

Michael WEIßNER  
Karsten WREDE  
Sebastian WATZL  
Tobias MENZEL  
Martin SCHÜTTENHELM  
Christian B. KLÜTING  
Michael FRAMBOURG

PTNSS-2014-201

## Powerful – development of engine and vehicle to realise low CO<sub>2</sub>-emissions

*The EU funded project "Powerful" supported the creation of new solutions to reduce fuel consumption and emission levels below current levels. The task of the related project, performed with a Golf 6 Variant TDI® BMT, is the achievement of 98 g CO<sub>2</sub>/km in NEDC under respect of EU6 minus 10% emission limits. This article describes the general activities undertaken regarding the overall technical approach, the efforts of developing the research engine, its integration into a special validator vehicle and the main results. Some technical features like LTC (Low Temperature Combustion) or heat storage system of engine and vehicle are described more detailed. Beside the NEDC also more dynamic cycles have been investigated including real world driving.*

Key words: TDI, Downsizing, LTC, CO<sub>2</sub>, Alternative fuel, Low Emission

### Powerful – rozwój silnika i pojazdu o małej emisji CO<sub>2</sub>

*Finansowany przez UE projekt "Powerful" wspiera tworzenie nowych rozwiązań, w celu zmniejszenia zużycia paliwa i obniżenia emisji związków toksycznych poniżej obecnie obowiązujących poziomów. W ramach projektu wykonano badania na pojeździe Golf 6 Variant TDI® BMT, osiągając poziom emisji 98 g CO<sub>2</sub>/km w teście NEDC względem normy Euro 6 minus 10% wielkości emisji. W artykule opisano ogólne działania podejmowane w zakresie podejścia koncepcyjnego, rozwijania koncepcji na silniku badawczy, integracji zaproponowanych rozwiązań w specjalnym pojeździe weryfikującym oraz przedstawiono główne wyniki badań. Niektóre koncepcje jak LTC (spalanie niskotemperaturowe) oraz systemu magazynowania ciepła z silnika i pojazdu zostały opisane bardziej szczegółowo. Oprócz testu NEDC przeprowadzono również badania w cyklach jezdnych odwzorowujących rzeczywiste warunki jazdy.*

Słowa kluczowe: TDI, Downsizing, spalanie LTC, emisja CO<sub>2</sub>, paliwa alternatywne, mała emisja

#### 1. Introduction

The well-known and respected influence of automotive based CO<sub>2</sub>-emissions on the climate enhances the necessity of improving the efficiency of passenger cars. Beside the tendency towards hybrid and full electric systems the internal combustion engines will remain a key factor of automotive industry in the next decades. Hence the efficiency of these engines needs to be improved to create a noticeable positive effect on the worldwide CO<sub>2</sub>-emission. Within the 7th framework program of the European Union the project "Powerful" supports several technical strategies towards reduced fuel consumption.

The approach described in this article (and in this magazine) is based on the combination of a homogeneous Diesel combustion "LTC" (Low Temperature Combustion) using a special fuel blend and a downsizing Diesel-engine. Key element of the project is, beside the CO<sub>2</sub>-level, the control of the NO<sub>x</sub>-emission. Downsizing leads to higher specific engine loads and therefore leads to increased NO<sub>x</sub>-emissions. This shall be addressed by the NO<sub>x</sub>-decreasing LTC and a novel exhaust gas aftertreatment system (EATS). The EATS follows the idea of on-board reforming, using a combination of LNT and passive SCR and creating ammonia without urea. The performance of all systems will be demonstrated in a Golf 6 Variant.

#### 1. Wprowadzenie

Dobrze znane i respektowane oddziaływanie motoryzacji na emisję CO<sub>2</sub> powoduje zmiany klimatyczne, prowadzi to do konieczności poprawy efektywności działania samochodów osobowych. Oprócz tendencji do budowy pojazdów hybrydowych czy w pełni elektrycznych, silniki spalinowe pozostaną kluczowym rozwiązaniem w przemyśle motoryzacyjnym w następnych dekadach. W związku z tym należy ciągle poprawiać sprawność silników spalinowych, aby uzyskać zauważalny pozytywny wpływ na światową emisję CO<sub>2</sub>. W ramach 7. programu ramowego Unii Europejskiej w projekcie "Powerful" wykorzystano kilka metod technicznych pozwalających na zmniejszenia zużycia paliwa.

Zmniejszenie zużycia paliwa opisane w tym artykule (oraz w tym czasopiśmie) opiera się na połączeniu spalania niskotemperaturowego "LTC" (*Low Temperature Combustion*), z wykorzystaniem specjalnej mieszanki paliw i z downsizingiem silnika o zapłonie samoczynnym. Kluczowym elementem projektu jest, obok zmniejszenia poziomu emisji CO<sub>2</sub>, kontrola emisji NO<sub>x</sub>. Downsizing prowadzi do wyższych obciążeń silnika, a tym samym do wzrostu emisji NO<sub>x</sub>. Wzrost ten należy obniżyć przez wykorzystanie spalania niskotemperaturowego i nowego układu oczyszczania spalin (EATS – *exhaust gas aftertreatment system*). Układ oczyszczania spalin wykorzystuje koncepcję reformingu w pojeździe przez zastosowanie kombinacji LNT (LNT –

## 2. Engine

Instead of using the engine of the base vehicle, the 1.6l R4 TDI engine, a new 1.4l R3 TDI engine has been created to demonstrate a variety of technical solutions. Based on the EA189 engine with 1.2l displacement the bore has been increased to reach 1.4l. This required a new crankcase with extended and offered the use of new honing methods, of which several solutions have been tested.

The project offered the possibility to scrutinise all elements of the engine. Efforts have been made to reduce friction and fuel consumption or to optimise heat management. A variety of measures have been investigated as shown in the following table.

*lean NO<sub>x</sub> trap*) i pasywnego SCR (SCR – *selective catalytic reduction*) oraz tworzenie amoniaku bez wykorzystywania mocznika.

## 2. Silnik

Zamiast korzystać z silnika 1.6l R4 TDI który jest standardowo montowany w pojeździe weryfikującym, został stworzony nowy silnik 1.4l R3 TDI w celu przedstawienia różnorodność zastosowanych rozwiązań technicznych. Nowy silnik oparty jest na silniku EA189 o pojemności 1.2l, gdzie zwiększono średnicę cylindrów, aby osiągnąć 1.4l. Wymagało to zastosowania nowej skrzyni korbowej z ze zwiększonymi średnicami tulei oraz zaproponowano wykorzystanie nowych sposobów

Tab. 1. Measures to build up "Powerful" engine

Tabela 1. Działania pozwalające na zbudowanie silnika "Powerful"

Component/składnik	Action/measure/działania/badania
Crank case/skrzynia korbową	New design with extended liners and modified honing/nowa konstrukcja z rozszerzonymi tulejami i modyfikowane honowanie
Cylinder head/głowica	Variation of inlet ports/różne kształty kanałów dolotowych
Camshafts/wałki rozrządu	Variation of cam-profiles/różne profile krzywki wałka rozrządu
Bearing shell/panewka	Variation of geometry and material/coating/różna geometria i materiał/powłoki
Piston ring/pierścienie tłokowe	Variation of ring designs and ring tension/różne kształty pierścieni i różne naprężenie
Piston/tłok	Variation of bowls, compression ratios and material/różne kształty komory spalania, różny stopień sprężania oraz materiał
Inlet manifold/kolektor dolotowy	Detuning of air intake/brak dławienia w kalane dolotowym
Exhaust manifold/kolektor wylotowy	Isolation; reduction of thermal mass/izolacja; zmniejszenie masy termicznej
EGR/recyrkulacja spalin	Additional Low Pressure EGR system/dodatkowy system niskociśnieniowej recyrkulacji spalin
DPF/catalyst/filtr cząstek stałych	Variation of sizes/thermal capacities/różne wymiary/pojemność cieplna
Injector/wtryskiwacz	Variation of injector size and type/różne wielkości i typy wtryskiwacza
High pressure pump/pompa wysokiego ciśnienia	New pump design; 3 cam vs. 2 cam/nowa konstrukcja pompy; 3 wałki zamiast 2
Auxiliary drive/napęd pomocniczy	Decoupling device for auxiliary belt/rozłączanie napędów pomocniczych napędzanych paskiem
Boost system/system doładowania	Variation of turbo charger layouts and bearing concepts/różne układy turbodoładowania oraz różne koncepcje łożysk

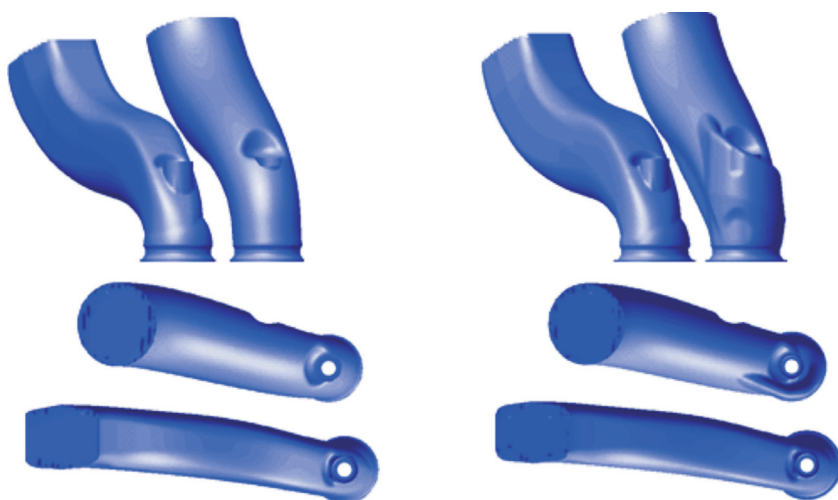


Fig. 1. Experimental designs of inlet ports  
Rys. 1. Projekty konstrukcji kanałów dolotowych

honowania, z których kilka zostało przetestowanych.

W ramach projektu możliwe było modyfikowanie wszystkich elementów silnika. Podjęto wysiłki w celu zmniejszenia tarcia, zmniejszenia zużycia paliwa oraz optymalizacji systemu magazynowania ciepła. Różnorodność działań jakie zostały zbadane przedstawiono w tabeli 1.

Różne konstrukcje głowic oraz wałków rozrządu zostały przebadane z wykorzystaniem symulacji CFD do oceny najbardziej obiecujących geometrii. Ostatecznie zostały zaprojektowane dwie wersje profili krzywki wałka rozrządu oraz dwie geometrie kanałów dolotowych, wykonane i przetestowane w pierwszej wersji silnika.

The variations of cylinder heads and camshafts have been supported by internal CFD simulations to evaluate the most promising geometries. Finally two cam profile options and inlet port designs have been realised and tested in the first engine evolutions.

The high efficiency of the engine in addition to the envisaged low temperature combustion leads to very low exhaust gas temperatures. This is a conflict with catalysts that need a certain minimum temperature (e.g. 200 °C) to create a sufficient performance. To save as much heat energy as possible in the exhaust gas the exhaust manifold has been fabricated with less material and a coating.

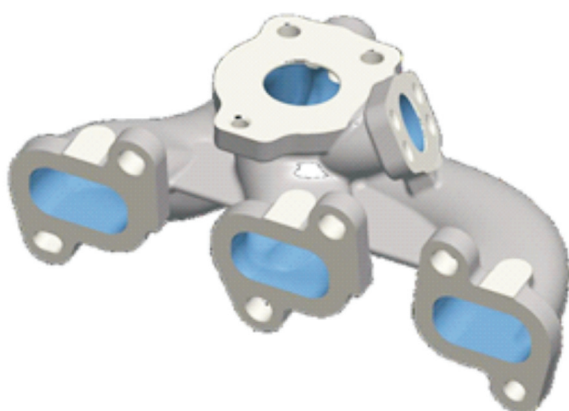


Fig. 2. Exhaust manifold  
Rys. 2. Kanał wylotowy

### 2.1. EGR system

The LTC requires EGR-rates up to 60%. This can hardly be realised with commonly used high pressure EGR-systems. The extraction of exhaust gas on the high pressure side before turbine leads to reduced boost pressure. To avoid this effect an additional low pressure EGR-system has been implemented to the “Powerful”-engine.

The exhaust gas is extracted behind the turbo charger and is fed through an EGR-cooler into the intake of the compressor. To ensure a positive pressure difference an exhaust flap is installed, which can be partially closed on demand to create some backpressure.

The EGR system was, like many other elements of the engine, scrutinised to discover any potentials for efficiency improvements. The exhaust gas is flowing through pipes, coolers, valves etc and is throttled at many geometries in the EGR system. Also those geometries can be optimised to reduce energy losses. Some geometrical modification has been applied to the system to reduce internal flow resistance.

Wysoka sprawność silnika z wykorzystaniem spalania niskotemperaturowego prowadzi do bardzo niskich temperatur gazów spalinowych. Prowadzi to do zmniejszenia efektywności pracy układów oczyszczania spalin, które wymagają pewnej minimalnej temperatury (np. 200 °C) w celu zapewnienia wystarczającej wydajności. Aby zaoszczędzić jak największą ilość energii cieplnej, jak to tylko możliwe z gazów spalinowych, kolektor wylotowy jest wykonany z mniejszej ilości materiału tworząc ciekłą powłokę.

### 2.1. Układ EGR

Spalanie niskotemperaturowe (LTC) wymaga użycia udziału EGR na poziomie do 60%. Zapotrzebowanie to może być trudne do zrealizowania z wykorzystaniem powszechnie stosowanych wysokociśnieniowych układów EGR. Ubytek gazów wylotowych po stronie wysokiego ciśnienia przed turbiną prowadzi do obniżenia ciśnienia doładowania. Aby tego uniknąć został wprowadzony dodatkowy system niskociśnieniowego EGR do silnika „Powerful”.

Spaliny są pobierane za turbosprężarką i są kierowane przez chłodnicę EGR do wlotu sprężarki. Aby zapewnić dodatnią różnicę ciśnień, została zainstalowana przepustnica wylotowa, która może być częściowo zamykana na żądanie w celu wytworzenia pewnego przeciwcisnienia.

System EGR, podobnie jak wiele innych elementów silnika, został przeanalizowany pod względem potencjalnej poprawy efektywności. Spaliny przepływają przez przewody,

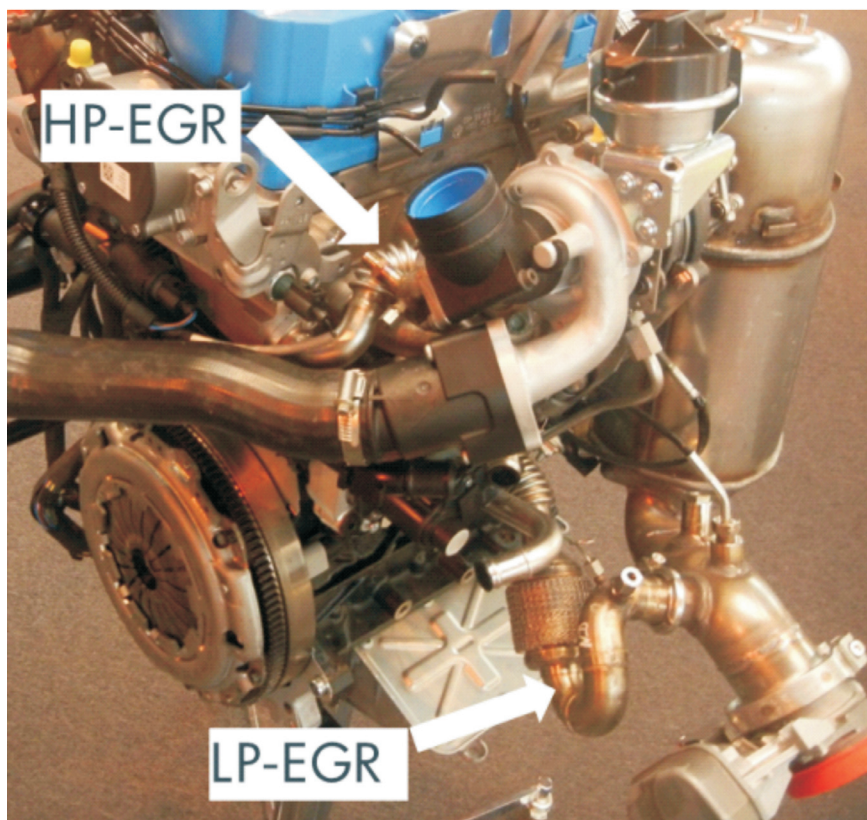


Fig. 3. HP and LP EGR at “Powerful”-engine

Rys. 3. Wysoko- i niskociśnieniowy układ recyrkulacji spalin w silniku „Powerful”



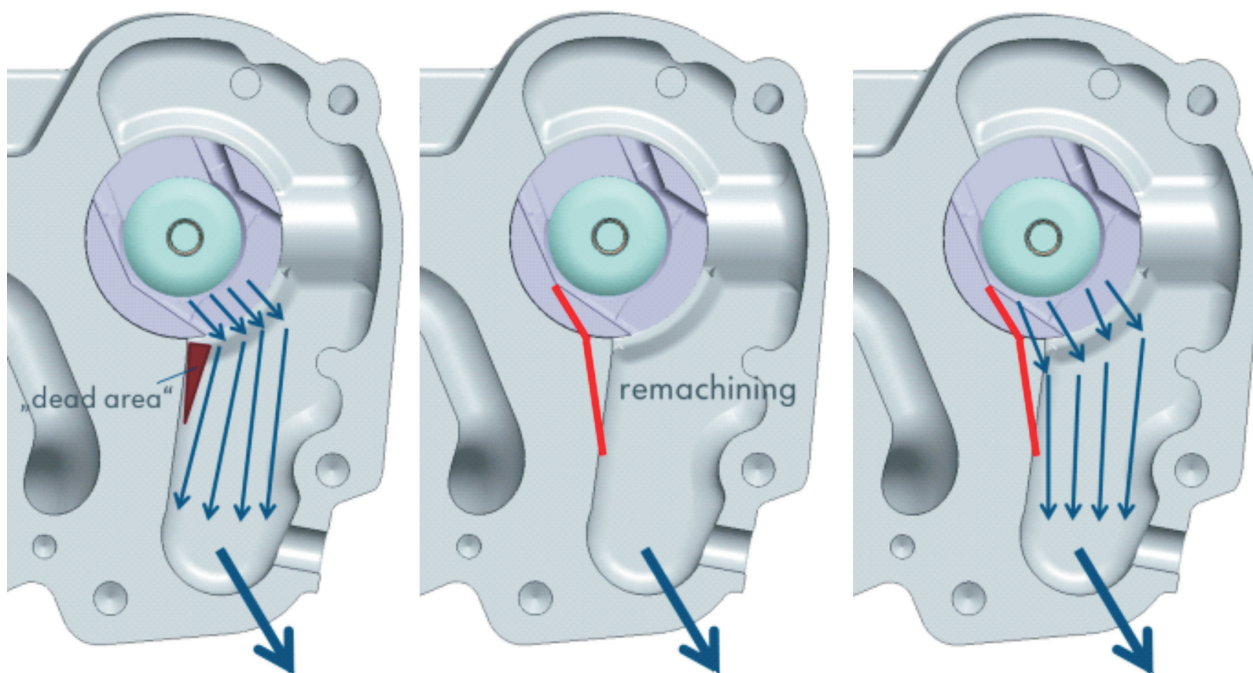


Fig. 4. Remachining of low pressure EGR cooler  
 Rys. 4. Modyfikacje zaworu niskociśnieniowego EGR

Figure 4 shows the remachining of the EGR-valve to widen the flow section and to eliminate disturbing edges.

## 2.2. Piston

Compression ratios and piston designs have been tested as well as the piston material. A variation between  $\epsilon = 14$  up to  $\epsilon = 18.5$  has been performed including different piston bowl designs. Finally the best bowl and compression ratio has been realised with a steel piston, which adds some positive, thermal effects to the combustion process to create the best possible fuel efficiency.

The general potential has been demonstrated in this project by reducing CO<sub>2</sub> significantly. Regardless this ad-

chłodnice, zawory itp., przez co są dławione na licznych zmianach geometrii w układzie EGR. Również te zmiany mogą być optymalizowane w celu zmniejszenia strat energii.

Niektóre modyfikacje geometryczne zostały zastosowane w układzie EGR w celu zmniejszenia wewnętrznych oporów przepływu.

Rysunek 4 przedstawia modyfikację zaworu EGR poszerzającą przekrój przepływu oraz eliminującą zakłócające krawędzie.

## 2.2. Tłok

Stopień sprężania i konstrukcje tłoków zostały przetestowane również z uwzględnieniem zastosowanych materiałów

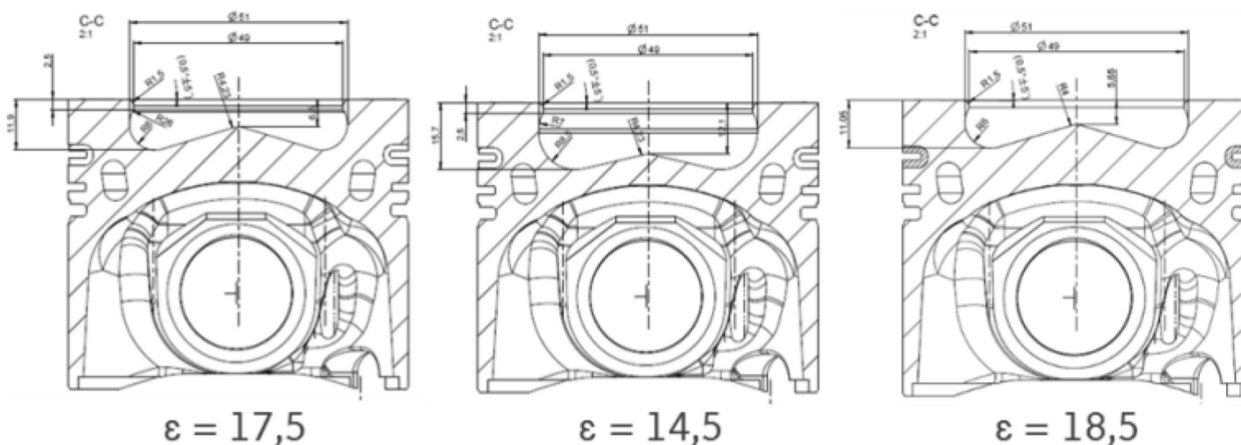


Fig. 5. Selected piston designs from test program  
 Rys. 5. Wybrane projekty tłoków z programu testowego





Fig. 6. Steel pistons with coking after engine testing

Rys. 6. Stalowe tłoki z osadem (nagarem) po badaniach silnikowych

vantage it needs to be considered, that the thermal effects and heat distribution in the piston and combustion area are different compared to aluminium pistons. The design needs to be developed further and adjusted to the envisaged engine layout to avoid oil-coking at the piston rings, as discovered in the described research engine.

### 2.3. Injection system

The injection system has been optimised in several details. Based on a standard common rail system the injectors have been switched towards seat hole injectors to have better control of Hydrocarbon emissions (HC). The injector size has been adapted to the envisaged output of 66 kW/250 N·m. Also a reduction of energy losses has been created by the change of the high pressure pump design. Instead of using a 2-cam pump the design has changed towards a 3-cam profile. This enables a perfect synchronisation of the injections to the 3 cylinders.

A comparison of the pumps on an engine has been done to validate the potential of the new 3-cam design.

A first benefit has been found to be a lower drag torque. The average advantage of 0.33 N·m equals a power of 70 W, which roughly creates 1 g less CO<sub>2</sub>/km in NEDC.

Stationary tests in different operating points confirm the potential of the pump. A reduction of fuel consumption by 1% can be found at low and high torques.

### 2.4. Low Temperature Combustion (LTC)

The idea of LTC is to reach an optimised homogenisation of the fuel-air-mix combined with high EGR levels (up to 60%) to reduce local and overall combustion temperatures. This should reduce the soot and NO<sub>x</sub>-level, but is limited to certain loads or speeds.

The low temperature combustion has been tested in different configurations of the engine and also with Diesel and with a special fuel.

The fuel blend is a mix from naphta and HVO (hydro-treated vegetable oil) by 75/25%. It is enhancing the operating range in terms of engine speed and load by in-

tlóków. Wykonano różne projekty komór spalania tłoków ze stopniami sprężania od  $\varepsilon = 14$  do  $\varepsilon = 18,5$ . Ostatecznie najlepszą komorę i stopień sprężania zrealizowano w tłoku ze stali, który dał pewny pozytywny efekt termiczny przy realizacji procesu spalania w celu stworzenia możliwie najlepszej wydajności paliwa.

Ogólny potencjał, który został zaprezentowany w tym projekcie to zrealizowanie znacznego obniżenia emisji CO<sub>2</sub>. Bez względu na uzyskane korzyści powinno być wzięte pod uwagę, że efekty termiczne i rozkład ciepła na tłoku i w przestrzeni spalania różnią się w porównaniu z tłokami aluminium. Projekt wymaga dalszego rozwoju i dostosowania do planowanego układu silnika, aby uniknąć kokosowania oleju na pierścieniach tłokowych jak to zauważono w opisywanym silniku badawczym.

### 2.3. Układ wtryskowy

Układ wtryskowy został zoptymalizowany w kilku szczegółach. Na podstawie standardowego systemu Common Rail wtryskiwacze zostały zamienione na wtryskiwacze bezstudzienkowe dla lepszej kontroli emisji węglowodorów (HC). Rozmiar wtryskiwaczy został dostosowany do planowanej mocy wyjściowej 66 kW/250 N·m. Ponadto zmniejszenie strat energetycznych zostało zrealizowane przez zmianę konstrukcji pompy wysokiego ciśnienia. Zamiast wykorzystania pompy z podwójną krzywką konstrukcja została zmodyfikowana do wykorzystania trójkrzywkowego profilu. Rozwiązanie to zapewniło doskonałą synchronizację wtrysku dla trzycylindrowego silnika.

Porównanie pomp paliwa zostało przeprowadzone na silniku, aby potwierdzić potencjał nowej trójkrzywkowej konstrukcji.

Pierwszymi korzyściami okazały się zmniejszone momenty tarcia. Przeciętna korzyść osiągnięta na poziomie 0,33 N·m równa się odzyskanej mocy 70 W, co w przybliżeniu skutkuje zmniejszeniem emisji o 1 g CO<sub>2</sub>/km w teście NEDC. Testy stacjonarne w różnych punktach pracy potwierdzają potencjał zastosowanej pompy paliwa. Zmniejsz-

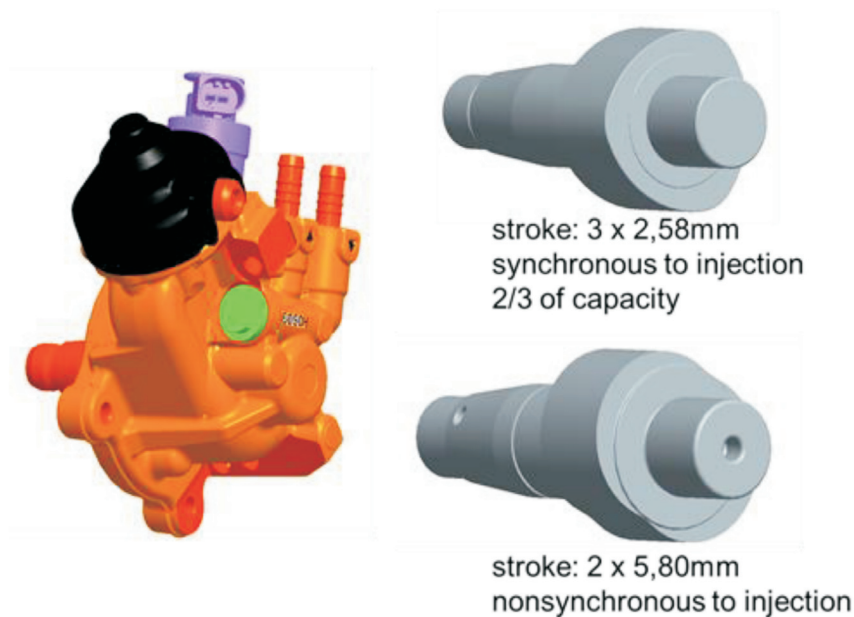
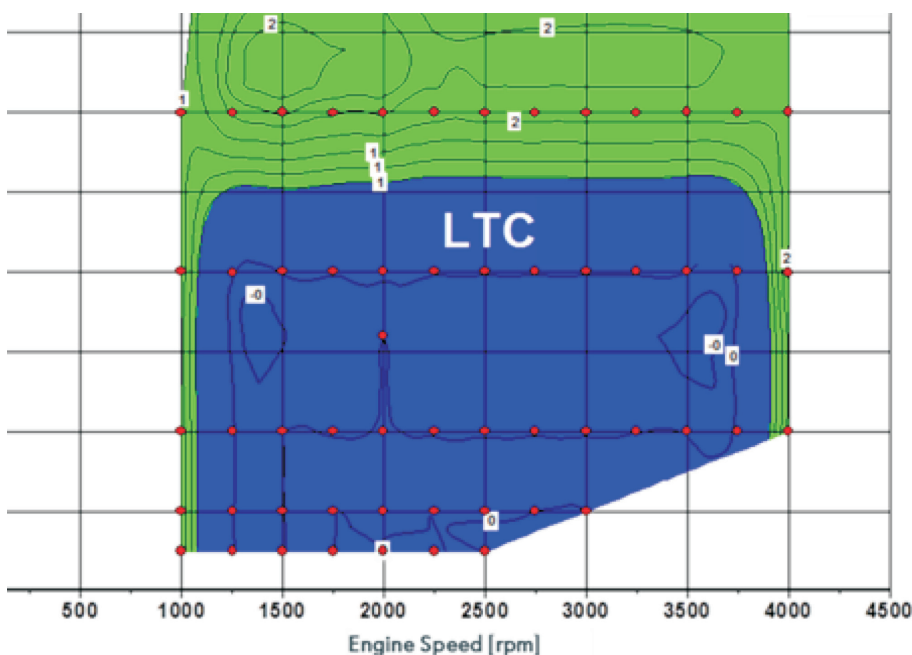


Fig. 7. 3-cam-design of high pressure pump

Rys. 7. 3-krzywkowa konstrukcja pompy wysokiego ciśnienia

creasing the ignition delay and an improved vaporisation. A reduced boiling point and an increased cetane number are the characteristic properties to increase the ignition delay and therefore the time for homogenisation of fuel and air. The range to use LTC has been increased by this tailored fuel blend above 7 bar BMEP. After many iterations and improvements the final range is shown in the Fig. 8. LTC has been calibrated up to 50 N·m engine torque between 1100 and 3900 rpm. This covers the requirements to use LTC in different situations including light accelerations.

porcji 75/25 %. Powoduje to zwiększenie zakresu prędkości i obciążenia silnika przez zwiększenie opóźnienia zapłonu i poprawy odparowania. Zmniejszona temperatura wrzenia i wzrost liczby cetanowej są charakterystycznymi właściwościami umożliwiającymi zwiększenie opóźnienia zapłonu, a zatem zwiększenia czasu homogenizacji paliwa z powietrzem. Zakres zastosowania LTC został zwiększony przez dostosowanie mieszanki dla parametrów pracy powyżej 7 bar BMEP. Po wielu powtórzeniach i udoskonaleniach został ustalony ostateczny zakres,

Fig. 8. LTC operating range as a compromise of NO<sub>x</sub>-reduction and CO<sub>2</sub>-penaltyRys. 8. Zakres stosowania LTC jako kompromis redukcji NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub>

szczenie zużycia paliwa o 1% zostało zanotowane dla niskich i wysokich momentów obrotowych.

#### 2.4 Spalanie niskotemperaturowe (LTC)

Idea spalania niskotemperaturowego (*Low Temperature Combustion*) prowadzi do zoptymalizowanej homogenizacji mieszanki paliwo-powietrznej w połączeniu z dużą wartością EGR (do 60%) w celu redukcji lokalnej i globalnej temperatury spalania. To prowadzi do redukcji poziomu sadzy i NO<sub>x</sub>, ale tylko w ograniczonym zakresie obciążenia i prędkości obrotowej.

Spalanie niskotemperaturowe zostało przebadane w różnych konfiguracjach silnika przy użyciu oleju napędowego, a także z dodatkami paliwowymi.

Mieszanka paliwowa powstała z połączenia nafty i oleju roślinnego (*Hydrotreated Vegetable Oil*) w pro-

porcji 75/25 %. Powoduje to zwiększenie zakresu prędkości i obciążenia silnika przez zwiększenie opóźnienia zapłonu i poprawy odparowania. Zmniejszona temperatura wrzenia i wzrost liczby cetanowej są charakterystycznymi właściwościami umożliwiającymi zwiększenie opóźnienia zapłonu, a zatem zwiększenia czasu homogenizacji paliwa z powietrzem. Zakres zastosowania LTC został zwiększony przez dostosowanie mieszanki dla parametrów pracy powyżej 7 bar BMEP. Po wielu powtórzeniach i udoskonaleniach został ustalony ostateczny zakres, który przedstawiono na rysunku 4. Spalanie niskotemperaturowe zostało określone dla momentu obrotowego silnika do 50 N·m w zakresie od 1100 do 3900 obr/min. Jest to zakres wykorzystania LTC w zróżnicowanych warunkach podczas lekkiego przyspieszania pojazdem. Test dla obciążenia silnika wynoszącego 75 N·m został przeprowadzony, ale zakres emisji CO<sub>2</sub> był nie do przyjęcia.

Sposób takiego spalania prowadzi do zmniejszenia kontroli nad procesem spalania, ponieważ nie jest bezpośrednio związany ze zwiększeniem iniekcji. Aby umożliwić pełną kontrolę nad silnikiem zostały wdrożone innowacyjne systemy elektronicznego sterowania spalaniem. Ciśnienie spalania

A test with 75 N·m load has been performed but increased the CO<sub>2</sub>-level unacceptably.

This type of combustion leads to the loss of control over the combustion process because it is not directly linked to the event of injection anymore. To enable a full control over the engine an innovative electronic system, the combustion control, has been implemented. It is monitoring the internal pressure of each cylinder and adjusts the injection parameters for the following cycle to reach the target values of the calibration.

The transition between standard combustion and LTC needed to be addressed in terms of drivability and emissions. To realise a dynamic transition the used engine software offers the option to switch between operating modes. The transition is realised in a way that the LTC is prepared by adjusting mainly the EGR rate before switching the injection strategy.

Figure 9 shows an example measured in the vehicle in the final calibration. The engine is running in standard combustion mode up to appr. 850 s (x-axis: time [s]). After fulfilling certain criteria to run LTC the preparation for the change to LTC is started. Typical conditions are minimum or maximum temperatures, load, gear etc.

As main preparation the EGR-rate is increased by the ECU from 46 to 54% as shown by the blue graph. This is necessary to prepare LTC and to avoid an unacceptable noise level. After reaching the required EGR level the injection strategy changes from pilot + main injection to the LTC-type main injection. This can be followed by the black graph of the figure.

At the same moment the ECU changes to a new centre of combustion (CoC, red graph), which is applied in the LTC mapping for the given operating point. The combustion control is adjusting the value within a few cycles, while LTC is activated instantly between two cycles. After switching to

jest nadzorowane osobno dla każdego cylindra, a parametry wtrysku są dostosowane dla kolejnych cykli aż do osiągnięcia docelowych wartości kalibracji.

Przejście ze standardowego spalania do spalania niskotemperaturowego musi uwzględniać właściwości jezdne pojazdu i emisję spalin. Aby umożliwić dynamiczne przejście zastosowano oprogramowanie silnika umożliwiające wybór trybu pracy. Przejście na LTC jest realizowane głównie przez zmianę zakresu użycia EGR przed zmianą strategii sterowania wtryskiem.

Rysunek 9 przedstawia przykład pomiarów końcowej kalibracji. Silnik pracuje w standardowym trybie pracy przez 850 s (oś x: czas [s]). Po spełnieniu określonych kryteriów dla LTC jest uruchomione przygotowanie do zmiany trybu pracy. Odpowiednie warunki określone są przez minimalne lub maksymalne temperatury, obciążenie silnika, bieg itp.

Głównym czynnikiem przygotowującym jest zwiększenie stosowanego EGR z 46 do 54 % za pomocą sterownika silnika, przedstawione na wykresie za pomocą niebieskiej linii. Jest to konieczne do przygotowania LTC, aby uniknąć niedopuszczalnego poziomu hałasu. Po osiągnięciu wymaganego poziomu EGR strategia sterowania wtryskiem zmienia się z dawki pilotującej + dawki głównej na dawkę główną spalania LTC. Zmiana strategii wtrysku została przedstawiona na wykresie za pomocą czarnej linii.

W tym samym czasie sterownik silnika zmienia kąt występowania centrum spalania (CoC, czerwona linia), które jest stosowane dla danego punktu pracy LTC. Regulacja sterowania spalaniem jest dostosowana w kilku cyklach, natomiast spalanie niskotemperaturowe jest aktywowane pomiędzy dwoma cyklami. Po przejściu na LTC sterowanie spalaniem jest dostosowane do osiągnięcia kąta centrum spalania i stabilnej pracy trybu LTC. Zmiana trybu pracy na LTC odbywa się szybko i jest prawie niezauważalna dla kierowcy.

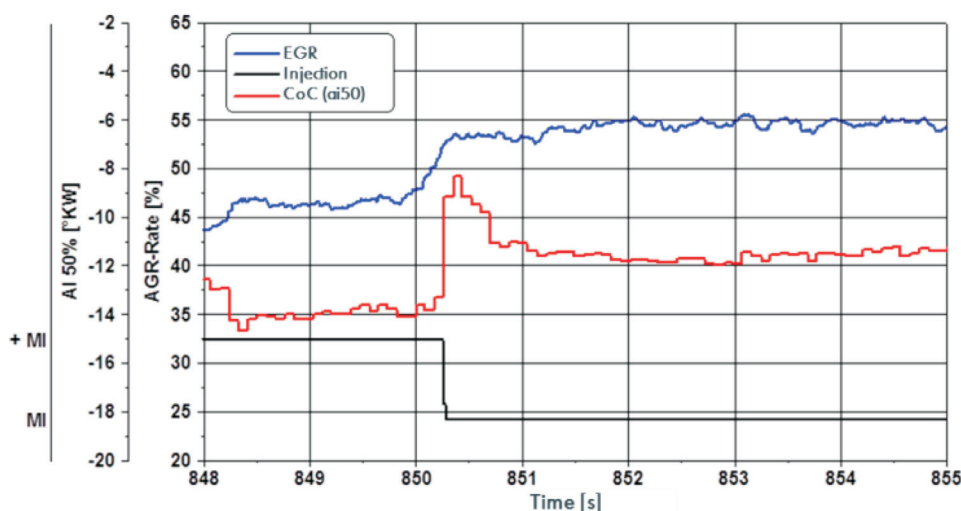


Fig. 9. Transition from standard combustion to LTC; 70 km/h, 1400 rpm, 30 N·m

Rys. 9. Przejście ze standardowego spalania do spalania niskotemperaturowego; 70 km/h, 1400 obr./min, 30 N·m

## 2.5. Turbodoładowanie

Kluczowym czynnikiem wpływającym na sprawność silników, szczególnie tych o zapłonie samoczynnym konstruowanych w oparciu o koncepcję downsizingu, są systemy doładowania. Zabudowanie turbosprężarki oddziałuje na wiele czynników, np. właściwości jezdne, ciśnienie w układzie wylotowym, uzyskiwany moment obrotowy czy zużycie paliwa. Klienci oczekują osiągnąć poziomu pojazdu na określonym poziomie, więc konieczna jest kompensacja spadku mocy wynikającego z ograniczenia pojemności skokowej silnika. Użytecznym narzędziem, umożli-



LTC the combustion control adjusts the centre of combustion and a stable LTC running mode is reached. The change from and towards LTC takes place quickly and is hardly noticeable by the driver.

## 2.5. Turbo charger

A key factor for high efficiency especially on downsizing Diesel engines is the charging system. The layout of the turbocharger affects various aspects of the engine like drivability, backpressures, dynamic torque and fuel consumption. Customers still expect the well-known levels of vehicle acceleration so the loss of engine capacity needs to be compensated. A useful way to create the same requested power with a smaller engine is to charge it, for example by a turbo charger. In this project the base vehicle was already equipped with a turbocharged Diesel engine, so the compensation has been done by a dedicated and improved turbo charger. The main focus was laid on the efficiency. One of the engine's overall efficiency factors is the component efficiency of the turbocharger. The ratio between the energy taken out of the exhaust gas and the energy applied to the fresh, compressed air is crucial and needs to be optimised.

In "Powerful" the standard turbocharger has been replaced by a system with a smaller turbine and a similar sized compressor. The decrease of turbine size improves the dynamic response of the charger and improves drivability and efficiency. The "Powerful" turbocharger from BMTS is shown in Fig. 10.

In a next development step the standard plain bearing has been replaced by a ball bearing. The effect of the ball bearing is a reduction of friction. Instead of friction some pumping losses in the bearing due to the oil have to be considered.

A comparison between the two bearing concepts (standard vs. ball bearing) with unchanged oil flow showed a significant advantage for the ball bearing greater than 1 g CO<sub>2</sub>/km. A sample operating point is shown in Fig. 11.

To guarantee a sufficient lubrication and a protection against overheating of the bearing some oil flow is necessary.

wiającym zwiększenie osiągow, jest na przykład zastosowanie turbodoładowania. W prezentowanym projekcie pojazd bazowy został wyposażony w doładowany silnik o zapłonie samoczynnym, więc kompensacji dokonano poprzez modyfikację zainstalowanej turbosprężarki. Nacisk położono na poprawę sprawności. Czynnikiem wpływającym na spraw-



supplier:	Bosch-Mahle
type:	BM 65
turbine:	T045
compressor:	V020 (D37mm)
bearing:	plain bearing

Fig. 10. Turbo charger with plain bearing (BMTS)

Rys. 10. Turbosprężarka z ślizgowym łożyskowaniem wałka (BMTS)

ność silnika jest sprawność turbosprężarki. Stosunek energii odebranej ze spalin do energii oddanej świeżemu ładunkowi jest w tym wypadku decydujący i na nim skupiono uwagę.

W projekcie „Powerful” bazową turbosprężarkę zastąpiono urządzeniem posiadającym mniejszą turbinę, natomiast sprężarka posiadała zbliżone gabaryty.

Zmniejszenie wymiarów turbiny wpłynęło na poprawę nadążności urządzenia, a tym samym polepszenie właściwości jezdnych i wzrost sprawności. Rysunek 10 przedstawia turbosprężarkę wykonaną przez BMTS.

W następnym etapie rozwojowym łożysko ślizgowe zastąpiono łożyskiem tocznym, dzięki czemu obniżono moc

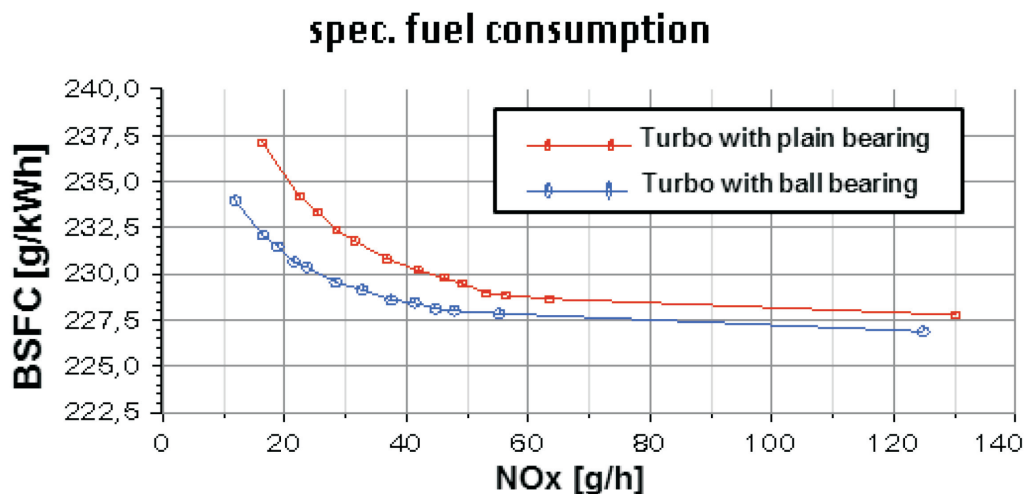


Fig. 11. Reduced fuel consumption with ball bearing turbo charger (2000 rpm, 80 N·m)

Rys. 11. Redukcja jednostkowego zużycia paliwa w silniku z turbosprężarką wyposażoną w łożyska toczne (2000 obr/min, 80 N·m)

By controlling and reducing this oil flow through the bearing the efficiency of the charger can be further improved and maintained on the highest achievable level within the limits of the system.

The positive effect of a reduced oil flow in the bearing has been validated and is shown in the following diagram. It shows the fuel consumption for different oil flows including zero oil. Without oil flow the friction in the bearing is minimised because of minimised splashing and pumping losses.

It should be mentioned, that zero oil is not a real option for a ball bearing turbo charger due to overheating and bearing damages after a very short time. It just demonstrates the potential and limits of oil flow control.

Stationary bench tests with the three described evolutions of the charger (slide bearing, ball bearing, ball bearing with oil flow control) showed reduced CO<sub>2</sub> emissions (Diesel).

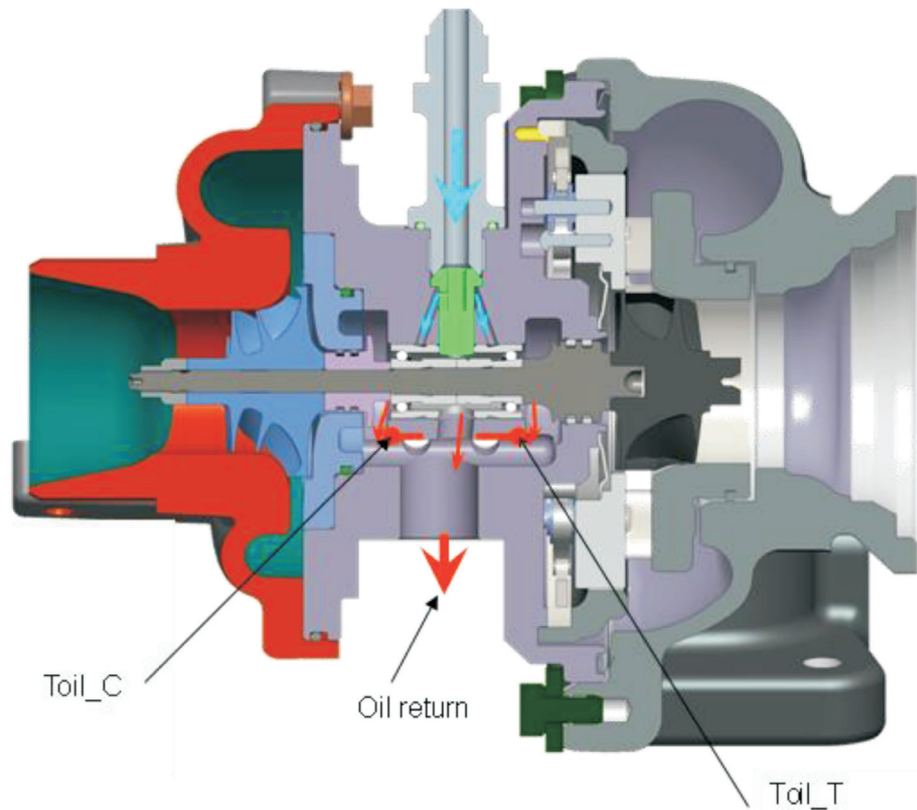


Fig. 12. Turbo charger BM65 with ball bearing  
Rys. 12. Turbosprężarka BM65 z łożyskami tocznymi

tarcia. Zamiast strat tarcia, pewne straty pompowania oleju w łożysku musiały być wzięte pod uwagę.

Porównanie koncepcji łożyskowania (ślizgowego i tocznego) z niezmiennym natężeniem przepływu oleju pokazało

istotne zalety łożysk tocznych, przekładające się na obniżenie emisji CO<sub>2</sub> przekraczające 1 g/km. Przykładowy punkt pracy przedstawiono na rysunku 11.

Celem zagwarantowania dostatecznego smarowania i zabezpieczenia przed przegrzaniem łożyska konieczne jest natężenie przepływu oleju o wymaganej wartości. Dzięki kontroli i redukcji natężenia przepływu oleju, sprawność może zostać zwiększona i utrzymana na najwyższym osiągalnym poziomie.

Dostrzeżony i zweryfikowany został pozytywny skutek zmniejszenia natężenia przepływu oleju, co pokazuje wykres na rys. 13, na którym przedstawiono jednostkowe zużycie paliwa w funkcji zmiennego natężenia przepływu oleju, włącznie z jego

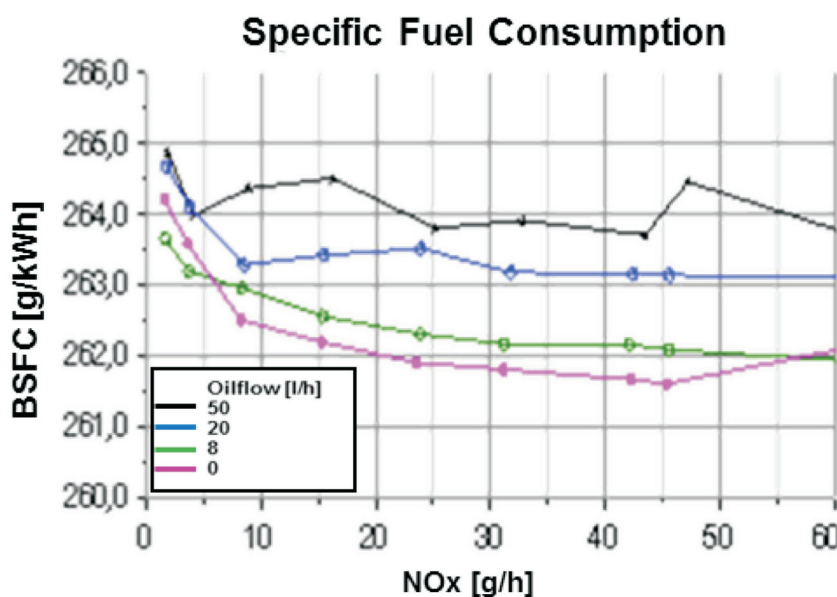


Fig. 13. Effect of oil flow on fuel consumption (1375 rpm; 35 N·m)

Rys. 13. Wpływ natężenia przepływu oleju na jednostkowe zużycie paliwa (1375 obr/min; 35 N·m)

Tab. 2. Fuel consumption and CO<sub>2</sub>-emission with different turbo charger evolutions  
 Tab. 2. Zużycie paliwa i emisja CO<sub>2</sub> pojazdu wyposażonego w trzy rozpatrywane typy turbosprężarek

Configuration/konfiguracja	Fuel consumption/zużycie paliwa [dm <sup>3</sup> /100 km]	CO <sub>2</sub> (NEDC) [g/km]
Charger BM T045 plain/zwykły	4.28	112.6
Charger BM T045 ball/łożyska kulkowe	4.24	111.5
Charger BM T045 ball, oil flow/łożyska kulkowe, przepływ oleju	4.20	110.4

As shown in the table the control of the oil flow nearly produced the same potential as the change from plain to ball bearing. Both measures show a sufficient potential for CO<sub>2</sub> reduction compared to the efforts taken, hence both are used in the “Powerful”-engine.

### 3. Vehicle

The base line vehicle is a Golf 6 Variant BMT®, which is equipped with a 1.6l R4 TDI® engine and homologated with 109 g CO<sub>2</sub>/km in NEDC. This vehicle has been modified towards the “Powerful” validator vehicle by numerous measures (Fig. 14).



Fig. 14. “Powerful” validator vehicle  
 Rys.14. Weryfikacyjny pojazd projektu „Powerful”

The integration of the 1.4L R3 TDI® engine required new engine brackets and package solutions, chassis modifications to create clearance for the turbo charger and EATS, an electrical integration of the new engine electronics into the vehicle structure, a different fuel system, measurement and control equipment and the reformat gas system for running the EATS. An overview of the overall layout is given in Fig. 15.

The final validator increased its weight compared to the reference car due to the described systems brought on board and due to the modifications.

The reference car is assigned to inertia class 3250 lbs for NEDC homologation. Due to the additional weight of the required systems (batteries, control units, gas system etc.) the inertia class of the validator has been changed to 3500 lbs. This addresses a certain increase of weight. The

zatrzymaniem. Brak przepływu oleju w łożyskowaniu turbosprężarki powoduje minimalizację strat tarcia, spowodowaną ograniczeniem strat pompowania i odrzucania oleju przez obracający się wał.

Należy nadmienić, że brak przepływu oleju działa destrukcyjnie również na łożysko toczne, ponieważ doprowadza do przegrzania łożyska i w konsekwencji do jego zniszczenia, aczkolwiek pokazuje potencjał i ograniczenia dla natężenia przepływu oleju.

Testy na stacjonarnym stanowisku pomiarowym z trzema opisywanymi turbosprężarkami (z wałkiem łożyskowym ślizgowo, z wałkiem łożyskowym tocznie oraz z wałkiem łożyskowym tocznie i kontrolowanym natężeniem przepływu oleju) pokazały obniżenie emisji CO<sub>2</sub>.

Jak pokazano w tabeli 2, kontrola natężenia przepływu oleju przez łożyska wykazuje taki sam potencjał w redukcji zużycia paliwa, jak zmiana sposobu łożyskowania wałka. Obydwa rozwiązania umożliwiają czerpanie znaczących korzyści w stosunku do nakładu pracy, więc zostały jednocześnie zaimplementowane w projekcie.

### 3. Pojazd

Pojazd bazowy to Golf 6 Variant BMT® z homologacją na 109 g CO<sub>2</sub>/km w teście NEDC.

Pojazd ten został zmodyfikowany na model weryfikacyjny w celu realizacji projektu „Powerful” (rys. 14).

Zintegrowanie silnika 1.4 R3 TDI wymaga nowych wsporników jednostki napędowej i szeregu modyfikacji nadwozia wymaganych do stworzenia przestrzeni dla turbosprężarki i układów oczyszczania spalin, integracji elektrycznej nowej elektroniki silnika w konstrukcji pojazdu, nowego zmodernizowanego systemu paliwowego, urządzeń do pomiaru i kontroli oraz instalacji pojemników gazów niezbędnych do reformingu i pracy systemu EATS. Przegląd ogólny układu przedstawiony jest na rysunku 15.

Ostatecznie waga pojazdu weryfikacyjnego uległa zwiększeniu w porównaniu do samochodu bazowego ze względu na liczne modyfikacje i systemy umieszczone w pojeździe.

Samochód bazowy jest przypisany do klasy bezwładności 1474 kg dla testu homologacyjnego NEDC. Ze względu



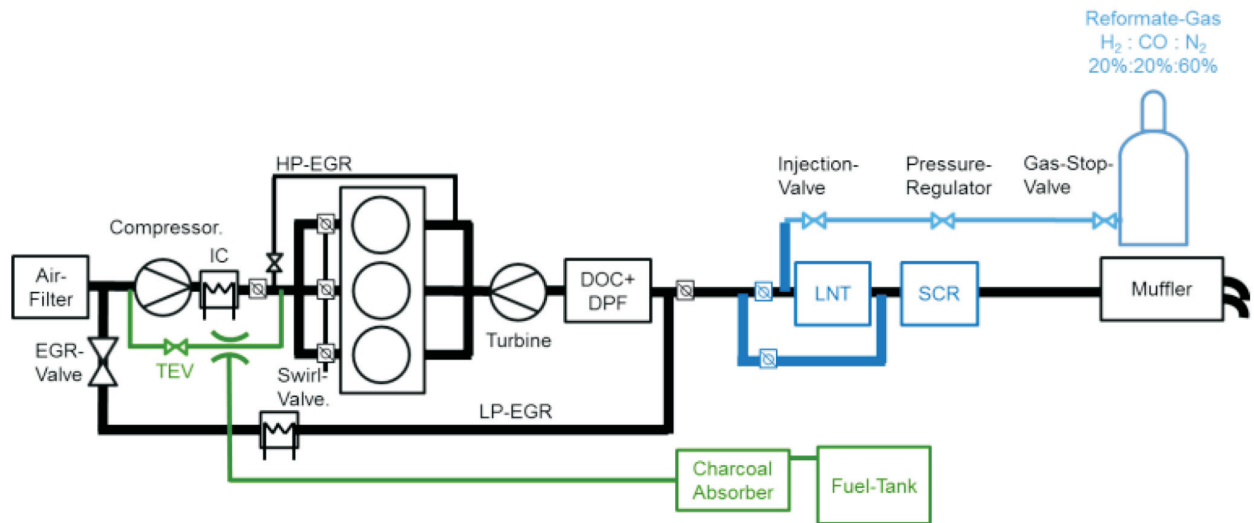


Fig. 15. Schematic layout of engine and EATS in the vehicle

Rys. 15. Schemat układu silnika i EATS w pojeździe

challenge to reach the CO<sub>2</sub> target is nonetheless increased by the additional weight.

An example for prototype technologies is the reformat gas system to run the EATS. To simulate the effect of an on board fuel reformer it has been decided to use a synthetic gas (H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/CO; 20/60/20%) with the properties close to the product of the reformer.

na dodatkową masę wymaganych systemów (akumulatorów, urządzeń kontrolnych, systemów niezbędnych do reformingu itp.) klasa bezwładności pojazdu weryfikacyjnego uległa zmianie na 1588 kg. Świadczy to o pewnym wzroście masy samochodu demonstracyjnego. Osiągnięcie celu zmniejszonej emisji CO<sub>2</sub> w żaden sposób nie została zakłócona przez zwiększenie masy pojazdu.

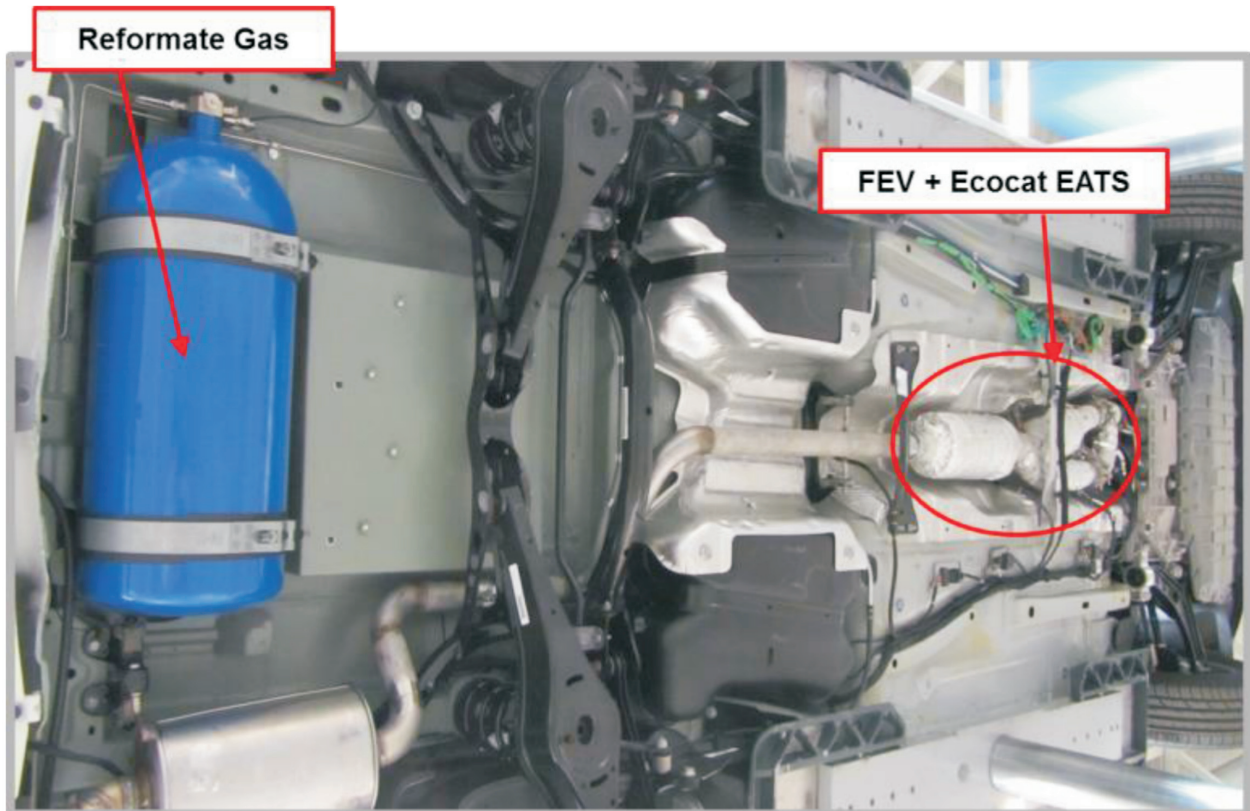


Fig. 16. Integration of Gas-system in the vehicle

Rys. 16. Integracja zbiornika gazowego dla systemu EATS w pojeździe

Tab. 3. Measures to build up "Powerful" vehicle #2  
Tabela 3. Podjęte działania do zbudowania pojazdu „Powerful” nr 2

Area/obszar	Action/measure/działania/pomiary
Engine/silnik	R3 TDI Powerful engine, new engine mounting, intercooler, water system, ECU/R3 TDI silnik projektu Powerful, nowe mocowanie silnika, intercooler, system wodny, ECU
Fuel system/układ wtryskowy	System from gasoline pendant including charcoal absorber/kompletny system paliwowy włącznie z absorberem węgla
EATS/system oczyszczania spalin	Powerful EATS including electronic control/Powerful EATS łącznie z elektronicznym sterowaniem
Reformat gas/gazy reformulowane	Gas system with bottle, connectors, valves, injectors, electronics and safety devices like emergency stop switch/instalacja gazowa z butlą, złącza, zawory, wtryskiwacze, elektronika i urządzenia bezpieczeństwa, takie jak na awaryjny wyłącznik stop
Suspension/zawieszenie	Rear axle from 4WD-variant Stronger springs and dampers from Passat due to increased axle weight/Tylna oś z pojazdu VW Passat z napędem na 4 koła, wykorzystanie silniejszych sprężyn i amortyzatorów z powodu zwiększonego nacisku na oś
Chassis/podwozie	Front: clearance for turbocharger packaging Rear: integration of batteries, gas bottle/przód: zwolnienie miejsca na umieszczenie turbosprężarki, tył: integracja miejsca na akumulator i butle gazu
Electric/układy elektryczne	Additional loom for control units, batteries, measurement equipment and sensors/dodatkowe wiązki dla jednostek kontrolnych, akumulatorów, urządzeń pomiarowych i czujników
Fire protection/ochrona przeciwpożarowa	Manual fire extinguisher installed in the vehicle/zainstalowany w pojeździe manualny system gaśniczy
PEMS/mobilne pomiary emisji	Preparation of arrangement/loom for PEMS integration/przygotowanie układu do integracji systemu PEMS

The measures to build the "Powerful" vehicles reach from emergency stop switches to a new engine. An overview is given in Table 3. The complete integration of the PCM in validator #1 is not in this list, which describes solely the actions undertaken on the final validator.

### 3.1. PCM-Exhaust-Heatstorage

To reduce the fuel consumption, minimise engine wear and optimize passenger comfort during cold start, a PCM heatstorage system has been applied to the vehicle. The technology of the used PCM-Exhaust-Heatstorage was investigated in a previous research project with the goal of creating a high energy density storage concept by usage of exhaust waste heat.

In a PCM based heat storage (also called latent heat storage), the phase change enthalpy of a material is used. Typically, a material is chosen, which changes from solid to fluid phase while heated up and changes back from fluid to solid phase when releasing the heat energy.

The storage is recharged during driving by otherwise wasted exhaust energy.

In a first attempt, the original system design was used. The release of heat was bundled into the engine cooling circuit. Previous tests on gasoline engines had shown a CO<sub>2</sub>-benefit of > 5 g/km within the NEDC. The target was to transfer as much of this benefit as possible to the regarded diesel application. The gained impact on coolant and oil warm-up performance using that discharge concept is shown in Fig. 17.

After 3 minutes, an advance in coolant temperature of 20 to 30 K was accomplished.

The effects of additional cold start consumption in diesel engines do significantly differ from those of gasoline engines. Whereas the cold start of gasoline engines is dominated by effects of imperfect mixture formation and combustion and thus strongly affected by liner temperature, cold start con-

Przykładem prototypowych technologii jest zastosowany system gazów reformowanych do działania EATS. Aby symulować efekt reformingu paliwa na pokładzie pojazdu użyto gazów syntetycznych (H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/CO; 20/60/20%) o właściwościach zbliżonych do produktów reformera.

Modyfikacje wymagane do zbudowania pojazdu „Powerful” doprowadziły do powstania nowego silnika. Informacje poglądowe podane są w tabeli 3. Pełna integracja PCM w pojeździe weryfikacyjnym nr 1 nie jest wyszczególniona w liście, która opisuje działania podejmowane wyłącznie do budowy ostatecznej wersji samochodu weryfikacyjnego.

### 3.1. Materiały zmiennofazowe – system akumulacji ciepła odzyskanego z układu wylotowego

System akumulacji ciepła (PCM) został zastosowany w pojeździe w celu zmniejszenia zużycia paliwa, zmniejszenia zużycia silnika i optymalizacji komfortu pasażerów podczas zimnego rozruchu. Technologia zastosowania odzysku ciepła z układu wylotowego została przebadana w poprzednim projekcie w celu przechowywania energii cieplnej o dużej gęstości przez wykorzystanie ciepła traconego w układzie wylotowym.

W oparciu o przechowywanie ciepła PCM (zwanego także ukrytym magazynowaniem ciepła) jest używana entalpia przemiany fazowej materiału. Zazwyczaj jest wybierany materiał, który zmienia się z ciała stałego do fazy ciekłej przy ogrzewaniu i przemienia się z powrotem z cieczy do fazy stałej podczas uwalniania energii cieplnej.

Magazynowanie ciepła odbywa się przez odzysk energii podczas jazdy przez odzysk ciepła z układu wylotowego.

Podczas pierwszych prób był użyty oryginalnie zaprojektowany system. System uwalniania ciepła został połączony z systemem chłodzenia. Dotychczasowe badania na silnikach spalinowych wykazały korzyści dla emisji CO<sub>2</sub> w postaci jej zmniejszenia o 5 g/km w teście NEDC. Celem było przeniesienie systemu w jak największym stopniu jak to możliwe

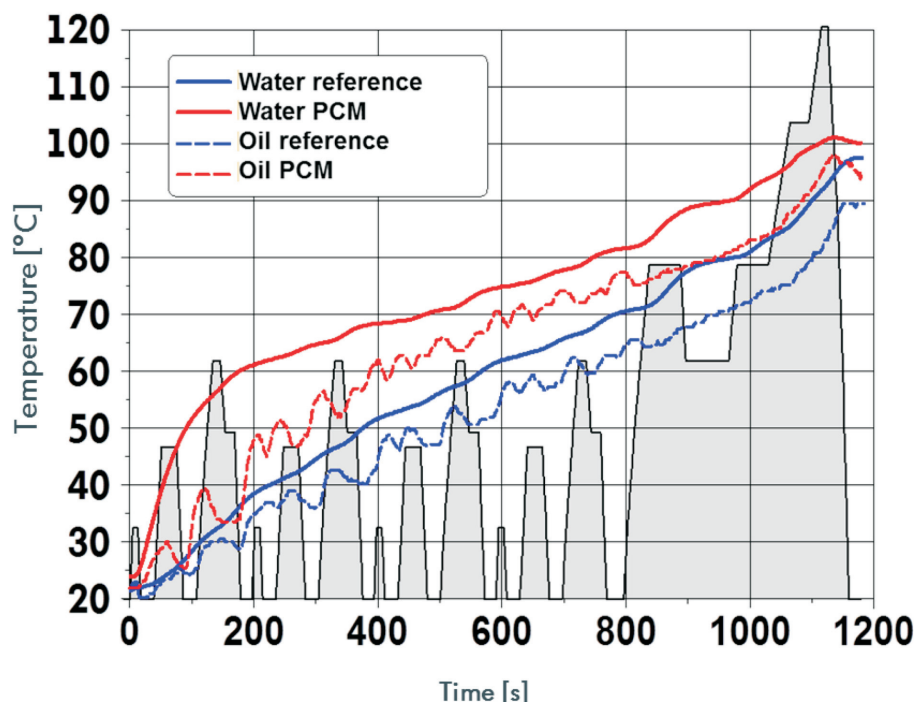


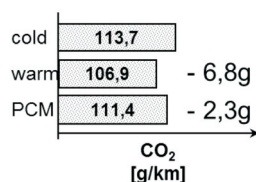
Fig. 17. NEDC, heat released to engine oil

Rys. 17. Ciepło uwalniane do oleju silnikowego w teście NEDC

sumption of diesel engines is, to a high degree, determined by increased mechanical friction.

To better address this special characteristic of the new application, the PCM-Exhaust-Heatstorage System was modified to enable a direct heat release into the engine oil. The results are shown in Fig. 18.

The effect of the heat release into the oil is significant. An advance in oil temperature compared to the reference of 40 to 50 K was achieved. Fig. 19 represents the effect on CO<sub>2</sub> emission gained by heat release into engine oil in the NEDC:


 Fig. 19. CO<sub>2</sub>-benefit of PCM in NEDC

Rys. 19. Korzyści emisji CO<sub>2</sub> przy użyciu PCM w teście NEDC

Although the gained two to three g/km CO<sub>2</sub> reduction seem beneficial on first sight, they do not meet the goal based on results of previous applications of the PCM-Exhaust-Heatstorage. Additionally, the charging was

dla silnika ZS. Wykazano największy wpływ na temperaturę płynu chłodzącego i oleju przez szybsze nagrzewanie się co przedstawiono na rys. 17.

W ciągu 3 minut uzyskano wzrost temperatury o 20 do 30 K.

Dodatkowe efekty podczas zimnego rozruchu różnią się znacząco w silniku o zapłonie iskrowym i o zapłonie samoczynnym. Natomiast zimny rozruch w silniku o ZI jest zdominowany przez efekty niedoskonałego tworzenia i spalania, a tym samym zdecydowanie wpływa na liniowość temperatury, zwiększone zużycie paliwa podczas zimnego rozruchu silnika ZS co jest spowodowane zwiększonym tarciem mechanicznym.

Aby lepiej ukierunkować specjalistyczny charakter nowej aplikacji systemu PCM został on zmodyfikowany w celu oddania ciepła do oleju silnikowego.

Wyniki przedstawiono na rysunku 18.

Efekt oddawania ciepła do oleju jest znaczący. Osiągnięto wzrost temperatury o 40 do 50 K. Rysunek 19 przedstawia efekt emisji CO<sub>2</sub> uzyskany przez oddawanie ciepła do oleju w teście NEDC:

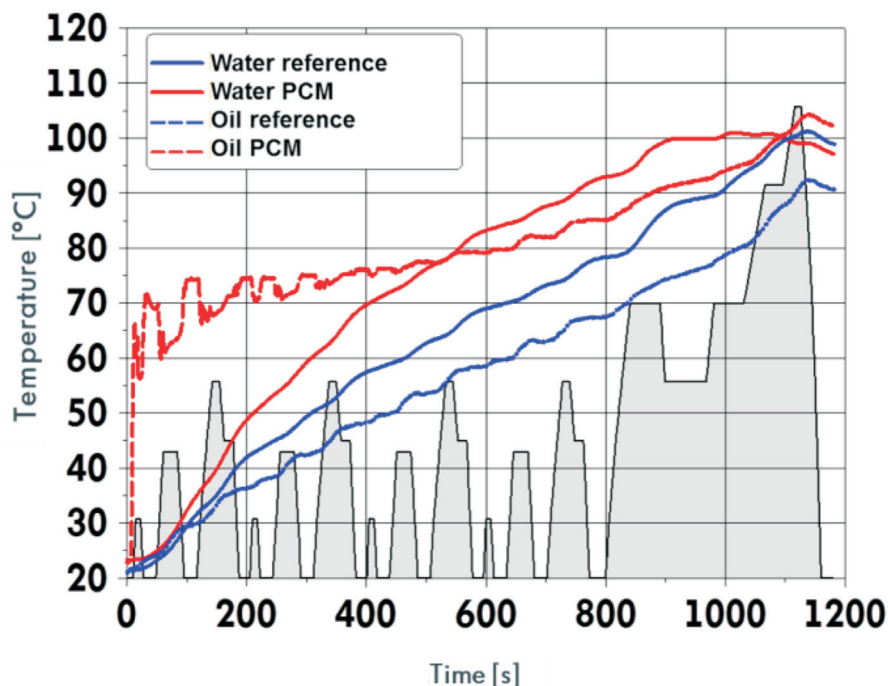


Fig. 18. NEDC, heat released to engine coolant

Rys. 18. Test NEDC, oddawanie ciepła do płynu chłodzącego



challenging due to the very efficient diesel engine and the complex exhaust after treatment systems, both resulting in very low exhaust gas temperatures. In the test configuration, it was impossible to recharge the system inside the NEDC limits.

In conclusion, the PCM-Exhaust-Heatstorage system was not able to transfer its promising performance in gasoline applications into this diesel application. A too small net CO<sub>2</sub> benefit in combination with too long recharge time resulted in a negative recommendation for usage in the final validator.

### 3.2. Electronics

The "Powerful" validator contains some special solutions on the electronics. Several systems have been integrated into the given, electronic architecture. The prototype engine software needed to be linked to the vehicle system. Two separate control units ES1000 have been implemented to control EATS, gas system and some engine functionalities.

In total two vehicles have been built. The first prototype performed the main engine testing and PCM investigations. The second vehicle, the validator, has been equipped with the latest engine evolution and the novel EATS to perform one year of testing on chassis roller test benches and test tracks.

### 4. Methodology of testing

The development of the "Powerful" vehicle is based on intensive testing. To achieve the necessary results three different test methods have been used. Over the period of two years the engine has been running on engine test benches of the Volkswagen group research to evaluate the best technical solutions and calibrations. For 1 ½ years the vehicles have been running on chassis roller test benches and also on the road to adjust the calibration of PCM, engine and EATS and there interaction. The last few month of the project have been characterised by a direct link of engine and chassis roller test bench. The direct feedback from the vehicle has been transferred to the engine test bench, where improvements have been elaborated, which have been tested the next day in the vehicle. This link between the two methods enabled an efficient and fast calibration of the EATS and engine.

Pomimo uzyskania redukcji o dwa do trzech g/km CO<sub>2</sub> dających wstępne korzyści, nie uzyskano celu opierającego się na wynikach poprzednich badań systemu PCM-Exhaust-Heatstorage. Ponadto akumulacja ciepła w wydajnych silnikach ZS jest bardzo trudna ze względu na złożoną instalację oczyszczania spalin oraz niską temperaturę spalin. W rezultacie niemożliwe było magazynowanie ciepła w zakresach limitów testu NEDC.

Podsumowując system PCM zastosowany w silnikach benzynowych nie mógł prawidłowo pracować w zastosowaniu do silnika o ZS. Zbyt małe korzyści emisji CO<sub>2</sub> w połączeniu z zbyt długim czasem magazynowania ciepła spowodowało negatywną rekomendację do zastosowania w pojeździe weryfikującym.

### 3.2. Układy elektroniczne

Pojazd weryfikacyjny „Powerful” zawiera pewne szczególne rozwiązania z dziedziny elektroniki. Kilka systemów zintegrowano w jedną architekturę. Prototypowy układ sterowaniem silnika musiał zostać połączony z elektroniką pojazdową. Dwie osobne jednostki sterujące ES1000 zaimplementowano do kontroli EATS, układu zasilania i niektórych elementów wykonawczych silnika.

W konsekwencji zbudowano dwa pojazdy. Na pierwszym z nich przeprowadzono główne testy silnika oraz testy PCM. Drugi pojazd weryfikacyjny był wyposażony w ostatnią wersję silnika i oprogramowanie ETAS. Badania były przeprowadzone na hamowniach podwoziowych oraz torach testowych i trwały rok.

### 4. Metodologia badań

Rozwój projektu „Powerful” opiera się na intensywnych badaniach. Aby uzyskać wyniki badań wykorzystano trzy różne metody badań. W okresie dwóch lat silnik został uruchomiony na stanowisku silnikowym w grupie Volkswagena w celu określenia najlepszego technicznego rozwiązania i kalibracji. W ciągu pół roku pojazd został przebadany na stanowisku podwoziowym, a także w warunkach drogowych w celu kalibracji PCM, silnika i w płynie na układ oczyszczania spalin. Ostatnie miesiące projektu charakteryzowały się bezpośrednim połączeniem badań



Fig. 20. Rear compartment with ES1000 and preparation for PEMS

Rys. 20. Przestrzeń bagażowa z układem ES1000 i przygotowanie do pomiarów z użyciem PEMS

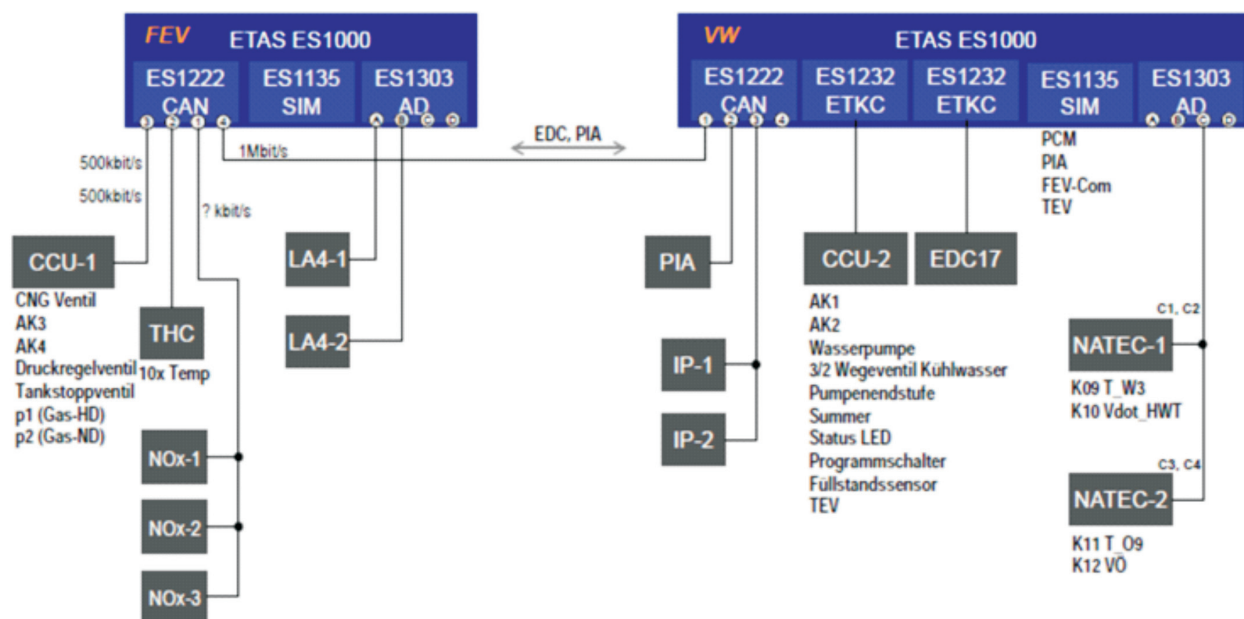


Fig. 21. Structure of electronic research components

Rys. 21. Schemat struktury elektronicznych komponentów pomiarowych

Additionally to the obliged NEDC tests road testing without and with PEMS (Portable Emission Measurement System) have also been performed. Fully equipped the vehicle weight without driver has been increased by the PEMS to 1820 kg corresponding to inertia class 4250 lbs, which drastically increased the challenge especially for the handling of the NO<sub>x</sub> raw emissions.

## 5. Results

The aim of “Powerful” is to stay below a certain CO<sub>2</sub> and emission level in the standard New European Driving Cycle containing urban and extra urban cycles.

silnikowych i badań na hamowni podwoziowej. Bezpośrednie reakcje pojazdu były przekazywane do hamowni silnikowej, gdzie opracowano zmiany, które zastosowano następnego dnia w pojeździe. Jest to powiązanie pomiędzy dwoma metodami wydajnej i szybkiej kalibracji układu oczyszczania spalin z silnikiem.

Ponadto test NEDC w warunkach drogowych przeprowadzono bez użycia oraz z użyciem przenośnego systemu pomiaru emisji spalin (PEMS). Masa pojazdu wyposażonego w PEMS wzrosła do 4250 lbs (1820 kg), co spowodowało drastyczne zwiększenie emisji, zwłaszcza dla surowych norm NO<sub>x</sub>.



Fig. 22: Validator equipped with PEMS

Rys. 22. Pojazd weryfikacyjny wyposażony w system PEMS



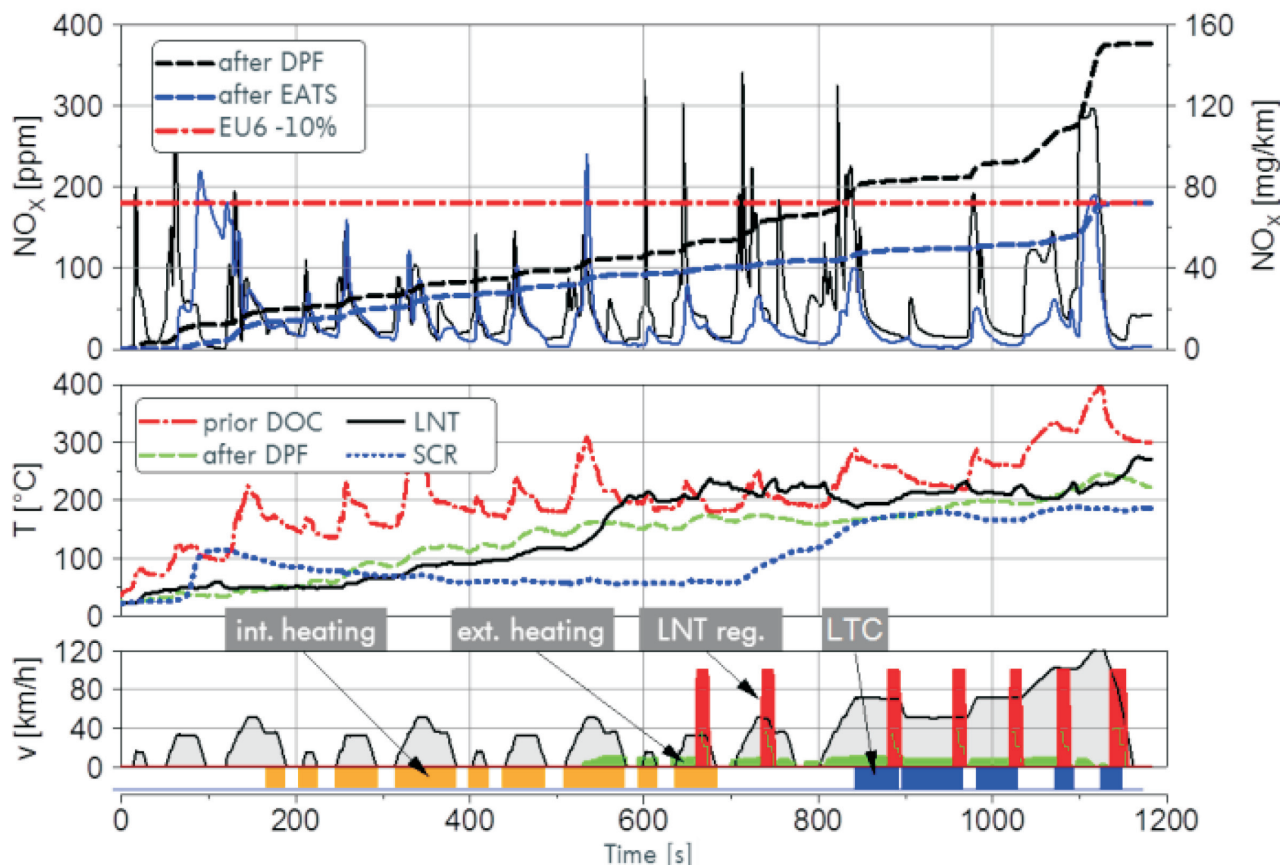
Fig. 23. NEDC with main CO<sub>2</sub>-penalty contributorsRys. 23. Test NEDC i główne czynniki wpływające na wzrost emisji CO<sub>2</sub>

Fig. 23 shows a NEDC test, which can be used as a sample to demonstrate the different phases and activities performed by engine, gas system and EATS. It is a combination of finding the best compromise of several measures, which are creating additional CO<sub>2</sub>, but are necessary to control the emission level. A CO<sub>2</sub> penalty is inevitable.

The example of an NEDC describes the different contributors to the CO<sub>2</sub>-penalty. The given example is the first calibration which leads to the accomplishment of the NO<sub>x</sub>-target of 72 mg/km. At the bottom of the figure the different measures to run the EATS are shown.

The first applied measure (marked in orange) is the internal heating. As soon as the oxidation catalyst reaches a certain temperature (ca. 200 °C) the engine changes the combustion to create higher exhaust gas temperatures. This combustion mode creates higher HC emissions, which will only be converted by the catalyst at temperatures above 200 °C. HC emissions and the cold catalyst avoid an earlier starting of the heating mode. This engine mode is less efficient and leads to a CO<sub>2</sub>-penalty.

The second measure is the external heating (green marking). To use the exothermic reaction of the LNT in the advanced EATS the reformat gas is dosed in upstream LNT. This can be done when the LNT reaches around 120 °C. The effect can be seen in Fig. 18 (time = 550 s), when the

## 5. Wyniki badań

Celem projektu Powerful było spełnienie przez pojazd norm emisji CO<sub>2</sub> i emisji związków toksycznych w teście NEDC, zarówno w części miejskiej jak i pozamiejskiej. Rysunek 23 przedstawia test NEDC, który może być użyty jako przykład do zademonstrowania różnych faz aktywności silnika, systemu zasilania i EATS. Jest to kombinacja kompromisowych nastaw układów dokonanych po kilku pomiarach, która skutkuje emisją dodatkowej ilości CO<sub>2</sub>, ale jest ona niezbędna do kontroli poziomu emisyjności.

Przykładowy przebieg testu NEDC wskazuje na główne czynniki powodujące wzrost emisji CO<sub>2</sub>. Podany przykład jest związany z pierwszą kalibracją umożliwiającą uzyskanie emisji NO<sub>x</sub> na poziomie 72 mg/km. W środkowej części rysunku przedstawiono wyniki pomiarów temperatury w poszczególnych składowych EATS.

Pierwszym zastosowanym środkiem jest wewnętrzne ogrzewanie. Po przekroczeniu przez reaktor utleniający założonej temperatury (ok. 200 °C) silnik tak steruje procesem spalania, by zwiększyć temperaturę spalin. Taki tryb spalania powoduje wzrost emisji HC, które mogą zostać konwertowane wyłącznie w reaktorze pracującym przy temperaturze ponad 200 °C. Emisja HC oraz chłodny reaktor katalityczny blokują włączenie trybu wewnętrznego podgrzewania. Ten tryb powoduje zmniejszenie sprawności silnika, co w kon-



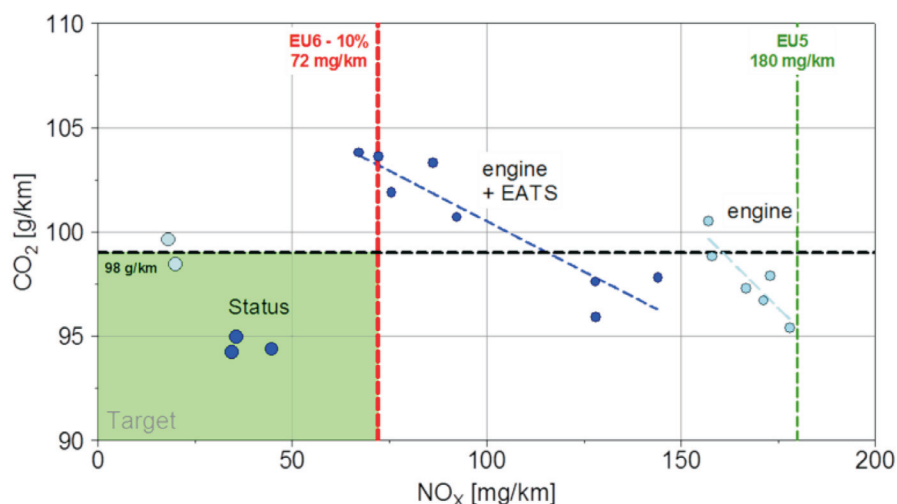


Fig. 24. Improvements of NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-levels during vehicle testing (NEDC)

Rys. 24. Obniżenie poziomów emisji NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> w fazie testów pojazdu (NEDC)

temperature (black graph) in the LNT (“NSK” in diagram) rises rapidly after starting the external heating. The reformat gas contents CO, which leads to a CO<sub>2</sub>-penalty.

While the internal heating can be stopped, the third measure starts. Starting at 200 °C the LNT stores NO<sub>x</sub> and needs regular regeneration. Depending on the cycle the regeneration of the LNT is activated and will be repeated regularly. This is done by dosing bigger amounts of the reformat gas to create rich condition ( $\lambda < 1$ ) in the catalyst. The use of the gas leads to a further CO<sub>2</sub>-penalty (red marking).

Finally the use of LTC, which is helpful to keep the NO<sub>x</sub> raw emissions low, adds another CO<sub>2</sub>-penalty caused by the increased fuel consumption of this combustion process (blue marking).

Figure 24 shows the steps made during the period of vehicle testing in terms of NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> in NEDC-tests.

The first step has been made with vehicle #1 with a basic Oxi-cat and DPF system and without the dedicated Powerful-EATS. The engine was calibrated to EU5 emission levels as an accepted base level for SCR-systems. This configuration was instantly in the targeted CO<sub>2</sub>-window below 98 g/km, the best test result showed 95 g CO<sub>2</sub>/km.

The same engine in vehicle #2 (validator) in combination with the Powerful EATS delivered a NO<sub>x</sub>-reduction. Different adjustments and calibrations of the EATS created a range of results showing the trade-off between CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. Only one parameter was achieving the target, CO<sub>2</sub> or NO<sub>x</sub>, but not both at the same time.

These tests were fundamental for the calibration of EATS and the engine. An updated EATS hardware with a new LNT improved the NO<sub>x</sub>-conversion. This improvement is based on a better coating of the catalyst and on the circumstance, that the catalysts were fresh without significant aging effects. This update produced test results, which accomplished both, the CO<sub>2</sub> target of below 100 g/km and the NO<sub>x</sub> target of 72 mg/km.

The last step was made by a final calibration towards higher efficiency (less fuel efficiency penalty) by using the

sekwencji prowadzi do wzrostu emisji CO<sub>2</sub>.

Kolejnym elementem jest zewnętrzne ogrzewanie. Aby przeprowadzić egzotermiczną reakcję w zaawansowanym systemie EATS zreformowany gaz doprowadza się do górnej części LNT. Można tego dokonać, gdy LNT osiągnie temperaturę ok. 120 °C. Wyniki pomiarów temperatury zostały przedstawione na rysunku 18 (t = 550 s). Temperatura w LNT gwałtownie wzrasta po włączeniu zewnętrznego ogrzewania. Zreformowany gaz zawiera CO, przez co wzrasta emisja CO<sub>2</sub>.

W chwili wyłączenia wewnętrznego ogrzewania, aktywowany jest trzeci układ. LNT jest włączany przy 200 °C, magazynuje NO<sub>x</sub> i wymaga regularnej regeneracji. Regeneracja jest przeprowadzana w zależności od cyklu pracy i regularnie powtarzana. Następuje ona przez podanie dużej objętości zreformowanego gazu, co ma na celu stworzenie odpowiednich warunków w reaktorze katalitycznym. Użycie gazu powoduje dalsze zwiększenie emisji CO<sub>2</sub>.

Spalanie niskotemperaturowe, korzystne z punktu widzenia emisji NO<sub>x</sub>, powoduje kolejny wzrost emisji CO<sub>2</sub> związany ze zwiększeniem zużycia paliwa.

Rysunek 24 pokazuje postępy poczynione w trakcie prowadzenia badań testowych pojazdu w odniesieniu do emisji NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> w teście NEDC.

Pierwszy etap ukończono w oparciu o pojazd #1 wyposażony w typowy utleniający reaktor katalityczny i system DPF, bez układu EATS wykonanego w ramach projektu Powerful, charakteryzował się obniżoną emisją NO<sub>x</sub>. Zróżnicowane konfiguracje nastaw układu EATS stworzyły pakiet wyników ułatwiających znalezienie rozwiązania kompromisowego względem emisji CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Możliwe było spełnienie założeń maksymalnej emisji jednego z wymienionych składników, nie było natomiast możliwe jednoczesne spełnienie założeń maksymalnej emisji obydwu składników.

Pojazd #2 (weryfikator) posiadający tę samą jednostkę napędową w połączeniu z EATS wykonanym w projekcie Powerful, charakteryzował się obniżoną emisją NO<sub>x</sub>. Zróżnicowane konfiguracje nastaw układu EATS stworzyły pakiet wyników ułatwiających znalezienie rozwiązania kompromisowego względem emisji CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Możliwe było spełnienie założeń maksymalnej emisji jednego z wymienionych składników, nie było natomiast możliwe jednoczesne spełnienie założeń maksymalnej emisji obydwu składników.

Testy te posłużyły za bazę do kalibracji układu EATS i silnika. Zmodyfikowany układ oczyszczania spalin wyposażony w nowy system LNT charakteryzował się usprawnioną konwersją NO<sub>x</sub>. Poprawa ta była zasługą zastosowania nowych powłok reaktora katalitycznego, dzięki czemu jego działanie było równe działaniu nowego reaktora. Konse-

given margin between the achieved NO<sub>x</sub> values and the target. Considering a drop of catalyst performance by aging effects some NO<sub>x</sub> conversion efficiency has been sacrificed to reduce the CO<sub>2</sub> values. This has been done for example by reducing heating measures. The final calibration is safely on the target.

The results of NEDC testing are shown in Table 4. The targets have been accomplished simultaneously even with the increased inertia class of 3500 lbs.

Beside the NEDC also WLTC cycles have been investigated. It addresses situations of the real world driving by

kwencją było jednoczesne spełnienie założeń maksymalnych emisji na poziomie 100 g CO<sub>2</sub>/km oraz 72 mg NO<sub>x</sub>/km.

Ostatnim etapem była końcowa kalibracja ukierunkowana na wzrost sprawności (obniżenie zużycia paliwa), której przeprowadzenie było możliwe dzięki różnicy między osiągniętymi i założonymi poziomami emisji. Mając na uwadze spadek sprawności reaktora związany z efektem starzenia, obniżono emisję CO<sub>2</sub> kosztem efektywności redukcji NO<sub>x</sub>. Dokonano tego m. in. poprzez ograniczenie podgrzewania. Nastawy końcowe uplasowały rezultaty prac w założonych granicach.

Tab. 4. Project targets and results for CO<sub>2</sub> and emissions (EU6 minus 10%) in NEDC

Tab. 4. Założenia do projektu i osiągnięte wartości emisji dla CO<sub>2</sub> oraz pozostałych składników (Euro 6 minus 10%) w teście NEDC

Parameter/parametr	Target value/wartość docelowa	Reached value/wartość uzyskana	Accomplished?!/realizacja?	Unit/jednostka
CO <sub>2</sub>	98	94.4	Yes	g/km
NO <sub>x</sub>	0.072	0.045	Yes	g/km
CO	0.45	0.082	Yes	g/km
HC + NO <sub>x</sub>	0.153	0.100	Yes	g/km
PM	0.0045	0	Yes	g/km

including higher loads and speeds and is characterised by an increased dynamic compared to NEDC.

The experience made with NEDC and WLTC tests is an increase of CO<sub>2</sub> by 5%. It is increasing in WLTC due to the higher dynamic and maximum loads. The longer duration of the cycle creates a higher ratio of warm conditions and therefore reduces HC and CO emissions. At the same time the increase of average temperature in combination with the higher loads and the increased transience lead to higher raw and tailpipe NO<sub>x</sub>-emissions.

Wyniki testów wg procedury NEDC przedstawiono w tabeli 4. Założenia zostały spełnione jednocześnie, nawet dla klasy bezwładności zwiększonej do 3500 lbs.

Testy przeprowadzono nie tylko wg procedury NEDC, ale również WLTC. Odnosi się ona do sytuacji w rzeczywistych warunkach, również z większymi obciążeniami i prędkościami. W porównaniu do NEDC, charakteryzuje się większą dynamiką jazdy.

Z przeprowadzonych badań wynika, że emisja CO<sub>2</sub> w teście WLTC jest większa o 5% niż w teście NEDC.

Tab. 5. Results for CO<sub>2</sub> and emissions (EU6 minus 10%) in WLTC in comparison to NEDC

Tab. 5. Wartości emisji CO<sub>2</sub> i pozostałych związków z testów wg procedury WLTC w odniesieniu do procedury NEDC

Parameter/parametr	Reference Value from NEDC/wartość referencyjna w teście NEDC	Reached Value/uzyskana wartość Test 1	Reached Value/uzyskana wartość Test 2	Unit/jednostka
CO <sub>2</sub>	94.4	100.1	99.6	g/km
NO <sub>x</sub>	0.045	0.063	0.053	g/km
CO	0.082	0.019	0.007	g/km
HC + NO <sub>x</sub>	0.100	0.089	0.070	g/km

## 6. Summary

The undertaken efforts regarding engine development set up of the vehicles and calibration of engine and EATS have contributed to a successful end of the "Powerful" project by safely accomplishing the given CO<sub>2</sub> and emission targets. The link of all technical measures and their intelligent use lead to an overall CO<sub>2</sub> reduction of about 15 g/km. With this research engine the potential of several technical measures like improved turbo chargers, injection components and friction reduction (PCM) has been demonstrated. At the same time the task has been mastered to use the best possible combination of measures to create a sufficient overall NO<sub>x</sub>-conversion with a minimised CO<sub>2</sub> penalty.

Wynika to z większej dynamiki jazdy, a zatem i większego obciążenia. Dłuższy czas trwania testu zwiększa udział pracy w ustalonym stanie termicznym, a tym samym powoduje obniżenie emisji HC i CO. Jednocześnie wzrost średniej temperatury w połączeniu z większymi i bardziej zmiennymi obciążeniami skutkowało zwiększeniem emisji NO<sub>x</sub> zarówno z silnika, jak i układu wylotowego pojazdu.

## 6. Podsumowanie

Podejmowane działania w zakresie rozwoju silnika, skonfigurowanie go z pojazdem oraz dalsza kalibracja z systemem oczyszczania spalin przyczyniły się do pomyślnego zakończenia projektu "Powerful" przez osiągnięcie zakładanego poziomu emisji CO<sub>2</sub> oraz pozostałych celów emisyjnych. Powiązanie wszystkich środków technicznych

The downsizing concept demonstrates its potential to reduce fuel consumption and CO<sub>2</sub>-emission, while the increased NO<sub>x</sub> emission, which is a consequence of the increased specific engine load, remains a challenge for systems without active SCR.

Generally the Diesel engine still has potential of a further improvement of fuel efficiency and emissions. It is still worth spending efforts in internal combustion engines to contribute to an environment friendly automotive future.

### Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the European Union 7th Framework Program [FP7/2007-2011] under grant agreement No. 234032. The authors are grateful to the funding of EU in the “Powerful” research project and all persons, who know to have their contribution in this study in author’s R&D laboratories.

i ich inteligentne wykorzystanie prowadzi do ogólnego zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> o 15 g/km. Dzięki wykorzystaniu potencjału szeregu środków technicznych w silniku badawczym, przedstawiono takie działania jak ulepszenie turbodoładowania, wykorzystanie nowych wtryskiwaczy i zmniejszenie tarcia. Jednocześnie możliwe było przez wykorzystanie najlepszej kombinacji środków technicznych, aby dokonać wystarczającej konwersji całkowitej NO<sub>x</sub> ze zminimalizowaniem emisji CO<sub>2</sub>.

Koncepcja downsizingu pokazuje potencjał do zmniejszenia zużycia paliwa i emisji CO<sub>2</sub>, podczas gdy zwiększa się emisja NO<sub>x</sub>, co jest konsekwencją zwiększonego obciążenia silnika. Zwiększona emisja NO<sub>x</sub> pozostaje dużym wyzwaniem technicznym dla systemów bez aktywnego SCR.

Ogólnie silnik o zapłonie samoczynnym ma nadal potencjał dalszego rozwoju pod kątem możliwości zmniejszenia zużycia paliwa i redukcji emisji spalin. Nadal więc jest warto poświęcić wysiłki w pracach badawczych nad silnikami spalinowymi, które przyczynią się do poprawy oddziaływania na środowiska i wpłyną na przyszłość motoryzacji.

### Bibliography/Bibliografia

1. Käppner C., Henn M., Löscheter H.T., Drückhammer J., Appelt C., Hampe J.: Exhaust Energy Recovery by PCM Heat Storage; Aachener Kolloquium 2012.

Michael Weißner, Dipl.-Ing. – Volkswagen AG, Group Research Powertrain (Germany).

e-mail: [michael.weissner@volkswagen.de](mailto:michael.weissner@volkswagen.de)



Karsten Wrede, Dipl.-Ing.(FH) – Volkswagen AG, Group Research (Germany).

e-mail: [karsten.wrede@volkswagen.de](mailto:karsten.wrede@volkswagen.de)



Sebastian Watzl, Dipl.-Ing.(FH) – Volkswagen AG, Group Research (Germany).

e-mail: [sebastian.watzl@volkswagen.de](mailto:sebastian.watzl@volkswagen.de)



Tobias Menzel, Dipl.-Ing.(FH), Volkswagen AG, Group Research (Germany).

e-mail: [tobias.menzel@volkswagen.de](mailto:tobias.menzel@volkswagen.de)



### Abbreviations/Oznaczenia i skróty

HCs	Hydrocarbons/węglowodory
LNT	Lean NO <sub>x</sub> Trap/układ wychwytyjący NO <sub>x</sub>
SCR	Selective Catalytic Reduction/selektywna redukcja katalityczna
EATS	Exhaust Gas Aftertreatment System/system oczyszczania spalin
LTC	Low Temperature Combustion/spalanie niskotemperaturowe
NEDC	New European Driving Cycle/europejski cykl jezdny
PEMS	Portable Emission Measurement System/mobilny system pomiaru emisji spalin
PCM	Phase Changing Material/materiał zmiennofazowy
EGR	Exhaust Gas Recirculation/system recyrkulacji spalin

Christian B. Klütting, Dipl.-Wirt.-Ing. – Volkswagen AG, Group Research (Germany).

e-mail: [christian.kluetting@volkswagen.de](mailto:christian.kluetting@volkswagen.de)



Martin Schüttenhelm, Dipl.-Ing., Volkswagen AG, Group Research (Germany).

e-mail: [martin.schuettenhelm@volkswagen.de](mailto:martin.schuettenhelm@volkswagen.de)



Michael Frambourg, Dipl.-Ing. – Volkswagen AG, Group Research (Germany).

e-mail: [michael.frambourg@volkswagen.de](mailto:michael.frambourg@volkswagen.de)

