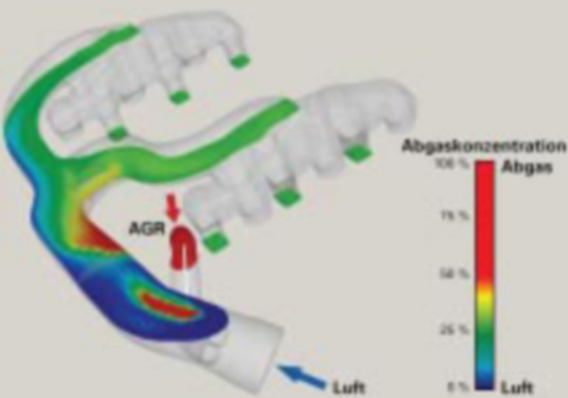
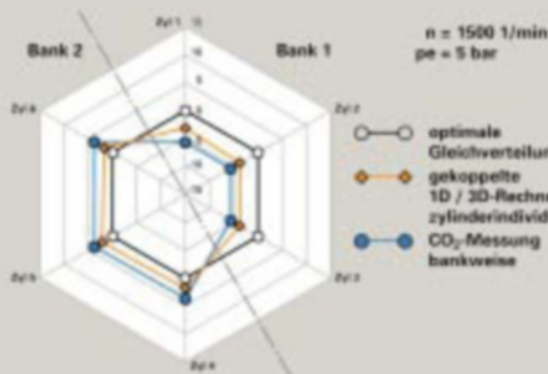


Bild 13:
AGR-Gleichverteilung Messung und Rechnung
Figure 13:
Measurement/ computing of uniform EGR distribution



3 Motormanagement

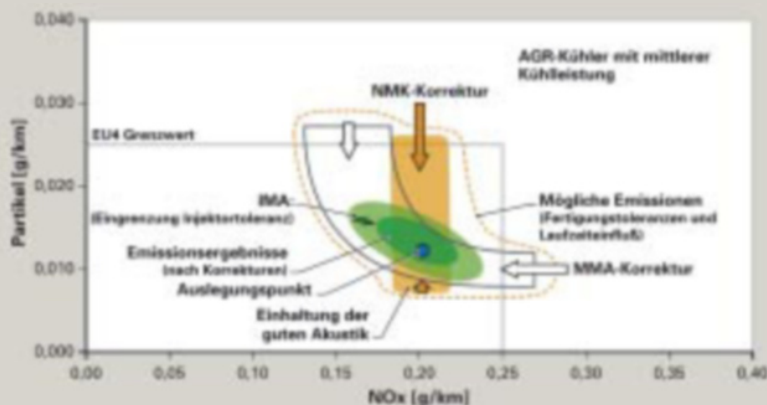


Bild 14: Einfluss der Korrekturfunktionen auf die Partikel- und NO_x -Emissionen
Figure 14: Influence of correcting functions on particle and NO_x emissions

optimale Ladeluftkühlung. Bauraumbedingt wurden zwei Seitenladeluftkühler eingebaut. Um gleichzeitig niedrige Ladelufttemperaturen ($\Delta T = 25 \text{ K}$ über Umgebung) und Druckverluste (120 mbar bei Nennleistung) zu erzielen, wurde eine parallele Anordnung gewählt, **Bild 11**.

2.5 Abgasrückführung

Die geregelte Abgasrückführung mit mehr oder weniger stark gekühltem Abgas ist derzeit die effektivste Maßnahme um die Rohemissionen bei NO_x - und Partikel deutlich zu reduzieren. Durch die Möglichkeit des Zu- und Abschaltens des AGR-Kühlers sind bei den Emissionen erhebliche Verbesserungen umsetzbar – auch bei den HC- und CO-Werten, **Bild 12**. Zusätzlich kann das Versotten des AGR-Systems zuverlässig vermieden werden. Abhängig von der Betriebstemperatur und der Lastanforderung wird das rückgeführte Abgas mehr oder weniger stark gekühlt.

Weitere wichtige Parameter für ein effizientes AGR-System sind eine gute Homogenisierung von Luft und Abgas und eine exzellente Mengengleichverteilung auf die einzelnen Zylinder. Dies ist insbesondere für Euro 4 Motoren mit AGR-Raten von bis zu 60% von entscheidender Bedeutung. Es wurden verschiedene Konstruktionsvarianten durch gekoppelte 1D/3D CFD-Rechnungen bewertet und optimiert. Basis für die guten Ergebnisse bildet die Einleitung des Abgases kurz nach der Drosselklappe, die Verteilung über eine lange Mischstrecke auf die beiden Zylinderbänke und eine detailoptimierte AGR-Einleitstelle, **Bild 13**.

3 Motormanagement

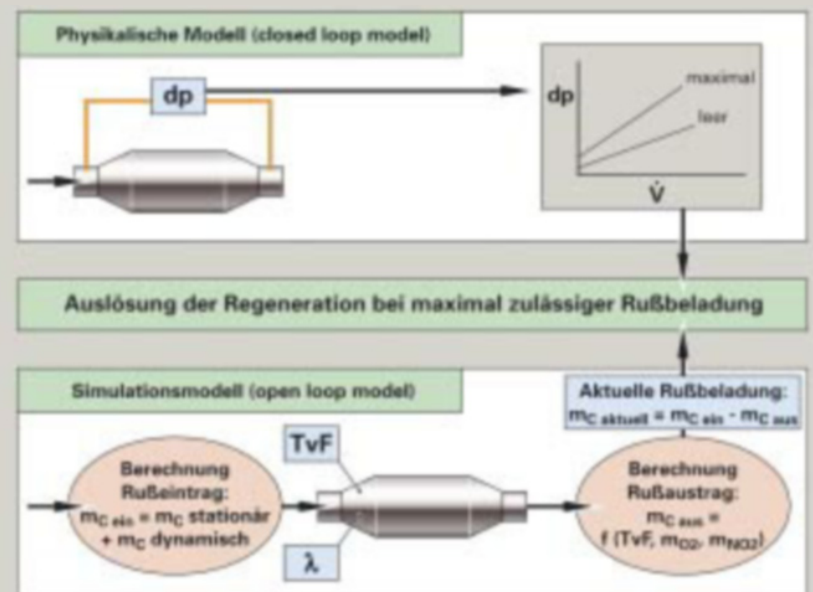
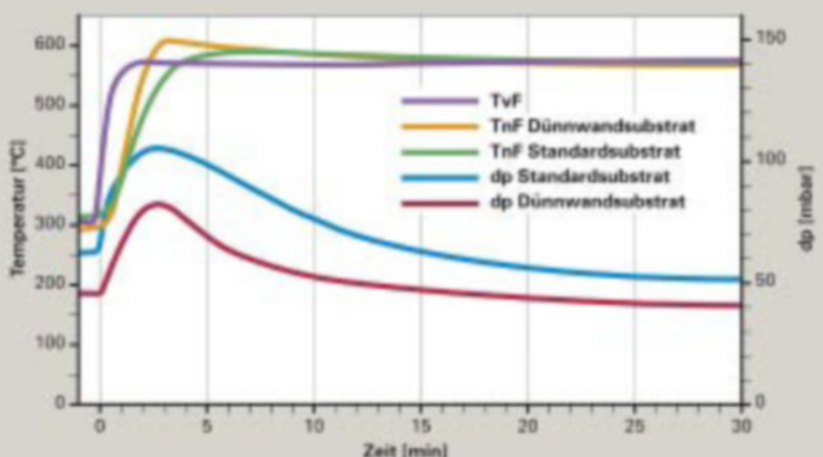
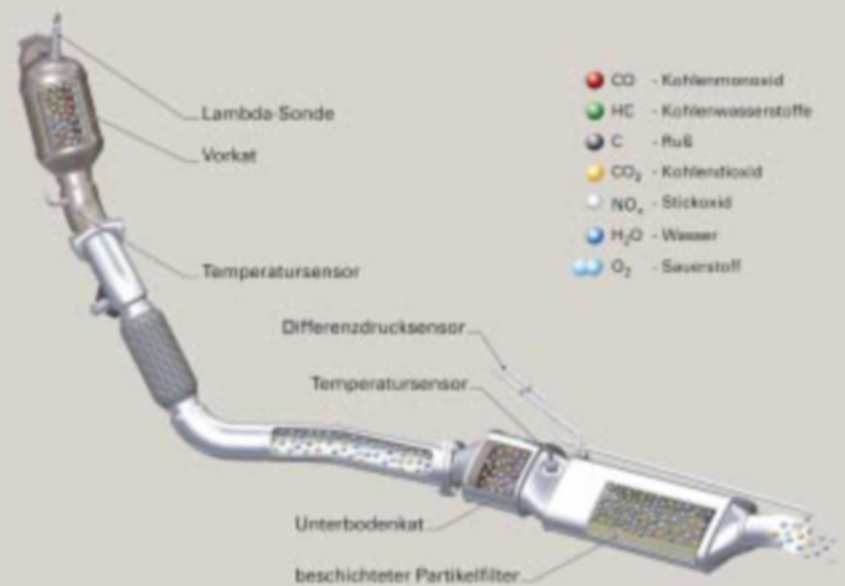
Als Motorsteuergerät wird die neueste Steuergerätegeneration EDC16CP von Bosch verwendet. Dieses Steuergerät verfügt über einen leistungsfähigen 32-bit-Prozessor mit 56 Mhz Taktfrequenz und Speicherkapazität für mehr als 12.000 Applikationsparameter.

Erweiterte Regelfunktionen der elektronischen Motorsteuerung unterstützen die Genauigkeit der Piezo-Inline-Injektoren insbesondere im Hinblick auf Emissions-, Akustik- und Fahrverhaltensstabilität über Laufzeit:

- Injektor-Mengen-Abgleich (IMA), um fertigungsbedingte Mengenstreuungen der einzelnen Injektoren im Motorbetrieb nahezu auf Null zu reduzieren.

- Null-Mengen-Kalibrierung (NMK), um zylinderindividuell die Mengen der Voreinspritzungen zu korrigieren, indem das Drehzahlsignal bei gleichzeitiger Variation der Ansteuerdauer im Schub ausgewertet wird.

4 Abgasnachbehandlung



4 Abgasnachbehandlung

Bild 15: Übersicht Abgasanlage mit Partikelfilter und Sensorik

Figure 15: Overview of exhaust system with particle filter and sensors

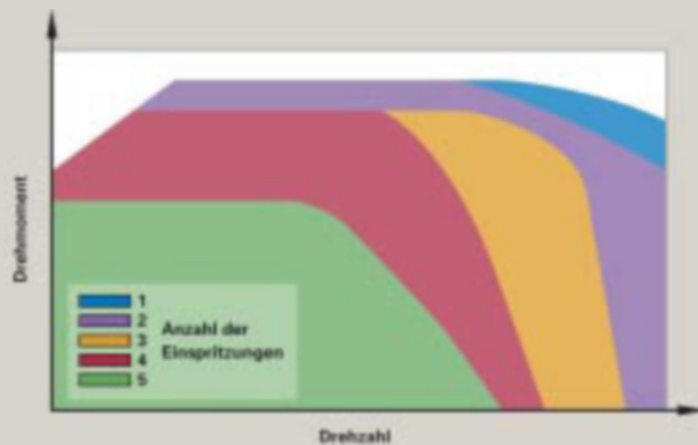


Bild 18: Anzahl der Einspritzungen im Regenerationsbetrieb
Figure 18: Number of fuel injection phases in the regenerating mode

Bild 16: Regenerationsvergleich Dünnwand- und Standardsubstrat bei 580 °C, Teillast
Figure 16: Comparison of the regeneration process with thin-walled and standard substrates at 580 °C and part load



Bild 19: Typischer Temperaturverlauf während einer Regeneration
Figure 19: Typical temperature pattern during regeneration

5 Motorergebnisse

Bild 17: Schema für Beladungserkennung und Auslösung der Regeneration
Figure 17: Schematic diagram for the identification of particle content and initiation of the regeneration process

Technische Daten 3.0l TDI	
Bauart	V6-Motor mit 90° V-Winkel
Hubraum	2967 cm ³
Hub	91,4 mm
Bohrung	83,9 mm
Abgasturbolader	8V56 (8VTS) mit variabler Turbinengeometrie und elektrischem Steiler mit interner Lagerregelung
Ladeduftkühlung	2x Luft / Luft-Kühlung
Drosselklappe	elektrische E-Stöler mit interner Lagerregelung
Drahtklappe	elektrische E-Stöler mit interner Lagerregelung
AGR-System	wassergekühlt, U-durchströmter AGR-Plattenkühler mit geschalteter AGR-Bypassklappe
AGR-Ventil	pneumatisch betätigt
Kolben:	
max. Nuldendurchmesser	50 mm
Verdichtungsverhältnis	17,8 : 1
Einspritzsystem	Common Rail 3. Generation (BOSCH)
max. Druck	1800 bar
Hochdruckpumpe	CP3.2 (integrierte Vorförder-Zahnradpumpe)
Injektor	Piezo-Inline-Injektor
Einspritzdüse	Mikro-Sackloch
Durchfluss	450 ml bei 20 sek und 100 bar
k-faktor	1,5 hydroerosiv gerundet
Lechzahl	7
Spritzloch	konisch, strömungsoptimiert
Spritzwinkel	158°

Tabelle1: Technische Daten des 3,0-l-V6-TDI-Motors
Table1: Technical data of the 3.0-l-V6-TDI-engine

■ Mengen-Ausgleich-Regelung (MAR), um die Momentenbeiträge der einzelnen Zylinder mittelwertneutral gleichzustellen, indem durch Analyse des Drehzahlsignals im Schub die Torsionsschwingungen der Kurbelwelle erfasst und die Einspritzmengen dementsprechend angepasst wird.

■ Mengen-Mittelwerts-Adaption (MMA), um eine Verschiebung des Luftverhältnisses durch die λ -Sonde im Abgasstrang zu detektieren und durch einen Eingriff in die AGR-Regelung zu korrigieren.

■ Nominal-Voltage-Calibraton (NVC), um den individuellen Spannungsbedarf der Piezoaktoren zu überwachen und gegebenenfalls zu korrigieren, damit ein gleichbleibender Hub des Steuerventils im Injektor gewährleistet werden kann.

Die Wirkungsweise der elektronischen Korrekturfunktionen auf die Partikel- und NO_x -Emissionen zeigt **Bild 14**.

4 Abgasnachbehandlung

Bereits die Variante ohne Dieselpartikelfilter (DPF) unterschreitet im Audi A8 die Euro 4 Abgasnorm. Optional auf Kundenwunsch wird ein Dieselpartikelfilter angeboten, der die schon niedrige emittierte Partikelmasse um mehr als 90 % reduziert. Die Abgasanlage setzt sich aus einem motornahen Oxidationskatalysator, einem Unterbodenkatalysator und einem direkt verbundenen Partikelfilter zusammen, **Bild 15**.

Wie bei der Variante ohne Partikelfilter gewährleistet der motornahe Katalysator die schnelle Umsetzung von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid zur Einhaltung der Euro 4 Grenzwerte. Der keramische Partikelfilter aus Siliciumcarbid besteht aus parallel angeordneten, wechselseitig verschlossenen Kanälen. Das durchströmende Abgas muss die porösen Wände passieren und die Rußpartikel werden in den Eingangskanälen zurückgehalten. Das Filtervolumen wurde so ausgelegt, dass über die gesamte Fahrzeuglebensdauer keine Wartung erforderlich ist.

Um dem V6-TDI-Hochleistungs-konzept gerecht zu werden, wird erstmalig auf dem Markt ein neuartiges, dünnwandiges Substrat eingesetzt. Durch die Verringerung der Wanddicken um 37 % gegenüber dem gängigen Standardsubstrat konnte der Abgasgegendruck um bis zu 20 % reduziert werden. In Verbindung mit einer katalytisch wirksamen Filterbeschichtung (CSF) verläuft die aktive Filterregeneration bereits effizient bei Temperaturen von 580-600 °C. Zusammen mit der höheren Zellenanzahl des Dünnwandsubstrats verkürzt sich die Dauer für eine Regeneration um circa 20 %, **Bild 16**. Daraus resultiert

5 Motorergebnisse

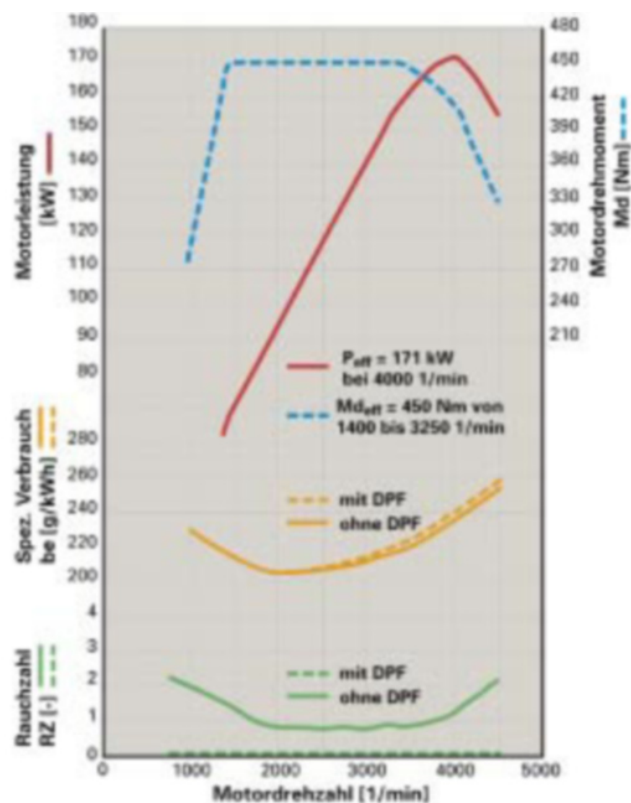


Bild 20: Voll-lastwerte des 3,0-l-V6-TDI-Motors mit und ohne Partikelfilter

Figure 20: Full-load values for the 3.0-l-V6-TDI engine (full load with and without DPF)

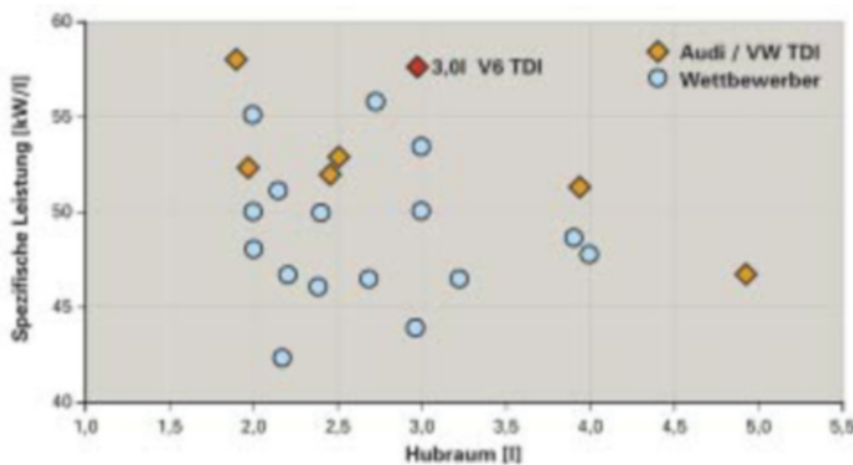


Bild 21: Vergleich der spezifischen Leistung des 3,0-l-V6-TDI-Motors mit dem Wettbewerb

Figure 21: Comparison of the 3.0-l-V6-TDI-engine's specific output with that of competitors

ein niedrigerer Kraftstoffmehrerbrauch und eine höhere Regenerationssicherheit zum Beispiel im Kurzstreckenbetrieb.

Die Regeneration wird ausgelöst, wenn der Partikelfilter seine maximal zulässige Beladung erreicht hat. Dabei werden Laufstrecken bis zu 2000 km erreicht. Die Beladungserkennung erfolgt über zwei Modelle, **Bild 17**: Ein Simulationsmodell errechnet aus den im Steuergerät hinterlegten

Daten die stationäre oder dynamische Rußmassenemission (m_{Cein}) und berücksichtigt die Verringerung der bereits abgelagerten Partikelmasse durch NO_2 -Effekte und thermischen Abbrand via O_2 (m_{Caus}).

Um eine möglichst hohe Genauigkeit der Simulationsrechnung zu erzielen, wird neben Temperatursensoren auch eine Lambdasonde zur Bestimmung des O_2 -Massenstroms und zur Ermittlung des

Rußmassenstroms unter dynamischen Bedingungen eingesetzt. Darüber hinaus wird der Beladungszustand durch Auswertung des gemessenen Differenzdrucks über den Partikelfilter ermittelt.

Die Erzeugung der erforderlichen Regenerationstemperatur von mehr als 580°C in Unterbodenlage erfordert umfangreiche Eingriffe in das Motormanagement. Zu diesem Zweck wird die Menge und die Anzahl der Einspritzungen sowie die Ansteuerbeginne so angepasst, dass die Temperaturerhöhung ohne Auswirkungen auf Akustik und Momentenverhalten des Motors erfolgt.

Optimale Rahmenbedingungen werden hierfür durch das bei Audi eingesetzte Piezo-Common-Rail-Einspritzsystem geschaffen, mit dem kennfeldabhängig bis zu fünf Einspritzungen erfolgen können, **Bild 18**.

Luftseitig wird zur Erwärmung des Brennraums eine Drosselung der Ansaugluft vorgenommen. Zur Erhöhung der Sauerstoffmenge wird die rückgeführte Abgasmenge reduziert. Neben diesen innermotorischen Maßnahmen wird die Abgastemperatur zusätzlich durch exotherme Umsetzung unverbrannter Kohlenwasserstoffe in den Oxidationskatalysatoren angehoben, **Bild 19**.

Durch die Kombination eines hochflexiblen Einspritzsystems, eines neuartigen Substrats und einer intelligenten Regenerationsstrategie in Verbindung mit einer niedrigen Partikelrohmission, konnte ein wirksames, zuverlässiges und kaum verbrauchserhöhendes Abgasnachbehandlungssystem realisiert werden.

5 Motorergebnisse

Die wesentlichen thermodynamischen Merkmale des neuen 3.0-V6-TDI-Motors sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Das Drehmoment- und Leistungspotenzial des V6-TDI-Motors zeigt die erzielte Volllastkurve, **Bild 20**. Bemerkenswert ist der frühe Drehmomentverlauf. Bereits ab 1400/min wird das maximale Moment von 450 Nm erreicht und steht bis zu einer Drehzahl von 3250/min zur Verfügung. Dabei liegen die Rauchwerte bei der Variante ohne DPF auf einem sehr niedrigen Niveau. In weiten Bereichen liegen sie unter einer Rauchzahl von 1. Auch der Verbrauch ist günstig. Im Nennleistungsbereich wird ein spezifischer Verbrauch von nur 235 g/kWh erreicht. Der Verbrauchsnachteil für die Variante mit DPF beträgt an der Volllast etwa 1 bis 2 %.

Mit einer spezifischen Leistung von 57,6 kW/l werden derzeit die höchsten spezifischen Werte bei einem PKW-Diesel-Motor mit sechs Zylindern erzielt, **Bild 21**.

Perfekt.

Automatische Seriene-Generierung mit TargetLink 2.0 von dSPACE – vom Simulink®-Modell ins Steuergerät

- Grafische Modellierung und Offline-Simulation
- Effizienter ANSI-C-Code auf Knopfdruck
- Konsistenz zwischen Modell und C-Code
- Vermeidung von Implementierungsfehlern
- Kürzere Entwicklungszeiten

TargetLink 2.0 setzt neue Maßstäbe mit der OSEK/VDX-kompatiblen Code-Erzeugung, einschließlich aller Betriebssystemaufrufe und intelligenter Inter-Task-Kommunikation.

Dies bedeutet für Sie:
Noch kürzere Entwicklungszeit,
Sicherung der Qualität und
noch mehr Durchgängigkeit.

MeasComp: Halle 1, Stand 33 + 34

www.dspace.de



Das Verbrauchskennfeld des neuen V6-TDI-Motors zeigt im Bestpunkt hervorragende 202 g/kWh, **Bild 22**. Basis für die sehr flachen Iso-Linien sind neben der oben beschriebenen Brennverfahrensauslegung auch die reibungsreduzierenden Maßnahmen wie Rollenschlepphebel und UV-Photonenbelichtung der Zylinderlaufflächen.

6 Fahrzeugergebnisse

Erstmals in Kombination mit dem V6-TDI-

Motor kommt das neue sechsstufige quattro-Tiptronic-Automatikgetriebe zum Einsatz. Durch die hohen Leistungs- und Drehmomentwerte sind in allen Situationen exzellente Fahrleistungen jederzeit abrufbar. Gleichzeitig werden schon allein durch innermotorische Maßnahmen die sehr strengen Abgasgrenzwerte nach Euro 4 erreicht. Um die schon niedrigen Partikelwerte weiter zu reduzieren, wird optional ein Partikelfilter angeboten. Die Emissionen im MVEG-Test mit und ohne DPF zeigt **Bild 23**.

5 Motorergebnisse

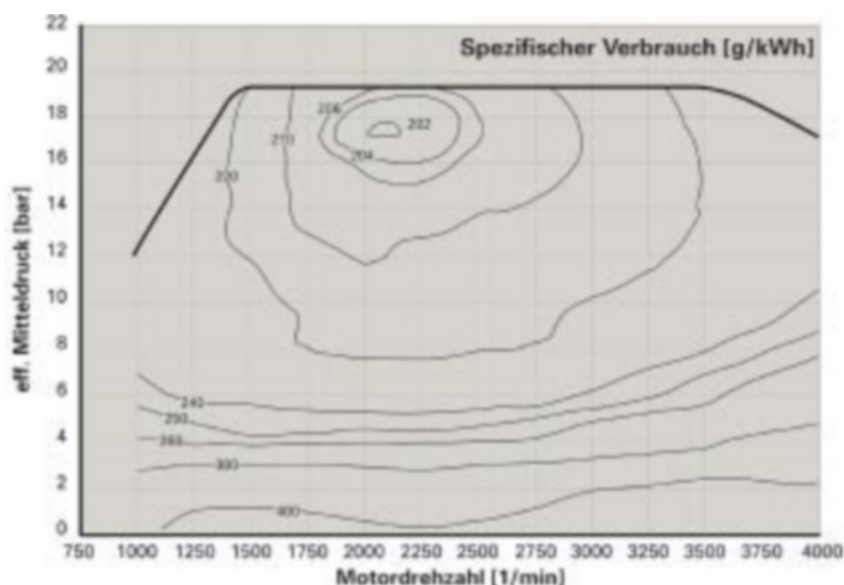


Bild 22: Verbrauchskennfeld 3,0-l-V6-TDI-Motor ohne Dieselpartikelfilter (DPF)
Figure 22: Fuel-consumption characteristic of the 3.0-l-V6-TDI engine without DPF

6 Fahrzeugergebnisse

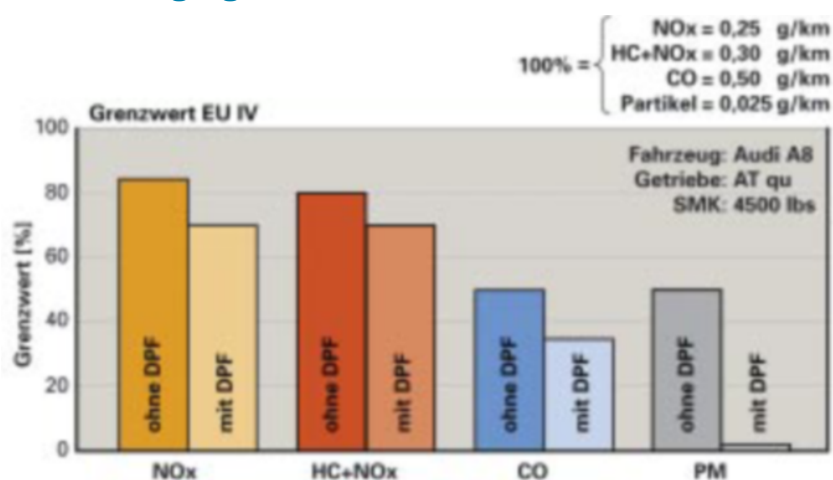


Bild 23: Emissionen mit und ohne DPF im MVEG-Test mit Automatik-quattro-Getriebe im A8
Figure 23: Emissions for an Audi A8 with automatic transmission with and without DPF in the MVEG test

Tabelle 2: Fahrleistungen und Verbrauch des 3,0-l-V6-TDI-Motors im Audi A8 mit/ohne Partikelfilter
Table 2: Performance and fuel consumption of the 3.0-l-V6-TDI-engine in the Audi A8 with and without DPF

Fahrleistungen des 3.0 V6 TDI im A8	
Motor	EU4 171 kW / 450 Nm
Beschleunigung 0 - 100 km/h [sec]	7,8
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	243
Kraftstoffverbrauch [l/100 km] MVEG gesamt	8,4 (8,5 mit DPF)
Fahrzeugleergewicht [kg]	1830

Durch nasse Filtertechnologie und optimierte Applikation können gleiche Fahrleistungen dargestellt werden. Der Verbrauch im MVEG-Test ist um nur 0,1 l/100 km höher als ohne DPF. Die **Tabelle 2** zeigt die Fahrleistungs- und Verbrauchswerte des 3,0-l-V6-TDI-Motors mit Automatik-Getriebe im A8.

7 Zusammenfassung

Der neu entwickelte 3,0-l-V6-TDI-Motor ist der erste Dieselmotor aus der Audi-V-Motorenfamilie mit einem Zylinderabstand von 90 mm. Mit bis zu 171 kW und 450 Nm ist er der derzeit stärkste Sechszylinder-Pkw-Dieselmotor weltweit und zeichnet sich durch exzellente Fahrleistungen bei niedrigen Kraftstoffverbräuchen aus.

Er erfüllt mit innermotorischen Maßnahmen auch in der Luxusklasse und in Verbindung mit Automat-quattro-Antrieb die strengen Euro 4 Abgasgrenzwerte. Um die Partikel weiter zu reduzieren, und um Kundenwünschen nach einem Partikelfilter erfüllen zu können, wird optional ein wartungsfreies CSF-Partikelfiltersystem angeboten.

Erstmals kommt beim 3,0-l-V6-TDI ein Piezo-Inline-Injektor mit einem maximalen Einspritzdruck von 1600 bar zum Einsatz. Das Einspritzsystem ermöglicht neben guten Leistungsdaten auch eine hervorragende Laufkultur und Verbrennungsakustik. Zudem kann der Partikelfilter mit einer oder zwei Nacheinspritzungen optimal regeneriert werden.

Der neue 3,0-l-V6-TDI ist in seiner Klasse der derzeit umwelt- und ressourcenschonendste Dieselmotor für Personenwagen.

Literaturhinweise

- [1] Anton, C.; Bach, M.; Bauder, R.; Franke, G.; Hatz, W.; Hoffmann, H.; Ribes-Navarro, S.: Der neue 3-l-V6-TDI-Motor von Audi – Teil 1: Konstruktion und Mechanik. In: MTZ 65 (2004), Nr. 7-8, S. 518
- [2] Bauder, R.; Bechle, S.; Dorsch, W.; Pölzl, H.-W.; Riegger, R.; Schiffgens, H.-J.: Der neue V6-TDI-Motor von Audi – Teil 2: Thermodynamik. In: MTZ 64 (2003), Nr. 7-8, S. 606
- [3] Bauder, R.; Hatz, W.; Pölzl, H.-W.; Michels, E.; Schiffgens, H.-J.; Streng, C.; Wimmer, W.: Audi 4.0-V8-TDI – Teil 2: Thermodynamik und Applikation. In: MTZ 64 (2003), Nr. 10, S. 860
- [4] Hummel, K.; Boecking, F.; Groß, J.; Stein, J.-O.; Dohle, U.: 3. Generation Pkw-Common-Rail von Bosch mit Piezo-Inline-Injektoren. In: MTZ 65 (2004), Nr. 3, S. 180

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.

MTZ Vieweg Verlag · Postfach 1546 · D-65173 Wiesbaden
Hotline 06 11/78 78-151 Fax 06 11/78 78-423
email: vieweg.service@gvw-fachverlage.de