

Neuer Ottomotor mit Direkteinspritzung und Doppel- aufladung von Volkswagen

Teil 1: Konstruktive Gestaltung

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.



1 Einleitung

Der neue TSI-Motor, **Titelbild** und **Bild 1**, erreicht mit einem Drehmoment von 240 Nm einen Mitteldruck von 21,7 bar. Die Doppelaufladung kombiniert einen zuschaltbaren Kompressor mit einem Abgasturbolader. Das volle Drehmoment wird so bereits bei niedrigsten Drehzahlen ermöglicht und breitbandig zur Verfügung gestellt.

Durch die Benzin-Direkteinspritzung konnte eine Verdichtung von 10:1 bei Ladedrücken mit absolut 2,5 bar realisiert werden. Der Wirkungsgrad des neuen 125-kW-Motors im Golf GT ist ein neuer Maßstab in der Ottomotoren-Technik.

2 Konzept und Entwicklungsziel

Für Volkswagen gibt es zwei Gründe, hochaufgeladene Downsizing-Motoren zu entwickeln:

- den Kundenwunsch nach sparsamen FSI-Motoren kombiniert mit hoher Fahrfreude zu erfüllen
- einen weiteren Technologiebaustein zur Reduzierung der CO₂-Emissionen der Volkswagen-Flotte zur Verfügung zu stellen.

Der Basismotor dieser Entwicklung ist der FSI-Motor aus dem Golf V in den Leistungsvarianten 1,4 l mit 66 kW sowie 1,6 l mit 85 kW, **Tabelle**.

Folgende Kernpunkte definierten die Aufgaben und Herausforderungen zu Beginn der Entwicklung:

- geringer Kraftstoffverbrauch
- fülliger Drehmomentverlauf
- hoher Qualitätsstandard
- Dauerhaltbarkeit ohne Einschränkungen
- geringe Produktkosten
- produktionsgerechte Konstruktion
- kompakte Bauweise.

Der TSI-Motor mit 1,4 l/125 kW überzeugt durch ein Drehmoment von über 200 Nm bei 1250/min bis 6000/min, **Bild 2**.

Der füllige Verlauf wird durch den Einsatz von zwei Aufladeaggregaten erreicht, einem schnell laufenden mechanischen Kompressor und einem Abgasturbolader. Die von Volkswagen entwickelte Ladedruckregelung entscheidet dabei nach Fahrerwunschmoment, ob der vom Abgasturbolader zur Verfügung gestellte Ladedruck ausreicht oder der Kompressor zugeschaltet werden muss, **Bild 3**.

Ab einer Mindestdrehmoment-Anforderung läuft der mechanische Lader permanent bis zu Drehzahlen von maximal 2400/min. Der Abgasturbolader ist bewusst auf einen guten Wirkungsgrad ausgelegt und stellt deshalb im niedrigen Drehzahlbereich keinen ausreichenden Ladedruck zur Verfügung. Spätestens bei einer Drehzahl von 3500/min wird der Kompressor abge-

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. Michael Fleiß ist Projektleiter des TSI-Motors bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dipl.-Ing. Alfons Lauermann ist Unterabteilungsleiter der Konstruktion Gemischbildung EA111-Ottomotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Dipl.-Ing. Stefan Voeltz ist Unterabteilungsleiter der Konstruktion Triebwerk EA111-Ottomotoren bei der Volkswagen AG, Wolfsburg.



Bild 1: Der neue TSI 1,4 l mit 125 kW, Rückansicht

Figure 1: The new 1.4-litre TSI with 125 kW (rear view)

Tabelle: Technische Daten

Table: Technical data

Zylinderzahl	4
Zylinderabstand	82 mm
Hubraum	1390 cm ³
Hub	75,6 mm
Bohrung	76,5 mm
Verdichtung	10 : 1
Leistung	125 kW bei 6600/min
Drehmoment	240 Nm 1750/min – 4500/min
max. Mitteldruck	21,7 bar
max. Ladedruck	2,5 bar (absolut)
Verbrauch im Golf GT	7,2 l/100 km (MVEG-Zyklus)

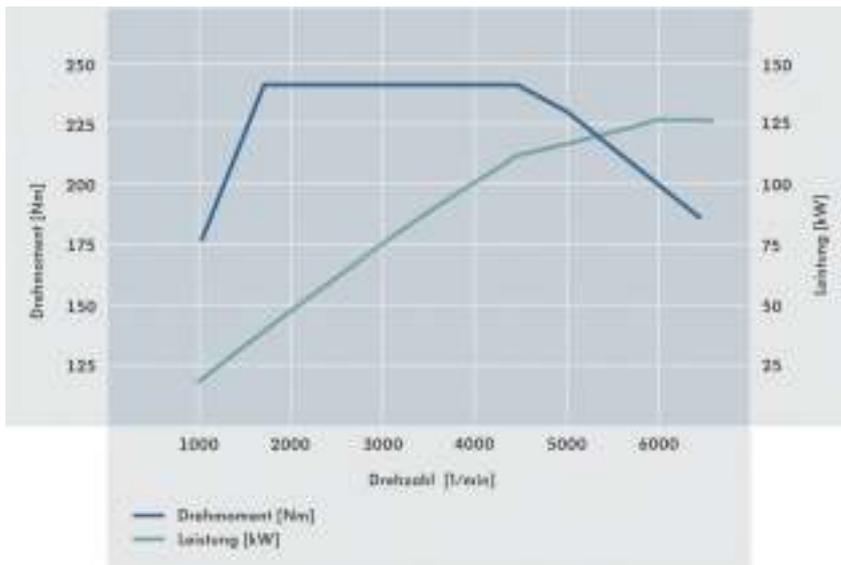


Bild 2: Drehmomentkurve

Figure 2: Torque curve

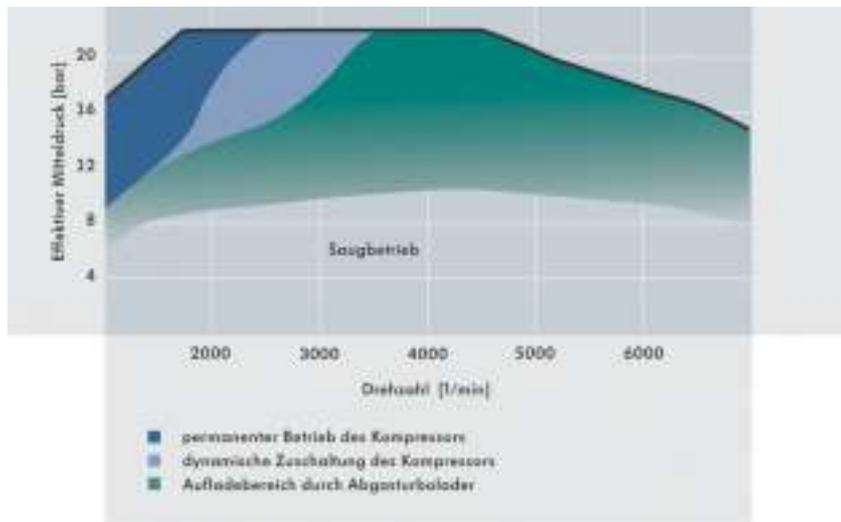


Bild 3: Betriebsbereich des Kompressors (schematisch)

Figure 3: Compressor operating range (schematic diagram)

schaltet. Der Abgasturbolader ist ab hier in jedem Fall, also auch dynamisch beim Übergang vom Schub- in den Vollastbetrieb, in der Lage, den gewünschten Ladedruck alleine bereit zustellen. Der Kompressor sorgt bis zu dieser Drehzahl dafür, dass das „Turboloch“ ausgeglichen und überbrückt wird und garantiert so in jeder Situation eine spontane Entfaltung des Drehmoments.

Der Kompressor wird über eine Magnetkupplung geschaltet, die in den Wasserpumpenantrieb integriert ist. Die Regelklappe sorgt dafür, dass die für den Betriebspunkt notwendige Luftmasse zum Abgasturbolader gelangt. Im reinen Abgasturboladerbetrieb ist die Regelklappe geöffnet. Die Luft nimmt dann den von herkömmlichen Turbomotoren bekannten Weg über den Front-

ladeluftkühler und die Drosselklappe in das Saugrohr, Bild 4.

Der bei einem 125-kW-Antrieb außerordentlich geringe Kraftstoffverbrauch von 7,2 l/100 km (MVEG-Zyklus) wird im Golf GT durch folgende Maßnahmen erzielt:

- konsequentes Downsizing (Verschiebung der Betriebspunkte in den Bereich von höheren Mitteldrücken und damit in Bereiche mit geringeren spezifischen Verbräuchen)
- hohe Verdichtung durch Ausnutzung der FSI-Direkteinspritzung
- keine Anfettung aufgrund von Bauteilschutz für ATL und Abgaskrümmen (Abgastemperaturen bis 1050 °C zulässig)

Als Folge dieser Technologie setzt der TSI-Motor im Vergleich zu Wettbewerbern mit

konventionellen, leistungsgleichen Motoren einen neuen Verbrauchsmaßstab bei Ottomotoren. Seine Premiere hat der neue TSI-Motor im Golf GT Ende 2005. Bereits für das erste Quartal 2006 ist eine für ROZ-95-Kraftstoff ausgelegte Variante mit 103 kW im Touran geplant. Weitere Derivate im A-Segment folgten Mitte 2006, dann auch mit Direkt-schaltgetriebe.

3 Konstruktive Gestaltung

3.1 Triebwerksbauteile

Bei der Konstruktion der Bauteile konnten die Konstrukteure von Volkswagen auf den bewährten 1,4-l-Motor zurückgreifen. Die Motoren dieser Baureihe sind als Baukastensystem weitgehend modular aufgebaut. Die Schwerpunkte für den TSI-Motor lagen auf der Konstruktion des neuen Zylinderkurbelgehäuses und der Wasserpumpe mit integrierter Magnetkupplung.

3.1.1 Zylinderkurbelgehäuse in Grauguss

Das neue Zylinderkurbelgehäuse ist wie bei den FSI-Motoren mit 1,4 l / 66 kW und 1,6 l / 85 kW als Open-Deck-Konstruktion ausgeführt, Bild 5.

Für das Deep-Skirt-Zylinderkurbelgehäuse wird GJL verwendet. Die Entscheidung für diesen Werkstoff garantiert auch bei dem hohen Mitteldruck von 21,7 bar jederzeit volle Betriebssicherheit. Zur Optimierung der Herstellungskosten wird das Dünnwand-Zylinderkurbelgehäuse in liegender Gießposition abgegossen. Die mittlere Wandstärke beträgt 3 mm +/- 0,5 mm. In Teilbereichen wurde die Wandstärke beanspruchungsgerecht erhöht.

Das GG-Zylinderkurbelgehäuse verfügt in dieser Leistungsklasse über ein außergewöhnlich niedriges Gewicht von 29 kg (ohne Lagerdeckel). Die Gründe für dieses Gewicht sind:

- der frühzeitige Einsatz von FEM-Berechnungen
- die Ausbildung des Kurbelraums mit bombierten Wänden und die daraus folgende hohe Steifigkeit
- die beanspruchungsgerechte Darstellung einer minimalen Quer- und Längsverripung.

Mit der Open-Deck-Konstruktion werden Entlüftungs- und Kühlungsprobleme als Folge von Luftsäcken mit der hier verwendeten Zweikreiskühlung mit getrennten Kreisläufen für Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse sicher ausgeschlossen.

Über CFD-Berechnungen wurde der Kühlkreislauf innerhalb des Zylinderkurbelgehäuses sowie des gesamten Motors überprüft und optimiert.

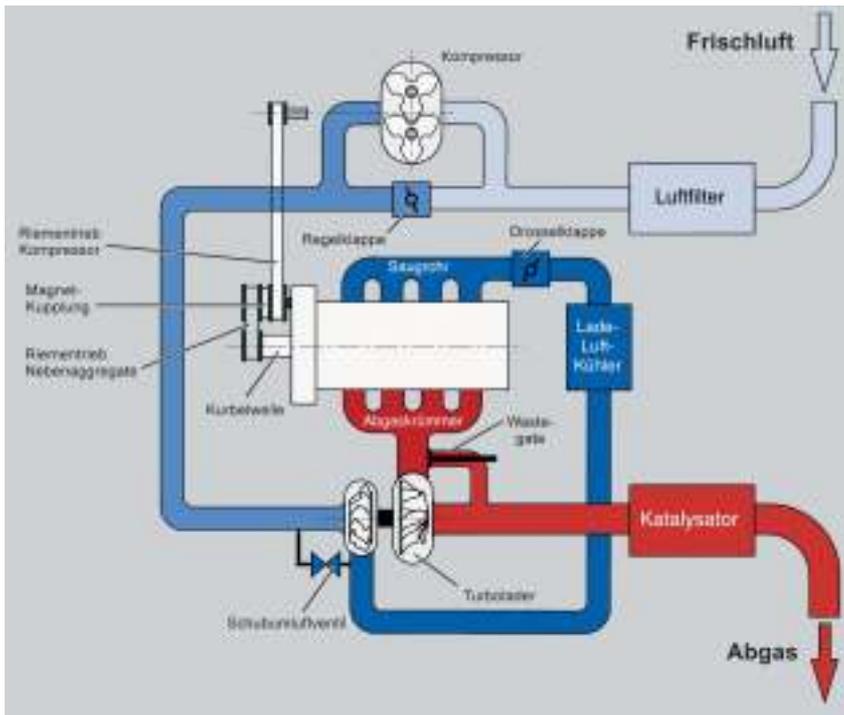


Bild 4: Luftweg
Figure 4: Air circuit



Bild 5: Zylinderkurbelgehäuse
Figure 5: Crankcase

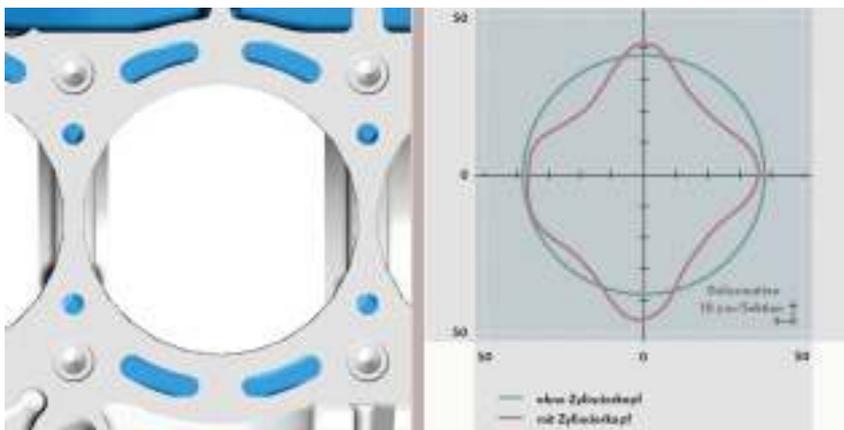


Bild 6: Zylinderrohrverformung einer Closed-Deck-Konstruktion
Figure 6: Cylinder deformation for a closed-deck design

Bei der Verschraubung des Zylinderkopfes an das Zylinderkurbelgehäuse werden über die Zylinderkopfschrauben Kräfte eingeleitet. Die durch diesen Vorgang erzeugten Verformungen der Zylinderrohre weichen von der idealen Kreisform ab. Die Folge ist ein erhöhter Ölverbrauch, da Kolbenringe nur ein begrenztes Formfüllvermögen haben.

Die Zylinderrohrverformung für eine Closed-Deck-Konstruktion (Kleeblatt-Form) ist in **Bild 6** dargestellt. **Bild 7** zeigt die Zylinderrohrverformung für eine Open-Deck-Konstruktion. Die Abweichung von der Kreisform sowie der absolute Betrag der Verformung sind bei der Open-Deck-Konstruktion deutlich geringer.

3.1.2 Kurbelwelle aus Stahl

Zur Verbesserung der Gesamtakustik des TSI-Motors kommt eine Stahl-Kurbelwelle zum Einsatz, die im Vergleich zur Guss-Kurbelwelle aus dem FSI-Motor mit 1,4 l/66 kW steifer ausgeführt ist.

Die Stahl-Kurbelwelle verbessert insgesamt die Klangqualität des Motors. Der Grund ist die versteifende Wirkung durch den höheren E-Modul. Die Vergrößerung der Steifigkeit durch den Werkstoff Stahl beträgt 23 %. Dieser Wert konnte durch vergleichende Berechnungen ermittelt und mit Messungen untermauert werden.

Die objektiven Messungen werden darüber hinaus durch eine subjektiv wahrgenommene Klangverbesserung bestätigt.

Die FFT-Analyse des Schalldrucks bei einer Drehzahl von 4000/min ist exemplarisch in **Bild 8** dargestellt. Das Diagramm zeigt die Messergebnisse einer Guss-Kurbelwelle im Vergleich zur Stahl-Kurbelwelle. Die Nebenharmischen sind bei der Stahlkurbelwelle deutlich reduziert.

3.1.3 Leichtbaukolben

Durch konsequenten Einsatz von modernen Berechnungs- und Entwicklungsmethoden ist es gelungen, einen gegossenen Kolben bei einer Leistung von 90 kW/l ($2,72 \text{ kW/cm}^3$ Kolbenfläche) in einem aufgeladenen Motor einzusetzen. Durch diese Maßnahme konnte ein wesentlicher Kostenvorteil genutzt werden. Dies ist ein neuer Maßstab in der Kolbenentwicklung. Die Brennraummulde ist bearbeitet und hat eine deutliche Kante zur Strömungsführung, **Bild 9**.

Der Kolben wird als Leichtbaukolben mit einem hintergegossenen Ringfeld zur Materialverdrängung ausgeführt. Das Gewicht beträgt nur 238 g.

Das Kolbensystem wurde auch in Hinblick auf Verbrauch optimiert. Zu diesem Zweck sind folgende Maßnahmen zur Verbesserung der Reibungswerte eingeflossen:

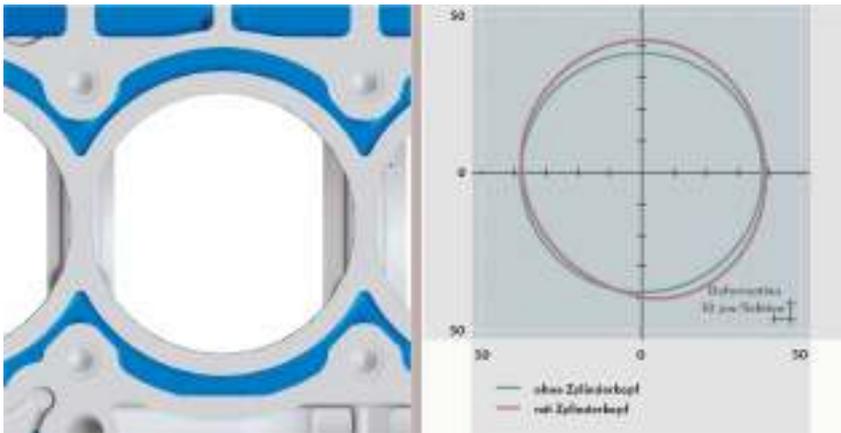


Bild 7: Zylinderrohrverformung einer Open-Deck-Konstruktion

Figure 7: Cylinder deformation for an open-deck design

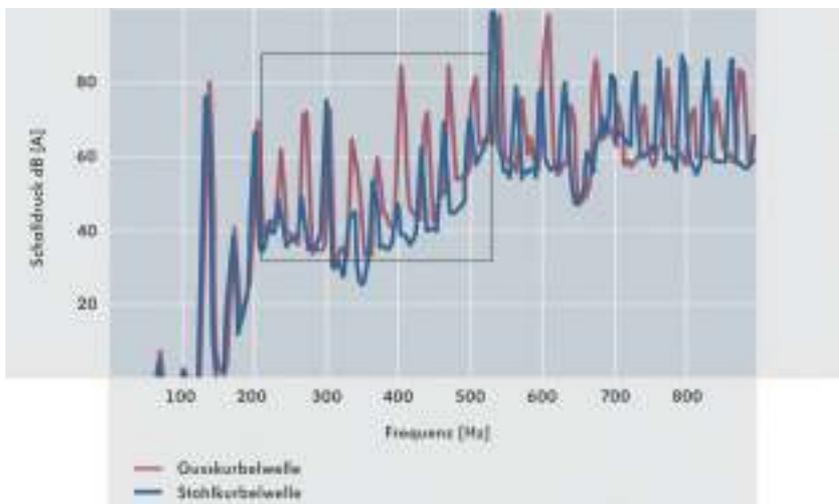


Bild 8: Akustische Funktionsanalyse

Figure 8: Acoustic function analysis



Bild 9: Kolben – Brennraummulde

Figure 9: Piston bowl

- Gleitlackbeschichtung
- Kolben-Laufspiel von 55 μm
- Kolbenringe mit Höhen von 1,2, 1,5 und 2,0 mm sowie niedrigen Tangentialkräften
- Feuersteghöhe von 5,8 mm.

Durch die Feuersteghöhe von 5,8 mm werden die Ziele in Bezug auf die Minimierung der HC-Emissionen bei einer möglichst niedrigen Temperatur in der 1. Nut erreicht. Die Nut wird als Maßnahme gegen „Micro-Welding“ hartanodisiert, der 1. Ring wird nitriert.

Für die Anpassung auf 120 bar Zünddrucks wurde der Kolbenbolzendurchmesser auf 19 mm vergrößert. Bei anderen Motoren dieser Baureihe mit FSI-Technik ist im Vergleich ein Durchmesser von 17 mm ausreichend (Zünddruck = 85 bar).

Die Kolbenbolzenbohrung wird zur Optimierung des Tragverhaltens bei Durchbiegung als Formbohrung ausgeführt. Die Schmiermittelversorgung des Kolbenbolzens wird durch eine Längsbohrung im Schaft der Pleuellstange vom Pleuellager her sichergestellt.

Um unter allen Betriebsbedingungen für die Kolben hinreichend niedrige Temperaturen sicherzustellen, kommt eine Kolbenkühlung zum Einsatz. Mit einem Öffnungsdruck von 2,0 bar spritzen in der Hauptöl-galerie eingeschraubte Düsen gezielt Öl auf die heiße Auslassseite der Kolben. Durch diese Maßnahme werden zusätzlich auch die Kolbennaben gekühlt.

3.1.4 Steuer- und Ölpumpentrieb

Der Zahnkettentrieb des TSI-Motors zum Antrieb der Nockenwellen ist aufgrund der höheren Belastung optimiert worden. Die Zahnkette hat gehärtete Bolzen und höher belastbare Laschen, die an die Kettenkräfte angepasst wurden.

Aufgrund der zusätzlichen Ölschmierstellen, wie zum Beispiel Kolbenkühl-düsen und Turbolader, hat der TSI-Motor im Vergleich zu den FSI-Motoren mit 1,4 l/66 kW sowie 1,6 l/85 kW einen höheren Öldurchsatz. Die Ölpumpe wurde von den FSI-Motoren übernommen, die Anpassung an das erforderliche höhere Fördervolumen erfolgt über das Übersetzungsverhältnis.

Der Ölpumpentrieb wird zur akustischen Optimierung mit einer Zahnkette mit 8 mm Teilung ausgeführt, der zugehörige Ketten-spanner von einer Schenkelfeder gespannt.

3.1.5 Antrieb Hochdruckpumpe

Die auch bei den FSI-Motoren mit 1,4 l/66 kW und 1,6 l/85 kW verwendete Hochdruckpumpe wurde durch die Kontur des Nockens zur Betätigung der Hochdruck-

Wer mit wenig Energieeinsatz viel leisten will, braucht Atemtechnik mit System ...



Damit der neue FSI nicht nur sparsam schluckt und atmet, sondern auch sparsam zu montieren ist, liefern wir das Ansaugsystem als Komplettanlage.

Die Aufgabenstellung "FSI-Motor" hat System. Also kam Volkswagen schon frühzeitig auf Handtmann zu als Entwicklungspartner für die Ansauganlage. Wir gelten als Integrationsfachleute für komplexe Aufgaben rund um Guss, Bearbeitung und Montage. Und was war da nicht alles zu integrieren: Aluminiumansaugrohr, Tumbleklappen und deren Unterdruckbetätigung, ein Potentiometer für die Lagerückmeldung der Klappen und vieles



mehr. Gemeinsam mit Volkswagen entwickelten wir das System, und übernahmen Entwicklung, Prototyping, Giessen, Bearbeitung, Montage und Prüfung. Jetzt kommt die Ansauganlage des FSI einbaufertig als Komplettsystem von Handtmann. Und an den FSI-Motor kommt eine Ansaugtechnik, die bei reduziertem Verbrauch verblüffend hohe Leistung möglich macht. Da dürfte so manchem Wettbewerb der Atem stocken.

handtmann
Ideen mit Zukunft.

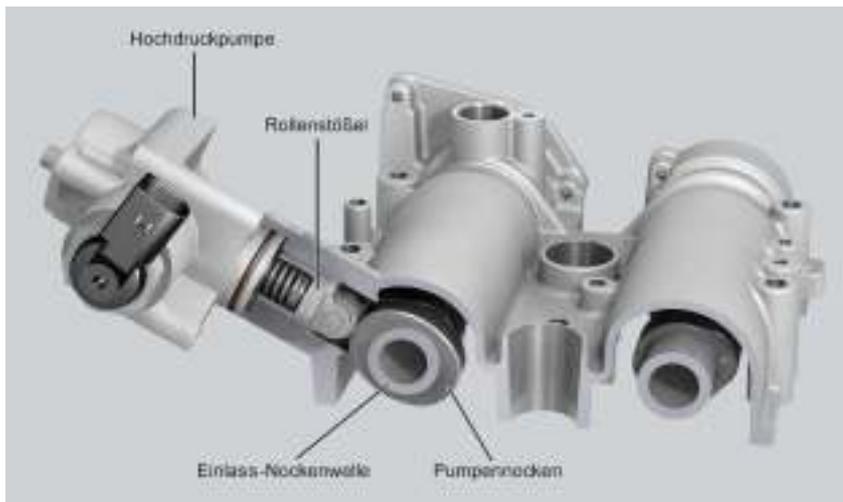


Bild 10: Antrieb Hochdruckpumpe
Figure 10: High-pressure pump drive

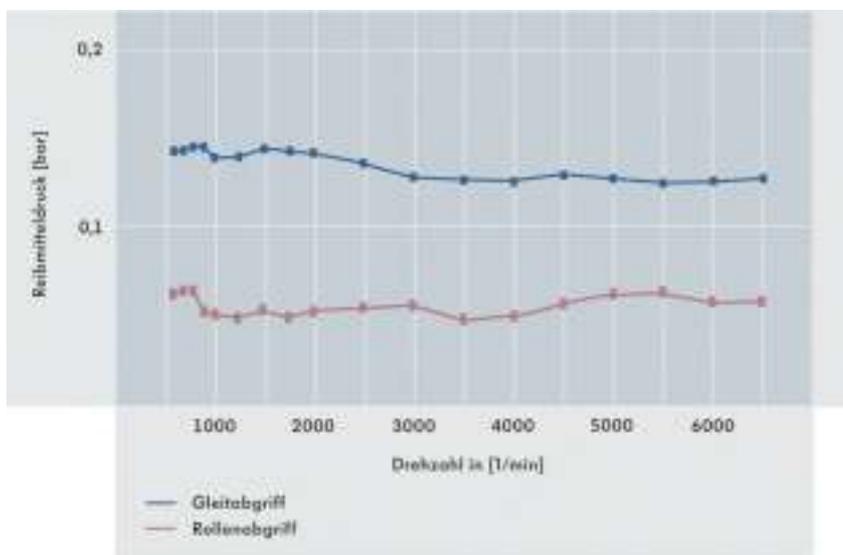


Bild 11: Gleitabgriff und Rollenabgriff
Figure 11: Sliding cam follower and roller cam follower

pumpe an die erforderliche größere Kraftstoffmenge angepasst.

Der maximale Nockenhub beträgt beim TSI-Motor 5,7 mm statt 5 mm. Diese Erhöhung der Fördermenge sowie die Anhebung des Drucks im Kraftstoff-Hochdruckrail von 120 auf 150 bar führen zu einem erheblichen Anstieg der Belastung des Kontakts Pumpenstößel – Pumpennocken. Der Einsatz eines Rollenstößels gestaltet diese Laufpaarung dauerfest, **Bild 10**.

Zusätzlich erforderte die Erhöhung des Druckes eine Umstellung des Hochdruckpumpengehäuses von Aluminium-Druckguss auf ein Aluminium-Schmiedegehäuse. Die mechanische Belastbarkeit der Pumpe wird dadurch etwa verdoppelt.

Durch die Verwendung des Rollenstößels ist es darüber hinaus gelungen, das Antriebsmoment der Hochdruckpumpe zu halbieren, **Bild 11**.

3.1.6 Robuste und kostengünstige Kurbelgehäuseentlüftung

Die Kurbelgehäuseentlüftung wurde entscheidend von der Entwicklung der Ölabscheidung beeinflusst. Der Ölrücklauf erfolgt kontinuierlich über einen Siphon. Die Optimierung des Abscheiders führt zu exzellenten Ergebnissen in der Ölreißfestigkeit (bis 140 l/min) und Ölabscheidung (< 1,0 g/h). Die Ölabscheidung erzielt dabei mit geringen Druckverlusten ein optimales Ergebnis. Die erreichten Abscheidegrade sind vergleichbar zu Systemen mit zusätzlichen Feinölabscheidern. Das Risiko der Belagbildung an nachgeschalteten Bauteilen ist somit gering, **Bild 12**.

Das System hat jeweils eine Einleitstelle vor dem mechanischen Lader und eine in

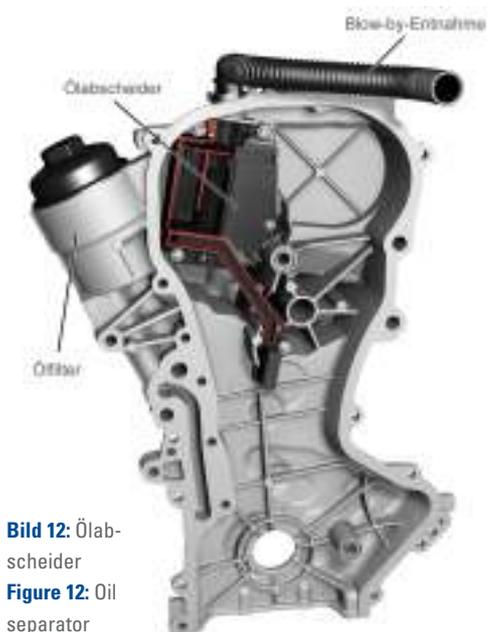


Bild 12: Ölabscheider
Figure 12: Oil separator

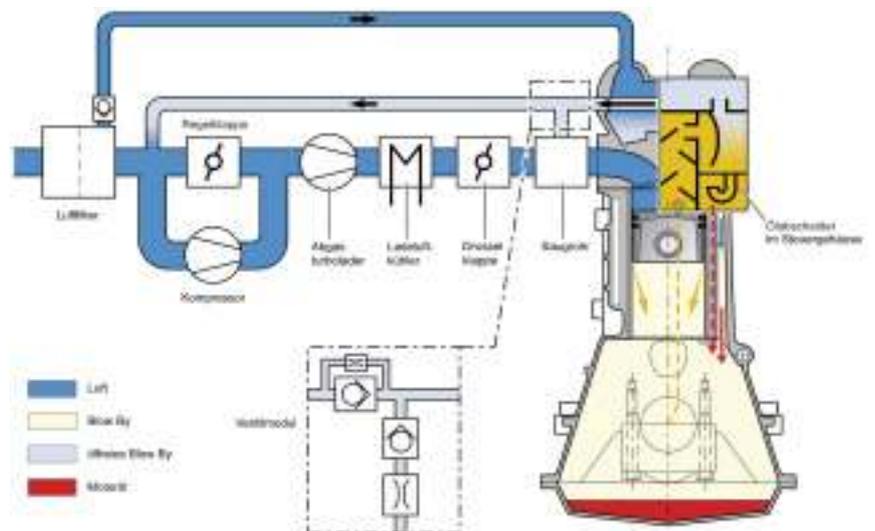


Bild 13: Kurbelgehäuseentlüftung
Figure 13: Crankcase ventilation

das Saugrohr, **Bild 13**. Eine Drossel in der Leitung zum Saugrohr begrenzt den Durchsatz bei hohen Saugrohrunterdrücken. Auf ein aufwändiges Druckregelventil konnte deshalb verzichtet werden.

Die Schaltfunktionen wurden in einer

Ventilkombination zusammengefasst, die die Entlüftungsleitungen je nach Ladezustand absperrt. Das Rückschlagventil zur Einleitung vor Lader ist dabei zur Absicherung des Unterdrucks im Kurbelgehäuse als Flatterventil mit genau definierter Leckage-

menge ausgeführt. Die Strömungsführung und die großen Querschnitte sorgen für geringe Differenzdrücke in den Entlüftungskomponenten.

Die Einleitung von Frischluft in den Motor ist ein weiteres Merkmal des Systems. Durch diese Maßnahme werden in weiten Kennfeldbereichen eine Durchspülung und ein damit verbundener Kondensataustrag erreicht.

3.1.7 Kühlwasserregler mit zweistufigem Thermostatteller

Der motorinterne Kühlkreislauf hat eine Zweikreiskühlung, die sich in den FSI-Motoren dieser Baureihe bewährt hat. Zusätzlich wird die Kühlung des Abgasturboladers eingebunden. Eine Kühlmittelnachlaufpumpe sorgt für die Kühlung des Abgasturboladers nach dem Abstellen des Motors.

Die ausreichende Heizleistung im Leerlauf wird durch eine entsprechende Fördermenge der Wasserpumpe sichergestellt. Bei Nenndrehzahl und der sich damit einstellenden Fördermenge im Kühlkreislauf ergeben sich hohe Systemdrücke. Um das temperaturkorrelierende Öffnen des Thermostaten für die Regelung der Kühlmittelintrittstemperatur sicherzustellen, wird zur Verbesserung der Funktion ein zweistufiger Thermostatteller eingesetzt, **Bild 14**. Durch den kleinen Durchmesser der ersten Stufe wird ein temperaturrichtiges Öffnen sichergestellt. Beim weiteren Öffnen wird der größere Teller wegababhängig vom kleinen mitgenommen. Beim Schließen des Thermostaten wird über die wegababhängig stark gestuften Querschnitte ein funktionsrichtiges Schließen erreicht. Hohe Druckspitzen im Kühlkreislauf können so sicher aufgefangen werden.

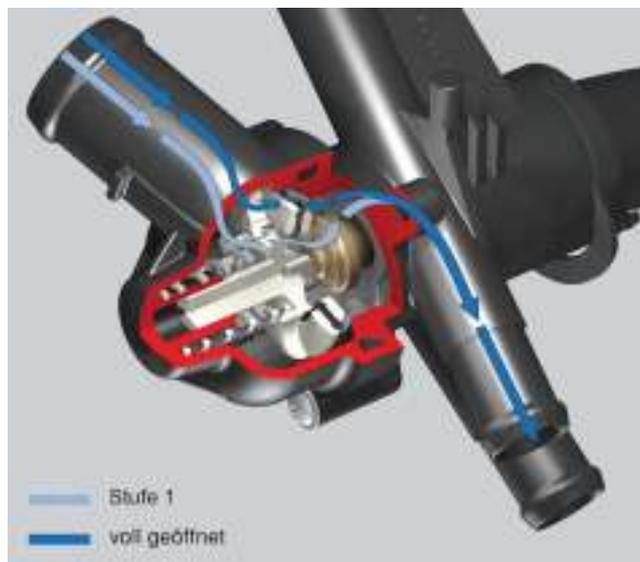


Bild 14: Zweistufiger Thermostatteller

Figure 14: Two-stage thermostat

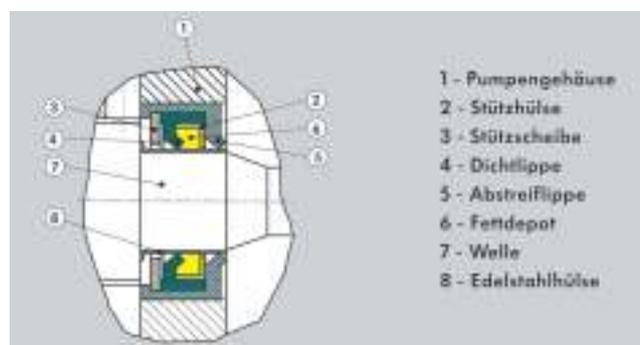


Bild 15: Wellendichtung der Wasserpumpe

Figure 15: Shaft seal of the water pump

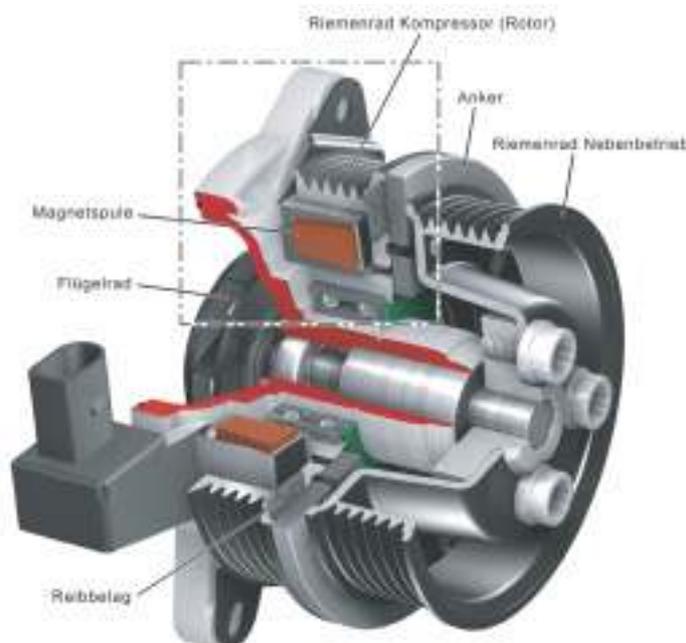


Bild 16: Magnetkupplung

Figure 16: Magnetic coupling



Bild 17: Nebetrieb
Figure 17: Auxiliary drive

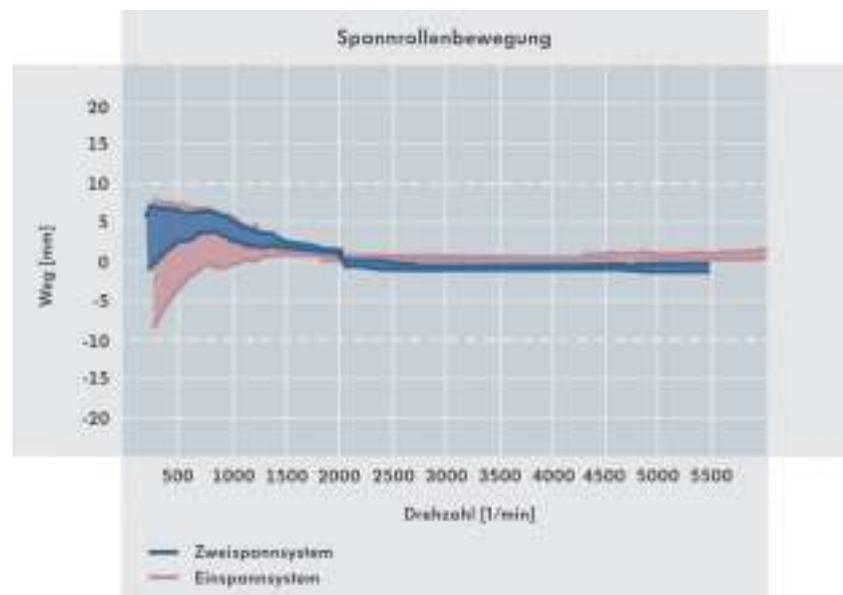


Bild 18: Spannrollenbewegung
Figure 18: Motion of the belt tensioner pulleys

3.1.8 Wasserpumpe mit Magnetkupplung

In das Wasserpumpenmodul wurde neben der Kühlmittelförderung auch die Funktion des schaltbaren Antriebs des Luftkompressors integriert.

Erstmals in dieser Baureihe wird eine VR-Dichtung (Doppellippendichtung) verwendet, **Bild 15**. Sie ersetzt die bekannte Gleit-

ringdichtung. Das Wirkprinzip der VR-Dichtung entspricht einem federlosen Radialwellendichtring. Die Dichtung erhält als gummielastischer Membrankörper seine Vorspannung über abgestimmte Stützkörper. Wesentliche Merkmale sind die dem Kühlmittel zugewandte Abstreiflippe und die nachfolgend angeordnete Dichtlippe. Zwi-

schen diesen Dichtungen ist ein Fettdepot angeordnet. Die Dichtlippen laufen auf einer gehärteten Edelhstahlhülse, die auf die Welle der Wasserpumpe aufgepresst wird.

Die Wasserpumpe wird über die Hauptspur des Nebentriebs, der Luftkompressor über eine zweite Riemenspur von der Wasserpumpe angetrieben. Die Zuschaltung des Luftkompressors erfolgt über eine elektromagnetische Trockenkupplung, die sich auf der Welle der Wasserpumpe befindet. Diese Kupplung ist als doppelt durchflutete Einscheiben-Magnet-Trockenkupplung ausgeführt. In das Abtriebsrad ist ein lebensdauerfester Reibbelag integriert, **Bild 16**.

Bei Bestromung der Magnetspule gelangt der Magnetfluss über das Abtriebsrad der Wasserpumpe auf den Anker (Reibscheibe). Die maximale Leistungsaufnahme der Magnetspule beträgt 35 W. Das zeitweise erforderliche Drehmoment von 60 Nm an der Kupplung wurde in der kompakten Bauform durch eine Doppeldurchflutung erreicht. Hierbei fließt der Magnetfluss zweimal vom Rotor in den Anker. Der Anker ist axial beweglich und verdrehfest am Antriebsriemenrad der Wasserpumpe befestigt. Nach Abstellen der Bestromung erfolgt die Rückstellung des Ankers über drei Blattfedern. Die Kupplung ist über Lebensdauer-Verschleißminimierung wartungsfrei.

3.1.9 Nebetrieb mit zwei Poly-V-Riemenspuren

Das wesentliche Merkmal des Nebentriebs sind zwei Poly-V-Riemenspuren, **Bild 17**. Sie sorgen für den notwendigen Antrieb des zuschaltbaren Luftkompressors, der auf eine 4,95-fache Kurbellendrehzahl übersetzt ist. Durch die sechsrillige Hauptspur erfolgt der Antrieb von Wasserpumpe, Generator und Klimakompressor. Der fünfrillige Keilrippenriemen der Nebenspur treibt den Luftkompressor von der Wasserpumpe aus an. In das Antriebsrad der Wasserpumpe ist die beschriebene Magnetkupplung integriert. Beide Riemenspuren sind durch den Einsatz von Permanent-Riemenspannern wartungsfrei.

Der leerlaufnahe Bereich unter Vollast stellt den kritischen Zustand für den Riementrieb dar. In diesem Betriebsbereich führt die Kombination von Zweimassenschwungrad und dem vorgeschalteten Kompressor zu sehr hohen Belastungen. Es treten Kurbellenschwingwinkel von bis zu 7° bei 850/min auf.

Mit Hilfe des Auslegungsprogramms Simdrive wurde der Riementrieb nachgebildet und anschließend Lösungsansätze bewertet. Als Ergebnis entstand ein System mit zwei Riemenspannern, dessen Funktion in der

nachfolgenden experimentellen Überprüfung bestätigt wurde, **Bild 18**.

Der erste Riemen Spanner ist im Lostrum zwischen Wasserpumpe und Kurbelwelle angeordnet und dämpft das Gesamtsystem durch ein Doppeldämpfungssystem. Der zweite Riemen Spanner ist im Zugtrum zwischen Generator und Wasserpumpe angeordnet. Er ist hochgedämpft und entkoppelt weitgehend die Massenträgheit des Kompressors.

3.1.10 Designabdeckung mit Unterdruckspeicher

Der Bereich zwischen Abgasturbolader und Luftstrecke des TSI-Motors ist mit einer Abdeckung mit integriertem Unterdruckspeicher mit 1000 cm³ Volumen versehen. Dieser Speicher dient unabhängig vom jeweiligen Lastzustand des Motors der Betätigung der Ladungsbewegungskappen.

3.2 Gemischbildungsbauteile

3.2.1 Kompressor mit interner Übersetzungsstufe

Das charakteristische Merkmal des TSI-Motors ist das Doppelaufladungssystem. Es besteht neben dem Abgasturbolader aus dem Kompressor und einem mittels Regelklappe geregelten Umluftkreis. Der Kompressor ist

ein mechanischer Lader, der auf dem Roots-Prinzip basiert. Er wird kennfeldgesteuert über die Magnetkupplung an der Wasserpumpe zugeschaltet. Die maximale Motordrehzahl liegt im Kompressorbetrieb bei

3500/min. Eine Besonderheit des verwendeten Kompressors ist eine interne Übersetzungsstufe, die dem Synchronisationszahnradpaar vorgeschaltet ist, **Bild 19**.

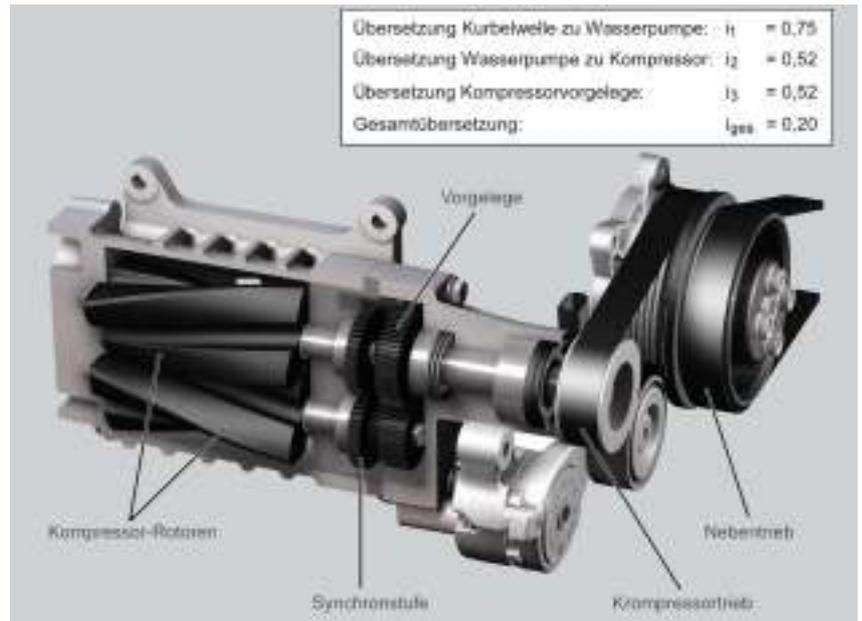


Bild 19: Kompressor mit interner Übersetzungsstufe
Figure 19: Compressor with internal reduction gear

Der **1,4l TSI-Block** für
sicher die **Extra-**
Kompressor und **Ab-**
die Basis für Fat
Downsizing durch **G**
mit Lamellengrapt

HALBERG C

Die interne Übersetzungsstufe stellt beim Anfahren sowie im unteren Motordrehzahlbereich eine Steigerung des Motordrehmoments im Vergleich zur konventionellen Bauweise bei gleichzeitig kompakter Ausführung des Kompressors sicher. Die realisierte Gesamtübersetzung über den Nebetrieb und die interne Übersetzungsstufe beträgt $i_{ges} = 0,20$ zur Kurbelwelle.

Die Ladedruckregelung erfolgt bei Kompressorbetrieb durch eine elektronische Regelklappe im Umluftkreis. Die Klappe ermöglicht eine stufenlose Variation zwischen alleiniger Kompressor- und alleiniger Turboaufladung.

Der Kompressor wird mit vier Schrauben, gemeinsam mit dem druckseitigen Geräuschkämpfer, direkt am Zylinderkurbelgehäuse befestigt. Das Kompressorgehäuse wurde so gestaltet, dass der Mindestspalt zwischen Wandung und Rotoren sichergestellt ist. Der Spalt ist dabei unabhängig von der Lage innerhalb ihrer Toleranzen der im Schraubverbund befindlichen Bauteile. Darüber hinaus sind am Kompressorgehäuse der saugseitige Dämpfer und der Riemen spanner des Poly-V-Triebs verschraubt.

3.2.2 Akustikauslegung Kompressor

Die Akustikauslegung gehörte zu den zentralen Aufgaben im Rahmen der Entwicklung des Kompressorsystems. Die Anordnung des Kompressors erfolgt am TSI-Motor in Richtung Fahrgastraum. Damit sind verbleibende Geräusche aus dem Bereich des mechanischen Laders für die Insassen unmittelbar wahrnehmbar. Die mechanische Geräuschquelle des Kompressors und die Luftpulsation sowie die Weiterleitung der verbliebenen Pulsationsgeräusche wurden minimiert.

Die Akustikoptimierung der Kompressor mechanik der Pulsationen in Saug- und Druckstrecke erfolgten durch:

- Modifikation der Verzahnungsparameter, zum Beispiel Balligkeit, Eingriffswinkel und Verdrehflankenspiel
- Versteifung der Wellen innerhalb des Kompressors
- gezielt stärkere Verrippung des Gehäuses.

Die Optimierung des Kompressors zur Reduzierung der Luftpulsationsanregung erfolgte durch:

- Verlegung und Formoptimierung der Rückströmöffnungen
- Formoptimierung der Einlass- und Auslassöffnungen.

Zur weiteren Verringerung der Pulsationsgeräusche des Kompressors werden saug- und druckseitig des Kompressors Breitbanddämpfer eingesetzt, **Bild 20**.



Bild 20: Kompressorgeräuschkämpfung
Figure 20: Compressor noise attenuation

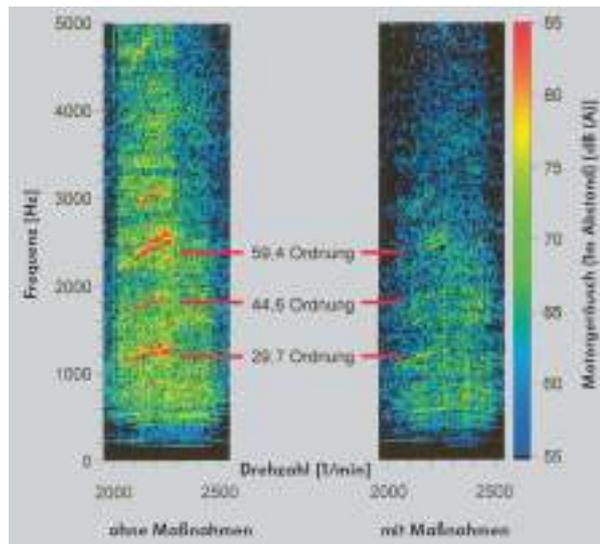


Bild 21: Schallabstrahlung Motor bei Kompressorbetrieb
Figure 21: Noise radiation from the engine during compressor operation

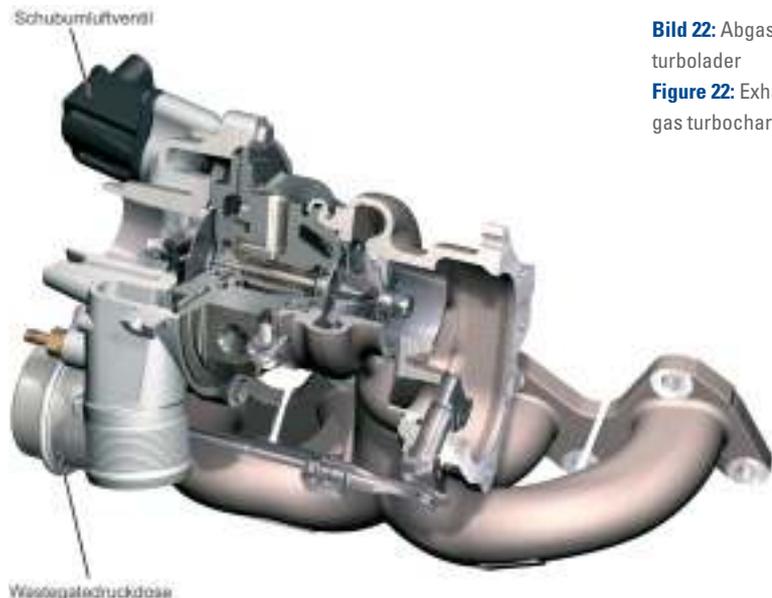


Bild 22: Abgas-turbolader
Figure 22: Exhaust gas turbocharger

Der saugseitige Geräuschdämpfer aus glasfaserverstärktem Polyamid ist direkt an den Kompressor angeflanscht. Die reibgeschweißte Schalenkonstruktion besteht aus neun hintereinander geschalteten Resonanzdämpferkammern nach dem Helmholtzprinzip mit einem Gesamtvolumen von 840 cm³. Im Ergebnis wird eine Dämpfung der Luftpulsation über einen weiten Frequenzbereich erzielt. Der druckseitige Dämpfer besteht aus dem gleichen Material wie der saugseitige Geräuschdämpfer und ist zwischen Lader und Zylinderkurbelgehäuse am Kompressoraustrag angeordnet. Trotz eines kleinen Bauraums konnte durch die reibgeschweißte mehrteilige Schalenkonstruktion die Unterbringung eines wirksamen Dämpfers realisiert werden. Das Druckrohr wurde zugunsten einer vereinfachten Montage als Stecklösung ausgeführt. Der Druckdämpfer arbeitet ebenfalls nach dem Helmholtzprinzip und besteht analog aus neun Kammern mit einem Gesamtresonanzvolumen von 850 cm³. Er erreicht eine Dämpfung von bis zu 30 dB.

Zur weiteren Reduzierung der Schallabstrahlung werden Kompressor und Dämpfer gekapselt sowie die Schalen mit Absorptionsschaum ausgekleidet. Der Schaum steigert den Dämpfungseffekt und ermöglicht eine rundum spaltfreie Abdichtung.

Bild 21 zeigt die Schallabstrahlung des Motors im Kompressorbetrieb bei Hochlauf zwischen 2000 und 2500/min. Bei der Vermessung des Motors im Ausgangszustand waren auf dem Akustikprüfstand die tonalen Anteile der Kompressorordnungen dominierend und auch störend im Fahrzeuginnenraum hörbar. Durch die beschriebenen Maßnahmen sind sowohl diese tona-

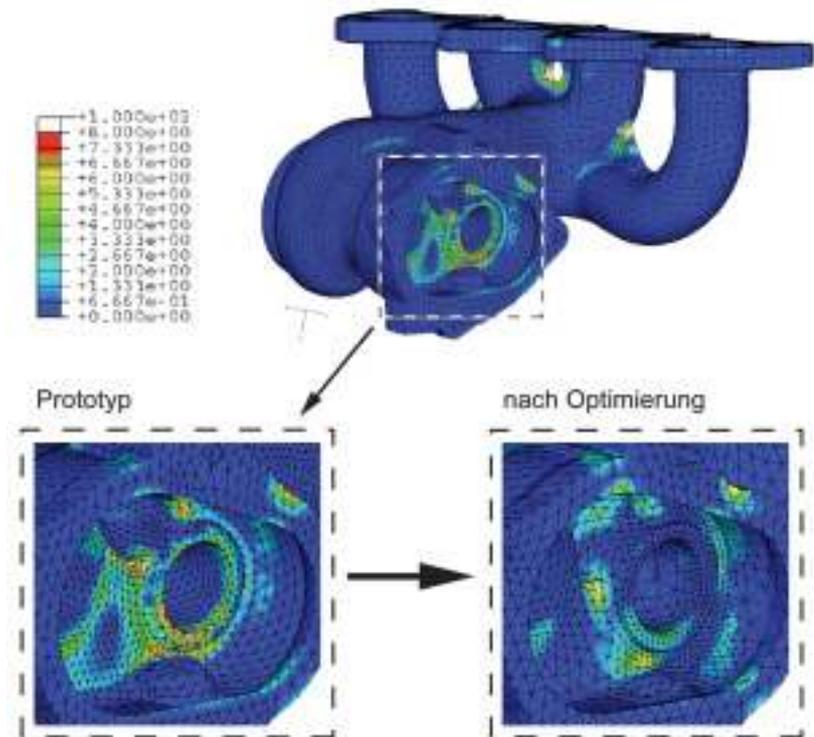


Bild 23: Thermospannungsberechnung des Krümmermoduls

Figure 23: Thermal stress calculation, manifold module

len Anteile als auch die Gesamtabstrahlung der Kompressorbaugruppe bis auf einen gezielt beibehaltenen Anteil im dynamischen Zuschaltbereich wirksam gedämpft worden.

3.2.3 Abgasturbolader und Wärmeabschirmblech

Das zweite Aufladeggregat des TSI-Motors ist ein Abgasturbolader, **Bild 22**, mit Wastegate-Regelung und folgenden Werten:

- Halsquerschnitt 2,8 cm²
- Turbinenraddurchmesser 45 mm
- Verdichterraddurchmesser 51 mm.

Das Turbinengehäuse wurde mit dem Abgaskrümmter als ein Integralbauteil ausgeführt. Der Flansch für das elektrische Schubumluftventil ist in das Verdichtergehäuse integriert.

Um dem Kunden das Verbrauchspotential des TSI-Konzepts maximal nutzbar zu machen, wird weitgehend auf eine bauteiltem-

Eine coole und kompakte Twin-Lösung von GPM.



Kostengünstig, integriert, kompakt.

Die Wasserpumpe mit elektromagnetischer Reibkupplung ist eine innovative Lösung von GPM für den VW GOLF GT. Der Kompressor im TSI-Motor wird über die Wasserpumpe durch das Zuschalten der Kupplung angetrieben. Durch Einsatz eines neuartigen Dichtsystems (VR-Dichtung) ergeben sich weitere Vorteile: Leckagefreiheit, Reibungsminimierung, Trockenlauffähigkeit, Bauraumreduzierung.



Wasserpumpen · Ölpumpen · Steuergehäuse
GPM GmbH · www.gpm-merbelsrod.de

2005 © thomastuermer.de

peraturabhängige Anfertigung verzichtet. Der Turbolader muss aus diesem Grund auch bei Abgastemperaturen von bis zu 1050 °C die volle Funktionsfähigkeit garantieren. Deshalb wurden die nachfolgend beschriebenen Anpassungen am Abgasturbolader vorgenommen.

Das Turbinengehäuse besteht aus hitzebeständigem Stahlguss ähnlich 1.4848. Durch Thermospannungsberechnungen wurden das Gehäuse im Verlauf der Entwicklung rissoptimiert und die Ergebnisse in Dauerläufen verifiziert und abgesichert, **Bild 23**.

Das Turbinenrad wird aus der hochwarmfesten Nickelbasislegierung MAR 246 hergestellt. Zur Steigerung des Wirkungsgrads und zur Wärmeabschirmung zum Lagergehäuse ist es mit einem geschlossenen Radrücken ausgeführt. Zur Erzielung einer ausreichenden Bauteilsicherheit wird für die Welle der Werkstoff X45CrSi9.3 verwendet. Die Verbindung zwischen

Welle und Turbinenrad wird durch Lichtbogen-Schweißen hergestellt. Die Welle ist mit einer reduzierten Wärmedrossel versehen, um über die größere Wandstärke eine ausreichende Festigkeit zu sichern.

Der Klappstellerhebel der Wastegate-Regelung wurde aufgrund der gewünschten Temperaturbeständigkeit in der Nickelbasislegierung INCO 713C ausgeführt. Das Lagergehäuse wird zur besseren Kühlung mit Wasser durchströmt. Der Wasserkern ist mit großem Querschnitt und nahe am Kolbenringsitz ausgeführt. Ein Hitzeschild zwischen Turbinen- und Lagergehäuse verhindert die Überhitzung und Verkokung des Lagersystems. Die Steigerung der maximalen Abgastemperatur auf 1050 °C hat eine erhebliche Auswirkung auf die in der Peripherie des Turboladers liegenden Bauteile. Aus diesem Grund wurde ein dreilagiges Wärmeabschirmblech entwickelt. Neben den Isolationseigenschaften der Zwischenlage ist das Bauteil auch durch Reduzierung der Eigenschwingungen akustisch wirksam. Die Geometrie des Wärmeabschirmblechs wurde hinsichtlich der Abschirmung der Strahlung und der Unterbindung von heißen Luftströmungen in Fahrzeugversuchen optimiert. Gleichzeitig ist dies ein Designelement des TSI-Motors.

3.2.4 Saugrohr

Das Saugrohr ist als zweischaliges Spritzteil aus Kunststoff PA6 GF30 ausgeführt. Um ein seriennahes Temperaturverhalten des Bauteils für die Entwicklungsarbeit frühzeitig darstellen zu können, wurde bereits in der frühen Konzeptphase mit PA-Gießteilen aus Silikon-Werkzeugen gearbeitet. Umfangrei-



Bild 24: Luftführende Bauteile
Figure 24: Charge air circuit

che Strömungsberechnungen mit dem Ziel einer gleichmäßigen Anströmung aller Saugrohrarme führten zu einer dreieckigen Anschlussgeometrie des 90°-Rohrbogens und zu im Sammler angeordneten Leitrippen.

Das Saugrohrunterteil enthält die Luftführung mit Tumbleklappen-Schaltung sowie die Funktion des Hochdruckkraftstoffverteilers. Das Grundkonzept wurde vom FSI-Motor mit 1,6 l/85 kW übernommen.

Der Hochdrucksensor und das Druckbegrenzungsventil wurden für den höheren Raildruck des TSI-Motors mit bis zu 150 bar neu entwickelt und die Ladungsbewegungsklappen aufgrund der höheren Belastung verstärkt.

3.2.5 Ladeluftstrecke

Zu den luftführenden Bauteilen des Motors gehören:

- Saugstutzen zwischen Reinluftrohr, Saugdämpfer und Regelklappe
- Regelstutzen zwischen Regelklappe, Kompressordruckstutzen und ATL-Druckrohr
- Druckrohr zwischen Regelstutzen und ATL.

Um geringe Schallabstrahlung, freie Gestaltung der Anschluss-Geometrien, sichere Verbindungstechnik und Montagefreundlichkeit zu erzielen, sind diese Bauteile als Spritzteile in Kunststoff PA6 GF30 ausgeführt, **Bild 24**.

Die Berücksichtigung von Füge- und Abdichtanforderungen an das Druckrohr vor dem Abgasturbolader stellte sich als besonders anspruchsvoll heraus. Die Toleranzen der gesamten motorfesten Ladeluftstrecke, des Abgasturboladers, des Saugrohrs und des Zylinderkopfs sowie die Wärmedehnun-

gen der Bauteile mussten aufgefangen werden. Als Lösung dient eine halbmondförmige Verbindungsschale, die in mehreren Raststellungen verschraubt werden kann und damit unempfindlich gegenüber Winkel- und Längstoleranzen ist.

Literaturhinweise

- [1] 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 der ATZ und MTZ, Oktober 2003
- [2] Krebs, R.; Spiegel, L.; Stiebels, B.: Ottomotoren mit Direkteinspritzung von Volkswagen. 8. Aachener Kolloquium, Aachen, 1999
- [3] Middendorf, H.; Voeltz, S.: Kurbelgehäuseentlüftung und Ölkreislauf des 1,6-l-85-kW-FSI-Motors. Ölkreislauf von Verbrennungsmotoren, Essen 2005
- [4] Golloch, R.; Merker, P.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren Grundlagen, Stand der Technik und zukünftige Konzepte. In: MTZ 66 (2005), Nr. 2

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

> Alle Varianten souverän im Griff: das LuK Getriebe-Programm

Kupplungssysteme

Torsionsdämpfer

Wandler

Getriebekomponenten

Pumpen



> In jedem Fall ein kluger Zug –
Getriebekomponenten von LuK

Mit einem umfassenden Programm innovativer Getriebekomponenten decken wir das Gesamtsystem Getriebe in all seinen Varianten ab. Ob Baugruppen für automatisierte Schaltgetriebe, Doppelkupplungs- oder Automatikgetriebe, ob Scheibensatz, Laschenkette oder Steuerung für stufenlose Getriebe (CVT) - unsere Komponenten sind die beste Strategie für mehr Dynamik und Komfort bei weniger Kraftstoffverbrauch und Emissionen.

