

Neuer Ottomotor mit Direkteinspritzung und Doppelaufladung von Volkswagen

Teil 2: Thermodynamik

Mit dem neuen TSI-Motor im Golf GT setzt Volkswagen einen Meilenstein bei der Entwicklung von Ottomotoren. Die Leistung von 125 kW aus 1,4 l übertrifft bei weitem diejenige hubraumgleicher Motoren, und dies bei einem für die Leistungsklasse deutlich verbesserten Kraftstoffverbrauch. Dieses Ergebnis wurde möglich durch die Kombination von Downsizing, Direkteinspritzung und Doppelaufladung. Während in Teil 1 in der ATZ 11/05 die konstruktive Gestaltung beschrieben wurde, befasst sich Teil 2 mit der Thermodynamik.



1 Einleitung

Mit der Markteinführung der Direkteinspritzung bei den FSI-Motoren hat Volkswagen einen wichtigen Schritt in Richtung Verbrauchsabsenkung bei Ottomotoren vollzogen. In konsequenter Weiterentwicklung dieser Technologie kann ein weiteres bedeutendes Verbrauchspotenzial durch Downsizing erreicht werden. Bei einer vorgegebenen Nennleistung wird das Hubvolumen reduziert, wodurch sich Betriebspunkte aus Bereichen mit geringer Motorlast zu Kennfeldbereichen mit höherer Last verschieben. Einerseits bewirkt diese Arbeitspunktverlagerung eine Verringerung der Ladungswechselverluste durch stärkere Entdrosselung, andererseits reduzieren sich die Reibleistungsverluste mit der Reduzierung des Hubraums und der Motorbaugröße. Beide Effekte führen zu einer deutlichen Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads.

Die Hubvolumenreduzierung führt allerdings zu einer Minderung des Drehmoments besonders bei niedrigen Drehzahlen, was im Kundenbetrieb nicht akzeptiert werden kann. Dieser Effekt kann jedoch mit Hilfe der Aufladung kompensiert werden. Neben der Turboaufladung ist bei Ottomotoren die mechanische Aufladung in Serie realisiert. Für die Auslegung des Aufladesystems sind neben der Verbrauchsminderung

im verstärkten Maße die gestiegenen Kundenanforderungen an Fahrdynamik und Fahrkomfort zu berücksichtigen. Für eine optimale Zielerreichung wird im neuen TSI-Motorkonzept deshalb die mechanische Aufladung mit der Abgasturboaufladung so kombiniert, dass sich die spezifischen Vorteile der beiden Systeme ideal ergänzen.

2 Verfahren

2.1 Auslegung der Aufladeaggregate

Die Turboladaufladung eignet sich gut zur Darstellung einer hohen spezifischen Motorleistung bei moderatem Abgasgegenstand, wenn bewusst auf Low-end-Torque verzichtet wird. Die mechanische Aufladung wird hingegen in erster Linie wegen des guten Ansprechverhaltens bereits bei niedrigen Drehzahlen eingesetzt. Bei der Turboaufladung mit mechanischer Zusatzaufladung werden die Vorteile beider Konzepte miteinander kombiniert. Das Grundprinzip ist bereits bekannt [1, 2]. **Bild 1** zeigt den prinzipiellen Aufbau des Systems.

Im Wasserpumpenmodul ist für die Schaltung des Kompressors eine Magnetkupplung integriert. Der mechanische Lader wird von der Kurbelwelle über einen Riemen angetrieben. Im unteren Drehzahlbereich wird der Kompressor bei Bedarf zur Unterstützung des Abgasturboladers akti-

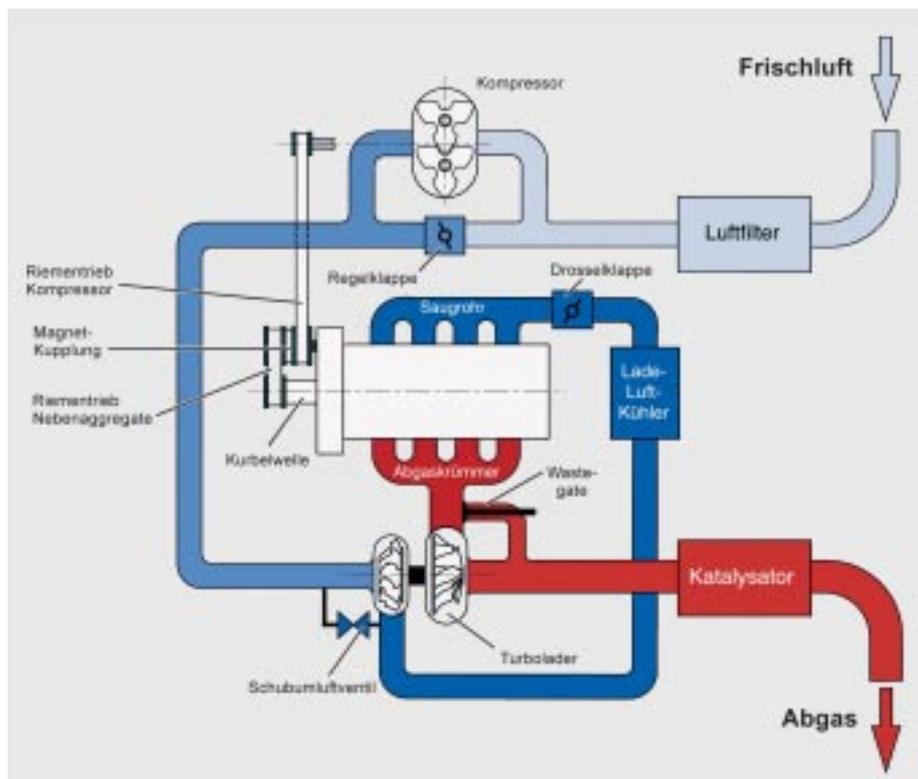


Bild 1: Prinzip der Turboaufladung mit mechanischer Zusatzaufladung
Figure 1: Principle of turbocharging with additional, mechanical charging

Die Autoren



Dr.-Ing. Rudolf Krebs
ist Leiter der Aggregateentwicklung bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dr.-Ing. Rüdiger Szengel
ist Leiter der Ottomotorenentwicklung bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dr.-Ing. Hermann Middendorf
ist Leiter der Entwicklung EA111-Ottomotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dipl.-Ing. Helmut Sperling
ist Unterabteilungsleiter der Applikation EA111-Ottodirekteinspritzmotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dipl.-Ing. Werner Siebert
ist Mitarbeiter der Applikation EA111-Ottodirekteinspritzmotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dr.-Ing. Jörg Theobald
ist Unterabteilungsleiter in der Brennverfahrenentwicklung EA111-Ottodirekteinspritzmotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dr.-Ing. Karsten Michels
ist Mitarbeiter der Brennverfahrenentwicklung EA111-Ottodirekteinspritzmotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.

viert. Liefert der Abgasturbolader bei höheren Drehzahlen allein ausreichend Ladedruck, so kann die Kompressorregelklappe geöffnet und der Kompressor abgeschaltet werden.

Bei Stationärbetrieb wird der Kompressor lediglich im oberen Lastbereich bis zu Drehzahlen von max. 2400/min benötigt, **Bild 2**. Da der Abgasturbolader den Sollladedruck im dynamischen Betrieb je nach gewählter Gangstufe verzögert erreicht, bleibt der Kompressor dynamisch länger eingeschaltet. Spätestens bei einer Motordrehzahl von 3500/min wird der Kompressor abgeschaltet. Der Abgasturbolader ist hier in jedem Fall – also auch dynamisch beim Übergang vom Schub- in den Volllastbetrieb – in der Lage, den gewünschten Ladedruck allein bereitzustellen. Bei dieser Drehzahl erreicht der Kompressor seine Maximaldrehzahl von 18.000/min bei einer Übersetzung von 5:1.

Durch die Kombination der Aufladeverfahren kann die Abgasturbine großzügiger ausgelegt und damit ein reduziertes Abgasgedruckniveau erreicht werden. Zu berücksichtigen ist dabei aber, dass andererseits die Einschalthäufigkeit und -dauer des mechanischen Laders möglichst gering gehalten werden, damit die für den Laderantrieb benötigte Antriebsleistung den Verbrauch nicht unzulässig erhöht. Schließlich muss stationär und dynamisch ein kontinuierlicher Drehmomentverlauf sichergestellt sein.

Das maximale Ladedruckverhältnis an der stationären Volllast beträgt zirka 2,5 bei 1500/min, wobei hier Abgasturbolader und mechanischer Lader etwa bei gleichem Druckverhältnis betrieben werden, **Bild 3**. Ein Turbomotor ohne Kompressorunterstützung würde hier ein deutlich geringeres Ladedruckverhältnis erreichen. Durch die Kompressoraufladung wird der Luftdurchsatz im unteren Drehzahlbereich stark erhöht, was durch das größere Abgasenergieangebot auch der Turbine und damit dem ATL-Verdichter zugute kommt. Der Kompressor kann deshalb frühzeitig durch die Öffnung des Laderbypass entlastet werden. Daher beschränkt sich der Betriebsbereich des mechanischen Laders auf einen kleinen Kennfeldbereich mit überwiegend geringer Leistungsaufnahme.

Der Abgasturbolader ist so ausgelegt, dass die Volllastbetriebslinie im unteren Motordrehzahlbereich nahe an der Pumpgrenze des Verdichters verläuft, **Bild 4**. Der Verdichter hat hier schon gute Wirkungsgrade, was zu einem zügigen Beschleunigungsverhalten des Abgasturboladers beiträgt. Das gesamte Ladedruckverhältnis von Abgasturbolader und mechanischem Lader zusam-

men liegt im Motordrehzahlbereich bis 2000/min weit jenseits der Verdichterpumpgrenze. Eine einstufige Turboaufladung wäre also schon aufgrund des beschränkten Verdichterbetriebsbereichs für die angestrebten Volllast-Zielwerte ungeeignet. Aufgrund der Kompressorunterstützung kann der Turbolader auf gute Wirkungsgrade bei Nennleistung ausgelegt werden. Hieraus resultieren ein geringes Ladedruck- und Abgasgedruckniveau sowie eine großzügige Höhenreserve des Turboladers.

Bild 5 zeigt den gemessenen instationären Drehmomentaufbau für eine auf dem Motorprüfstand simulierte Drehzahlrampe, die etwa einer Volllastbeschleunigung in

der dritten Gangstufe entspricht. Beim reinen ATL-Motor ohne Kompressorunterstützung wird nach zirka 0,5 s der Sauger-Volllastpunkt erreicht. Der Zielwert des Drehmoments (100 %) stellt sich erst nach zirka 4,8 s ein. Neben dem schleppenden Ladedruckaufbau wird die sich aufgrund der Abgasturbolader-Dynamik ergebende Unstetigkeit im Drehmomentaufbau vom Fahrer als unangenehm empfunden.

Bei Betrieb mit Kompressor ändert sich diese Charakteristik grundlegend. Sobald der Kompressor eingekuppelt ist, trägt er zu einer Erhöhung des Saugrohrdruckes bei. Deshalb ist der Gradient des Drehmomentanstiegs steiler als bei der reinen Abgastur-

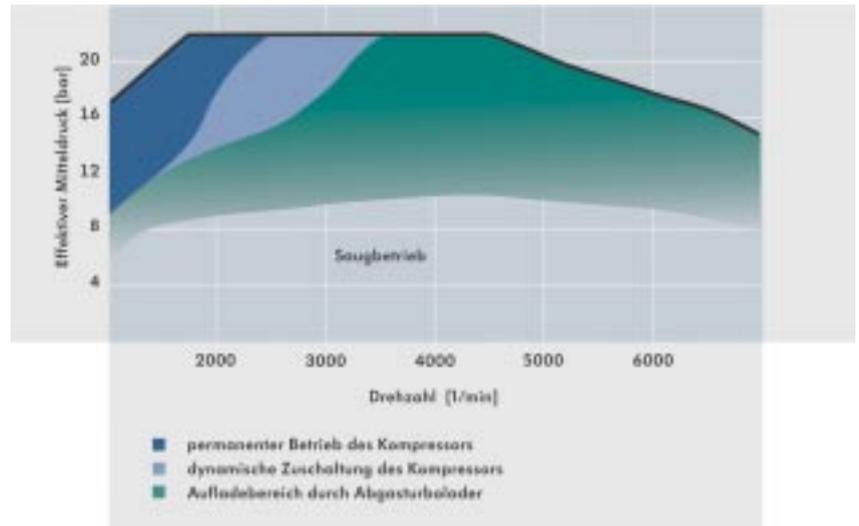


Bild 2: Betriebsbereich des Kompressors (schematisch)

Figure 2: Compressor operating range (schematic)

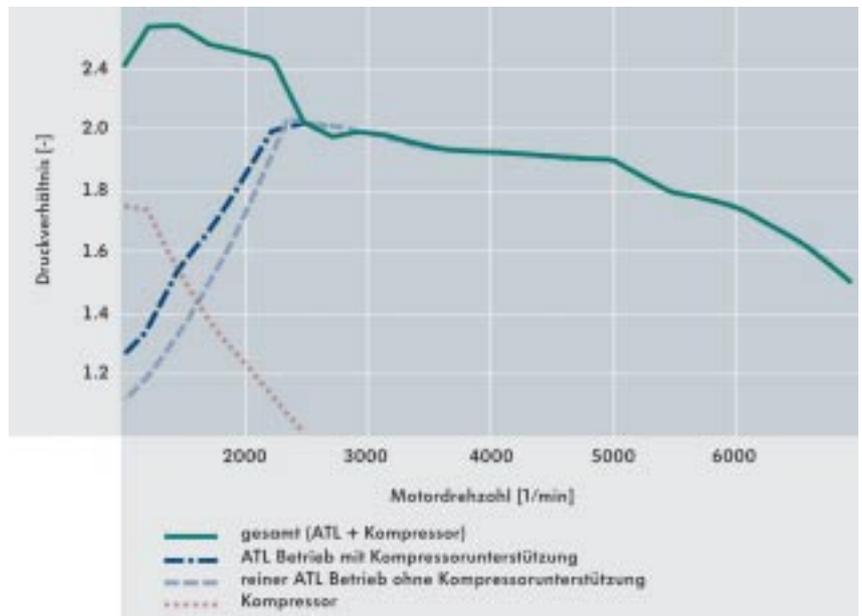


Bild 3: Druckverhältnisse Kompressor und ATL entlang der Volllast

Figure 3: Compressor and turbocharger pressure ratios throughout full-load

Start frei für die neue Zahnriemen-Generation!

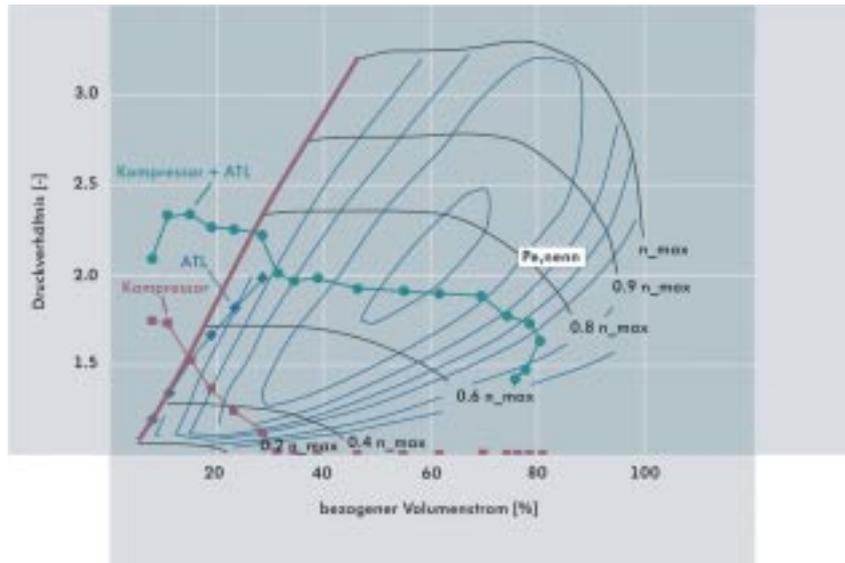


Bild 4: Verdichterkennfeld mit Volllastbetriebslinien (ATL, Kompressor, Kompressor + ATL)

Figure 4: Compressor performance map with full-load operating curves (turbocharger, compressor, compressor + turbocharger)

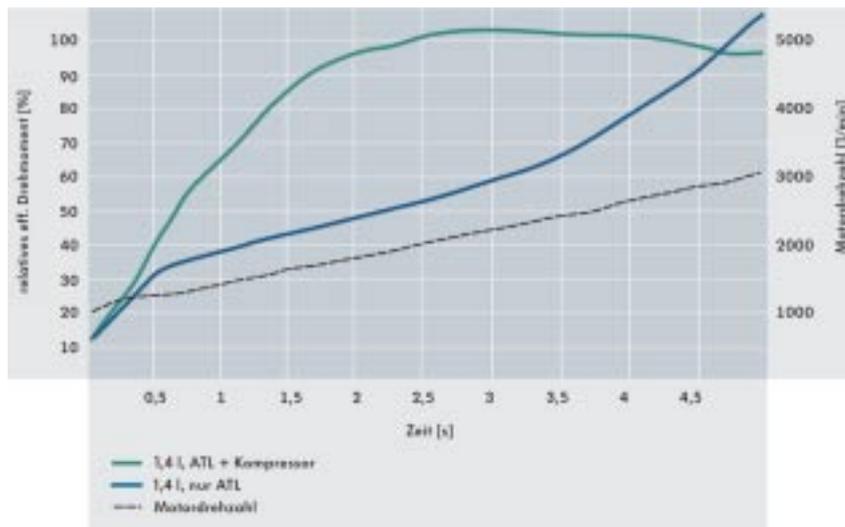


Bild 5: Instationärer Drehmomentaufbau bei Abgasturbolader-Aufladung mit und ohne mechanische Zusatzaufladung

Figure 5: Transient torque build-up during turbocharger charging with and without additional mechanical charging

Getriebeübersetzung	
Golf GT mit 1,4 l -125 kW-TSI-Motor	v 1000 [km/h]
1. Gang	8,4
2. Gang	14,0
3. Gang	19,2
4. Gang	25,0
5. Gang	30,7
6. Gang	36,7

Tabelle: Getriebeübersetzung

Table: Gear ratio



Zahnriemen, ob ölresistent, kalteresistent, besonders geräuscharm oder für den Einsatz in der Dieselsechne – ContiTech hat mit dieser innovativen Produktserie vier Riemen entwickelt, die den hohen Qualitäts- und Leistungsansprüchen künftiger Motorgenerationen gerecht wird. Neue Werkstofftechnologien sorgen für ein Optimum an Leistung und Kraftübertragung, auch bei hohen Geschwindigkeiten. Vom Startschuss bis zur Zielgeraden – ContiTech Runner halten ein Motorenleben lang.

ContiTech Antriebssysteme GmbH
www.contitech.de



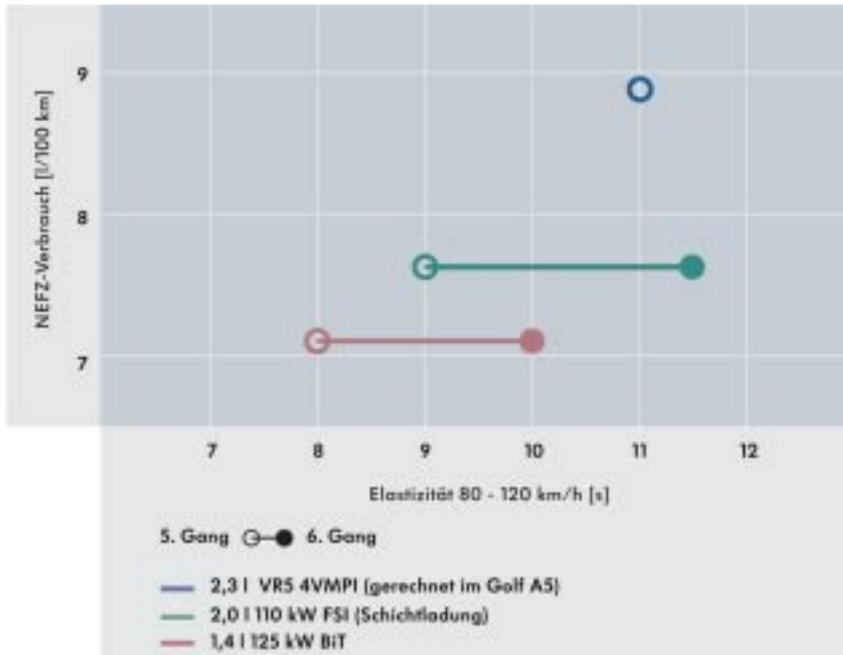


Bild 6: Elastizität und Kraftstoffverbrauch im Golf
Figure 6: Elasticity and fuel consumption in the Golf

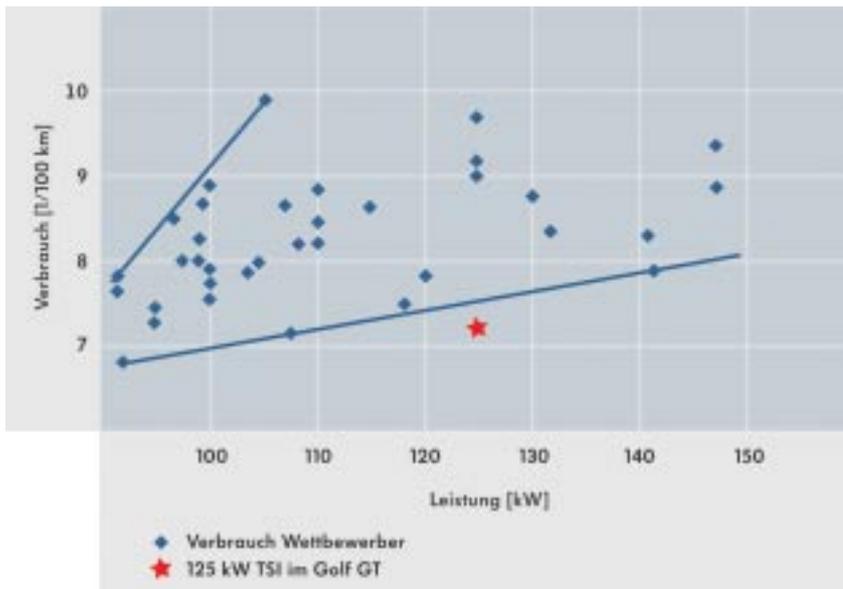


Bild 7: NEFZ-Verbrauch Wettbewerbsvergleich
Figure 7: NEDC consumption in comparison with the competition

bolader-Aufladung. Dieser Gradient bleibt auch oberhalb der Saugvollast erhalten. Der Drehmomentaufbau verläuft bis zur Erreichung des Zielmomentes stetig. Daher fühlt sich ein derartig aufgeladener Motor auch subjektiv an wie ein Saugmotor mit weitaus größerem Hubvolumen.

2.2 Auslegung der Ladeluftkühlung

Durch den Einsatz eines effektiven Ladeluftkühlers, der im Paket mit Wasserkühler und Klimakondensator die gesamte Frontfläche nutzt, ist es möglich, die Ladeluft auf dem

Weg vom Abgasturbolader bis zur Drosselklappe auf 5 °C über Umgebungstemperatur zu kühlen. Für die Basisauslegung konnte dadurch von einer Ansaugtemperatur von 25 °C ausgegangen werden, wodurch in weiten Kennfeldbereichen der Motor mit dem verbrauchsoptimalen Zündzeitpunkt betrieben werden kann.

Durch die Auslegung des Drehmomentverlaufs auf einen maximalen Wert von 240 Nm ab 1750/min und die gewählte Getriebeübersetzung, **Tabelle**, können sehr gute Fahrleistungen bei hervorragendem Ver-

brauch erreicht werden. In **Bild 6** sind jeweils für den fünften und sechsten Gang die Werte im NEFZ-Zyklus über Elastizität (80 bis 120 km/h) für unterschiedliche Motorisierungen im VW Golf dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der 1,4l-TSI-Motor mit 7,2 l/100km den niedrigsten Verbrauch bei gleichzeitig besten Beschleunigungswerten gegenüber den Hubraumgrößerer Motoren erreicht. Auch im Vergleich mit dem Wettbewerb setzt der Verbrauch des TSI mit 125 kW einen neuen Meilenstein in der Ottomotorenentwicklung, **Bild 7**.

3 Brennverfahren

Der 1,4l-TSI-Motor weist bei einem Hub von 75,6 mm und einem Bohrungsdurchmesser von 76,5 mm einen sehr kompakten Brennraum auf, der zylinderkopfseitig als Dachbrennraum mit zentraler Zündkerzenlage ausgeführt ist. Der Kolben verfügt über eine flache, weite Mulde. Diese hinsichtlich Klopfestigkeit optimierte Grundgeometrie erlaubt ein Verdichtungsverhältnis von 10,0 trotz der hohen Ladedrücke von 2,5 bar und ermöglicht herausragende spezifische Funktionswerte:

- effektiver Mitteldruck 21,6 bar
- spezifisches Drehmoment 172,6 Nm/l
- spezifische Leistung 90 kW/l.

Durch den Einsatz der auch schon im FSI-Saugmotor [3] verwendeten Ladungsbewegungsklappen, die im geschalteten Zustand die Einlasskanäle im unteren Bereich zu 50 % verschließen, wird die Ladungsbewegung in ihrer Intensität zum Erreichen einer möglichst optimalen Brenngeschwindigkeit im gesamten Motorkennfeld angepasst. Ab einer Drehzahl von zirka 2800/min geben die Ladungsbewegungsklappen den gesamten Einlasskanalquerschnitt frei. Die Einlasskanäle konnten somit konsequent strömungsoptimiert auf hohe Zylinderfüllung zur Realisierung der Zielleistung von 125 kW ausgelegt werden.

Zur Aufheizung des Katalysators kommt beim 1,4l-TSI-Motor die Katheizstrategie der Doppeleinspritzung mit einer frühen Kraftstoffeinspritzung während des Ansaugtaktes sowie einer späten, zweiten Kraftstoffeinspritzung vor Zünd-OT (zirka 50 °KW) zur Anwendung. Um die zur Erreichung eines möglichst großen Abgaswärmestromes notwendigen extrem späten Zündwinkel bei guter Motorlaufruhe realisieren zu können, ist eine exakte Abstimmung der Parameter Ladungsbewegung, Kolbenmuldengeometrie und Strahlbild des Hochdruckinjektors von essentieller Bedeutung, **Bild 8**. Die hierzu gegenläufigen Anforderungen an die Kolbenmuldengestaltung im Homogenbetrieb des

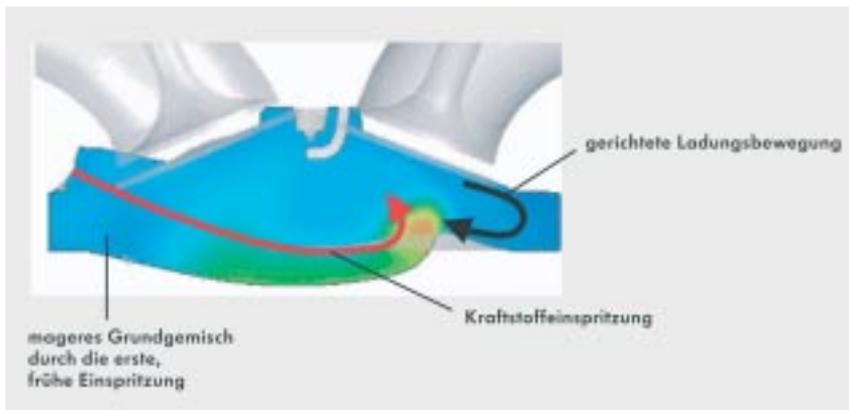


Bild 8: CFD-Simulation Zylindermittelschnitt – Katalysatorheizen mit später zweiter Kraftstoffeinspritzung, 25 °KW vor Zünd-OT

Figure 8: CFD simulation cylinder centre section – catalytic converter heating with late, secondary fuel injection, crankshaft angle 25° before TDC



Bild 9: Sechslloch-Hochdruckeinspritzventil, Laserschnitt durch Kraftstoffstrahl

Figure 9: 6-hole, high-pressure injector, laser section through fuel spray

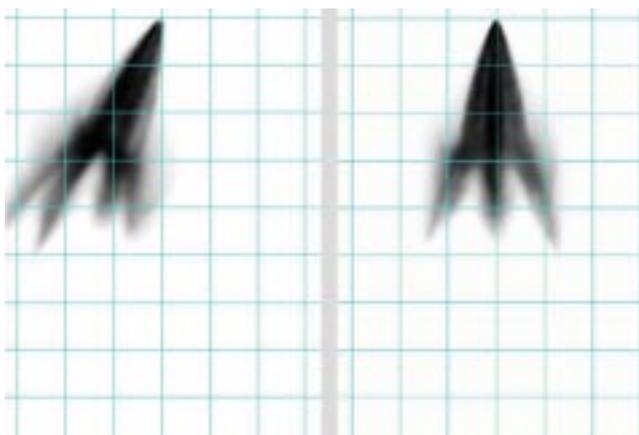


Bild 10: Spraybild unter Umgebungsbedingungen (Mie-Streuung)

Figure 10: Spray pattern under ambient conditions (Mie effect)

Einlasskanal und Zylinderkopfdichtungsebene angeordnet.

Die nahezu frei wählbare Anordnung der Einzelstrahlen des Sechslloch-Hochdruckeinspritzventils ermöglicht im Gegensatz zu einem herkömmlichen Drallinjektor die Formung des Kraftstoffeinspritzstrahles. Insbesondere die Benetzung der geöffneten Einlassventile bei einer frühen Einspritzung während des Ansaugtaktes wird vermieden. Eine bessere Homogenisierung des Luft-Kraftstoff-Gemisches und damit geringere HC-Emissionen sowie geringere Zyklusschwankungen sind das positive Ergebnis.

Man erkennt in den Aufnahmen aus der VW-eigenen Druckkammer, **Bild 10**, sowohl in der Seiten- als auch in der Frontalansicht die sich ausbildenden Einzelstrahlen. Durch eine besondere Geometrie der Kraftstoffaustrittsbohrung ist es zudem gelungen, die Penetration der Einzelstrahlen soweit zu reduzieren, dass eine Benetzung von Brennraumoberflächen mit Kraftstoff zuverlässig vermieden werden kann. Dies trägt insbesondere bei kaltem Motor zu geringen Abgasrohmissionen bei.

Bild 8 zeigt zusätzlich im Laserschnitt die Verteilung flüssigen und auch dampfförmigen Kraftstoffes im Kraftstoffstrahl (30 mm Abstand zur Injektorspitze) unter Katheizbedingungen beim Einsatz der Laser-induzierten Fluoreszenz-Messtechnik (LIF). Deutlich zu erkennen ist die höhere Kraftstoffkonzentration in den sechs Einzelstrahlen. In der Strahlmitte ist die Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches wesentlich weiter vorgeschritten. Die Kombination aus guter Teil-Homogenisierung und abgestimmter Penetration der Einzelstrahlen bildet die Voraussetzung für den stabilen Motorlauf des beschriebenen Katheizverfahrens mit der kolbenwandgeführten zweiten Kraftstoffeinspritzung bei niedrigen Abgasrohmissionen.

Vom Leerlauf bis zu einer Literleistung von 90 kW/l ergibt sich eine sehr große Spreizung von minimaler bis maximaler einzuspritzender Kraftstoffmenge. Um im Leerlauf die minimale Einspritzzeit des Injektors nicht zu unterschreiten und eine ausreichende Zerstäubung der Einspritzstrahlen und damit eine gute Gemischbildung zu gewährleisten, erfolgt hier die Einspritzung mit einem Einspritzdruck von 60 bar.

Unter Vollastbedingungen darf zur Einhaltung geringer Emissions- und Verbrauchswerte die Einspritzung einerseits nicht zu früh beginnen, um die auf den Kolben aufgespritzte Kraftstoffmenge so gering wie möglich zu halten, andererseits muss vom Einspritzende bis zum Brennbeginn ge-

Motors – geringe Kolbenoberfläche zur Reduzierung des Wärmeeintrages bei Vollast und zur Vermeidung von HC-Nestern – führen zu einer Vielzahl an möglichen Konfigurationen. Anhand der Ergebnisse der CFD-Simulation wurden die vielversprechendsten Varianten ausgewählt und am Motorprüfstand miteinander verglichen. Der Umfang

der Motoruntersuchungen in der Brennverfahrensentwicklung konnte so deutlich reduziert werden.

Beim 1,4-l-TSI-Motor kommt erstmalig ein Mehrloch-Hochdruckeinspritzventil mit sechs Kraftstoffaustrittsbohrungen zum Einsatz, **Bild 9**. Der Injektor ist wie bei den FSI-Saugmotoren auf der Einlassseite zwischen

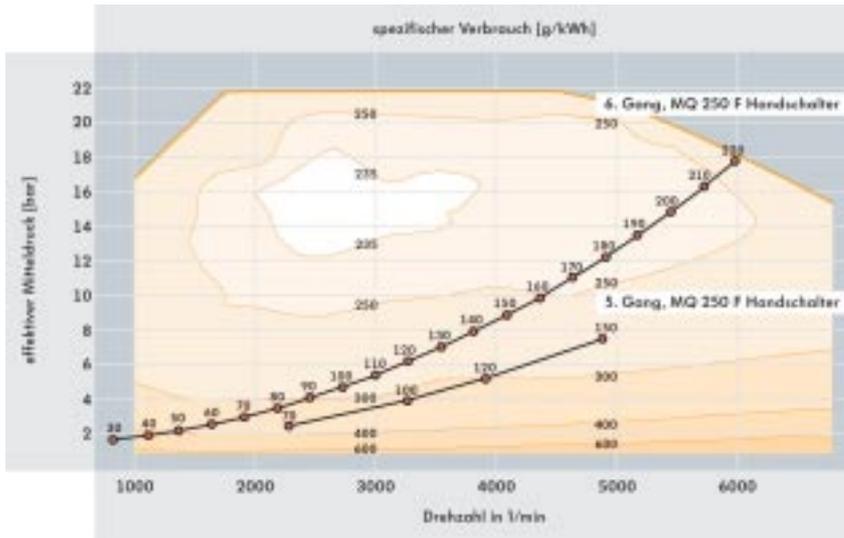


Bild 11: Verbrauchskennfeld 1,4-l-125-kW-TSI
Figure 11: 1.4-litre 125 kW TSI consumption map

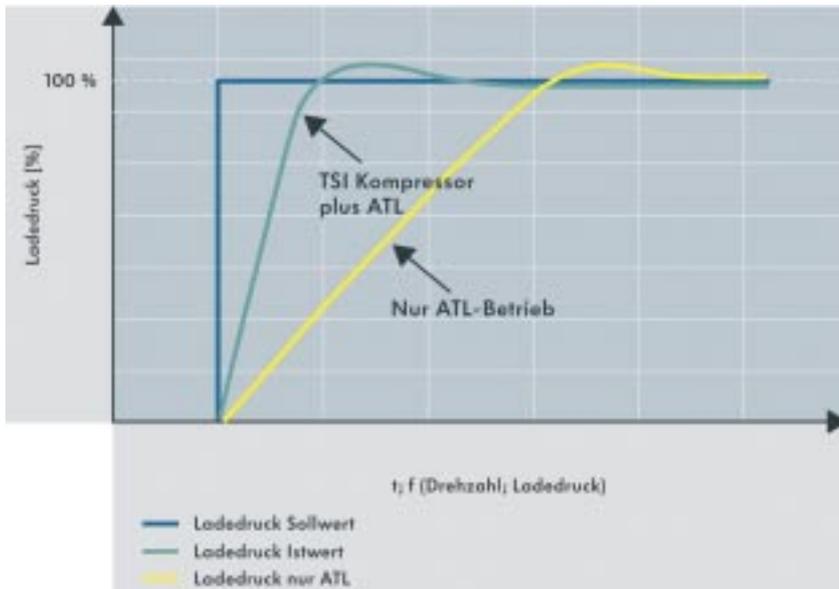


Bild 12: Druckaufbau
Figure 12: Pressure build-up

nügend Zeit für die Gemischaufbereitung verbleiben. Die dadurch zeitlich begrenzte Einspritzdauer wird insbesondere bei hohen Drehzahlen durch die Anhebung des Einspritzdruckes auf 150 bar erreicht.

Die oben beschriebenen Maßnahmen führen zu einem Verbrauchskennfeld, **Bild 11**, das weite Bereiche mit sehr niedrigen spezifischen Verbrauchswerten zeigt. Dabei liegt der Verbrauchsbestpunkt mit 235 g/kWh auf einem hervorragenden Niveau. Die im Diagramm dargestellten Straßenteillastkurven zeigen, dass auch bei hohen Geschwindigkeiten der Motor in Betriebspunkten mit extrem niedrigen spezifischen Verbräuchen arbeitet.

4 Motorsteuerung

Die Steuerung des TSi-Motors erfolgt durch eine Weiterentwicklung des Steuergeräts, das bereits bei den Saug-FSI-Motoren von Volkswagen [4] im Serieneinsatz ist. Das Motorsteuergerät ist ein sensorgeführtes System, bei dem die Motorfüllung mit Hilfe eines Drucksensors erfasst wird. Die erste Anwendung in einem doppelt aufgeladenen Ottomotor mit verstellbarer Einlassnockenwelle und großer Spreizung des Luftbedarfs setzt eine präzise Modellierung und Abstimmung des Füllungsmodells voraus.

4.1 Regelung der Lastanforderung

Das Fahrerwunschmoment wird in der Momentenstruktur der Motorsteuerung MED 9.5.10 über die relative Luftmasse in einen Sollsaugrohrdruck umgerechnet. Während im Saugbetrieb dieser Sollwert allein durch Drosselklappe und Nockenwellenversteller eingeregelt wird, ist es im Aufladebetrieb zusätzlich ein Zusammenspiel von Magnetkupplung, Kompressor, Kompressorregelklappe und Abgasturbolader-Wastegate.

Da die Abgasturboaufladung gegenüber der mechanischen Aufladung die energetisch günstigere ist, wird bei Ladedruckanforderung generell geprüft, ob der Abgasturbolader alleine den geforderten Ladedruck erzeugen kann. Kann die geforderte Luftmasse durch den Turbolader nicht zur Verfügung gestellt werden, wird der Kompressor modellbasiert hinzugeschaltet. In den Ladedruckmodulen des Motorsteuergeräts wird die kalte und warme Seite des Turboladers mit Hilfe von Massenströmen wirkungsgradkorrigiert berechnet, Leckageströme zum Beispiel über das Wastegate werden berücksichtigt. Mit Hilfe des Kompressorwirkungsgrads unter Berücksichtigung der Stellung der Kompressorregelklappe wird der Aufladeanteil durch den Kompressor ermittelt. Durch die genaue Kenntnis der Aufladegrade der beiden Aggregate werden die Parameter der beteiligten Aktuatoren und die Basisgrößen für den Motorbetrieb festgelegt.

4.1.1 Ansteuerung der Magnetkupplung des Kompressors

Der Kompressor wird über eine Magnetkupplung, die in ein Modul mit der Wasserpumpe integriert ist, zu- beziehungsweise abgeschaltet. Um auch hier den Komfortansprüchen der Kunden gerecht zu werden, wurde sehr viel Wert darauf gelegt, die Zu- und Abschaltung momentenneutral und ruckfrei durchzuführen. Dabei muss neben dem Kompressorverlustmoment auch der sich durch Verschleiß ändernde Luftspalt der Kupplung berücksichtigt werden. Diese hohen Anforderungen bedingen eine zeitlich exakt abgestimmte Ansteuerung der Magnetspule innerhalb der Kupplung, die durch Pulsweitenmodulation dargestellt wird. Unterschiede im Luftspalt der Magnetkupplung werden durch eine zusätzliche Strommessung erkannt, durch die der genaue Zeitpunkt des Kraftschlusses bestimmt wird. Mit Hilfe von Adaptionsroutinen werden diese Daten als Korrekturgrößen für nachfolgende Ein- und Ausschaltvorgänge berücksichtigt, die letztendlich noch durch klassische Fahrverhaltenseingriffe wie Lastschlagdämpfung und Antiruckelfunktionen überlagert werden. Da sichergestellt werden

muss, dass der Kompressor nicht über seine zulässige Drehzahl von 18.000/min betrieben wird, sind Abschalt- und Diagnosestrategien in die entsprechenden Softwaremodule für die Ansteuerung der Magnetkupplung integriert.

4.1.2 Regelung der Kompressorleistung durch die Kompressor-Regelklappe

Die Regelung der Kompressorleistung und des Ladedrucks nach Kompressor erfolgt über die Kompressorregelklappe. Die angesaugte Luft wird hinter dem Luftfilter im Kompressorbetrieb durch Schließen der Regelklappe zum Kompressor umgeleitet.

Der spontane Druckaufbau auch im unteren Drehzahlbereich gehörte zu den vorrangigen Entwicklungszielen des TSI Motors, **Bild 12**. Der Druckanstieg wird direkt von der Schließgeschwindigkeit der Regelklappe beeinflusst, die bei Anforderung der maximalen Kompressorleistung in 0,2 s geschlossen werden kann. Dabei müssen der Schließvorgang der Regelklappe und das Zuschalten des Kompressors zeitlich exakt aufeinander abgestimmt sein, damit es zu keinem Zeitpunkt zu einem Ladedruckeinbruch und damit zu einem für den Fahrer spürbaren Momentenverlust kommen kann.

4.1.3 Abgasturbolader-Regelung

Die Regelung des Abgasturboladers erfolgt über die Veränderung des dem Turbolader zugeführten Abgasmassenstromes, wobei die Turbinenleistung dem Betriebspunkt entsprechend angepasst wird. Die notwendige Turbinenleistung hängt dabei direkt von der Verdichterleistung ab, die steuergerätere intern in einem Rechenmodell über das erforderliche Verdichterdruckverhältnis und Wirkungsgradkennfeld ermittelt wird.

Wenn der Turbolader bei maximaler Leistung betrieben werden soll, schließt das Wastegate durch die Feder in der Druckdose und der gesamte, vom Motor zur Verfügung gestellte Abgasmassenstrom durchströmt die Turbine. Bei reduzierter erforderlicher Turbinenleistung wird ebenfalls über ein Rechenmodell der heißen Turbinenseite mit Hilfe des Wirkungsgrades der erforderliche Abgasmassenstrom über die Turbine, die Sollposition der Wastegateklappe und das Ansteuersignal für das Wastegatetaktventil ermittelt. Über das Taktventil wird dabei der entsprechende Druck in der Wastegatedose eingestellt, der zur gewünschten Wastegateposition führt. Zur Ansteuerung des elektrischen Schubumluftventils ist die Auswertung des Drucks vor und nach Abgasturbola-

der erforderlich. Anders als bei einfach aufgeladenen Turbomotoren, bei denen auf der Verdichtersaugseite nahezu Umgebungsdruck anliegt, wird beim TSI-Motor die Pumpgrenze des Abgasturboladers während des Kompressorbetriebs später erreicht. Diese neuen Anforderungen wurden durch Änderungen in den bisher vorhandenen Seriensoftwarefunktionen berücksichtigt.

4.2 Abgasmaßnahmen und Abgaseinstufung

Durch den Einsatz des Stahlgusskrümmers und einer speziell für diesen Einsatzzweck entwickelten Katalysatorbeschichtung kann der TSi-Motor mit einer Abgastemperatur von 1050 °C vor Abgasturbolader dauerhaft betrieben werden. Im Golf kann so mit der gewählten Übersetzung im sechsten Gang eine Geschwindigkeit von 200 km/h mit $\lambda=1$ gefahren werden. Durch das robuste Brennverfahren kann der Motor auch bei hohen Lasten stöchiometrisch betrieben werden, so dass beim TSi-Motor eine einfache Zweipunkt-Sprungsonde als Vorkatalysatorsonde eingesetzt werden kann.

Wie schon bei den Saug-FSI-Motoren von Volkswagen wird auch beim 1,4l-TSi-Motor der Start als Hochdruckstart durchgeführt

AutoTechnology e-magazine – right here, right now!

Direct to your PC – fast, interactive, free. Get it now at www.auto-technology.com



AutoTechnology is now available as an e-magazine, delivered directly to you, whenever you want (24/7), wherever you are – and it's free*.

- Real time delivery
- Simple keyword search
- Archived back issues
- User friendly format
- No subscription fees*

www.auto-technology.com

* Conditions apply. See website for full details.



[4, 5]. Dabei erfolgt die erste Kraftstoffeinspritzung erst, wenn im Kratstoffsystem ein Druck von zirka 25 bar vorliegt. Dadurch werden bereits bei kaltem Motor durch geringeren Kraftstoffbedarf infolge einer verbesserten Gemischaufbereitung reduzierte Rohemissionen erreicht. Die bei Direkteinspritzung mögliche Doppeleinspritzung führt zu einer schnellen Erwärmung des Katalysators. Eine Luftspaltisolierung des Verbindungsrohrs zwischen Abgasturbolader und Katalysator kompensiert zum Teil die Temperaturverluste durch den Turbolader.

Durch die Summe der Emissionsmaßnahmen wurde ein sicheres und zudem kostengünstiges Erfüllen der Euro-4-Abgasgrenzwerte erreicht.

5 Zusammenfassung

Volkswagen setzt mit dem neuen 1,4l-125-kW-TSI die Entwicklung der Direkteinspritzung bei Ottomotoren durch die Kombination mit der erstmals in Großserie realisierten Doppelaufladung konsequent fort. Die her-

vorragenden Eigenschaften dieses Motors werden durch die Kombination von Downsizing, Direkteinspritzung und Aufladung erreicht. Der Motor hat seinen Ersteinsatz im Golf GT. Ganz besonders im Focus standen dabei die Kriterien günstiger Verbrauch, Fahrspaß und Fahrkomfort. Mit 7,2 l/100 km im NEFZ-Zyklus erreicht der Golf GT einen Wert, der in der Leistungsklasse von 125 kW einzigartig ist. Die beeindruckende Drehmomentcharakteristik mit einem maximalen Moment von 240 Nm im Drehzahlbereich von 1750 bis 4500/min sorgt für eine hervorragende Fahrdynamik. Erreicht wird dieser füllige Drehmomentverlauf durch die intelligente Kombination eines Kompressors mit einem Abgasturbolader. Das Zusammenspiel dieser Komponenten konnte durch umfassende Funktionsentwicklungen von VW-eigenen Regel- und Adaptionstrategien zuverlässig gelöst werden. Hohe Dynamik und sehr gute Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitiger Erfüllung strengster Abgasgrenzwerte geben diesem neuen Volkswagen-Aggregat beste Chancen für die Zukunft.

Literaturhinweise

- [1] Hiereth, H.; Prenninger, P., 2003: Aufladung der Verbrennungskraftmaschine, Springer Verlag, S. 125 ff
- [2] Lang, O.; Habermann, K.; Wolf, K.; und Pischinger, S.: Anwendung der Zusatzaufladung bei abgasturboaufgeladenen Ottomotoren, 9. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2004
- [3] Krebs, R.; Spiegel, L.; Stiebels, B.: Ottomotoren mit Direkteinspritzung von Volkswagen, 8. Aachener Kolloquium, 1999
- [4] Szengel, R.; Middendorf, H.; Wiedmann, M.; Wietholt, B.; Laumann, A.; Voeltz, S.; Stiebels, B.; Damminger, L.: Die Ottomotoren des neuen Volkswagen Golf. In: Der neue VW Golf. Sonderausgabe ATZ/MTZ, Oktober 2003
- [5] Szengel, R.; Kirsch, U.; Ebel, B.; Lieske, S.; Reschke, F.: Die neue V6-Motorengeneration mit Direkteinspritztechnik von Volkswagen. 26. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien

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



MTZ Vieweg Verlag Postfach 1546 D-65173 Wiesbaden
Tel. +49 5241 80-1968 | E-mail: vieweg@abo-service.info

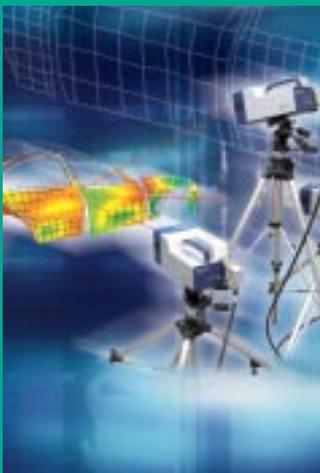
QUERSCHAU

**AUTOMOTIVE
ENGINEERING
PARTNERS**

9 - 10 / 2005
September/Oktober

TITELTHEMA

3D-Vibrometrie – Schneller zum NVH-optimierten Fahrzeug



Hochauflösende Schwingungsmessungen für die experimentelle Modalanalyse an Fahrzeugkomponenten erfordern ein dichtes Messgitter mit einer entsprechend hohen Anzahl von Messpunkten. Bei der Daimler Chrysler AG in Sindelfingen wurden deshalb die hier beschriebenen Untersuchungen an einer Karosserie mit einem 3D-Laser-Vibrometer von Polytec durchgeführt.

E-Mail: vieweg@abo-service.info | Tel. +49 5241 80-1968

WEITERE THEMEN

UNTERNEHMEN

TNO: Integriertes Konzept zur Fahrzeugsicherheit

PROTOTYPING & VERSUCH

**Lastmomentorientierte Fahrstrategie
im Doppelkupplungsgetriebe**

**Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von
Fahrwerkssteilen durch elektrodynamische Shaker**

SIMULATION & BERECHNUNG

**Simulationsrechnungen zur Ermittlung optimaler
Einspritzparameter an DI-Ottomotoren**

MESS- & PRÜFTECHNIK

Jury-Tests für Geräuschqualität und Psychoakustik

Ultraschnelle Messtechnik an Motorenprüfständen

ELEKTRONIK

CMMI in der Hardwareentwicklung