

## Experiences with partial-flow filters to reduce the solid particle emissions from diesel engines

Four of these Particulate Reduction Systems (PMS) were tested on a passenger car and one of them on a HDV. Expectation of the research team was that they would reach at least a PM-reduction of 30% under all realistic operating conditions. The standard German filter test procedure for PMS was performed but moreover, the response to various operating conditions was tested including worst case situations. Besides the legislated CO, NO<sub>x</sub> and PM exhaust-gas emissions, also the particle count and NO<sub>2</sub> were measured. The best filtration efficiency with one PMS was indeed 63%. However, under critical but realistic conditions filtration of 3 of 4 PMS was measured substantially lower than the expected 30%, depending on operating conditions and prior history, and could even completely fail. Scatter between repeated cycles was very large and results were not reproducible. Even worse, with all 4 PMS deposited soot, stored in these systems during light load operation was intermittently blown-off. Due to these stochastic phenomena the behaviour of these systems is hardly predictable. Furthermore the provision of NO<sub>2</sub>, through catalysis ahead of the filter or in the filter matrix, is inherent in these systems. Some of this secondary NO<sub>2</sub> is emitted. Cost/benefit ratio is high compared to full-flow filters and Diesel engines equipped with partial-flow filters are inferior to SI engines regarding global warming potential. Based on these findings it is concluded that the sustainable performance of partial-flow filters is not yet determined.

Key words: diesel particle filtration, filtration efficiency, nanoparticles, filtration materials, open filters

## Badania filtrów o częściowym przepływie spalin w zakresie redukcji cząstek stałych z silników o ZS

W artykule przedstawiono wyniki badań czterech systemów redukcji cząstek stałych (PMS – Particulate Reduction Systems) zamontowanych w samochodzie osobowym i ciężarowym. Oczekiwanym efektem badań była 30-procentowa redukcja emisji cząstek stałych w rzeczywistych warunkach ruchu. Badania przeprowadzono według niemieckiej procedury badawczej rozszerzonej o badania filtrów w zmiennych warunkach pracy silników. Wykonano pomiary limitowanych normą związków toksycznych (CO, NO<sub>x</sub>, PM), a także Nielimitowanych – NO<sub>2</sub> oraz liczby cząstek stałych. Największa zmierzona sprawność filtracji wynosiła 63%. Jednakże w rzeczywistych warunkach ruchu sprawność filtracji dla trzech, z czterech przebadanych, filtrów wynosiła znacznie mniej niż zakładane 30% i jednocześnie zależała od warunków użytkowania pojazdu. Różnice wyników między poszczególnymi pomiarami były znaczne i nie były reprezentatywne. Wszystkie badane konfiguracje systemów redukcji emisji cząstek stałych pozwalały na efektywną filtrację cząstek stałych na obciążeniach częściowych. Ponadto zmiany w stężeniu NO<sub>2</sub> przed filtrem w stosunku do stężenia za filtrem są zgodne z przewidywaniami – występuje niewielka wtórna emisja tego związku za filtrem. Wskaźnik kosztów zastosowania filtra do korzyści ekologicznych jest wyższy dla filtrów o pełnym przepływie spalin w stosunku do filtrów o częściowym przepływie spalin, a jednocześnie większy jest również potencjał globalnego ocieplenia. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono konieczność dalszych badań w zakresie polepszenia właściwości filtrów o częściowym przepływie spalin.

Słowa kluczowe: filtr cząstek stałych, efektywność filtrowania, nanocząstki, materiał filtracyjny

### 1. Introduction

Full-flow filters (FFF) have become a standard. Wall flow honeycomb filter media, used in this concept are reaching filtration efficiencies exceeding 99.9% [1]. These are fitted ex-factory to European passenger cars and USA trucks [2, 3]. Retrofitting onroad heavy-duty (HD) vehicles and offroad construction machines is also very successful [4]. Retrofit filter systems with active regeneration, a prerequisite for dependable operation, are however still rather complex, bulky and costly and therefore prohibitive for retrofitting in-use passenger cars. Nevertheless to diminish emissions, in countries with a high Diesel car population, environmental policy requires simpler and less costly retrofit systems. These shall enable at least 30% curtailment of the particle mass (PM) emission, and correspondingly

### 1. Wprowadzenie

Obecnie standardem są filtry o pełnym przepływie spalin (FFF – Full-flow filters). Ścianki filtra wykonane w postaci plastra miodu powodują filtrację cząstek stałych ze sprawnością ponad 99,9% [1]. Są one przeznaczone do europejskich samochodów osobowych i amerykańskich pojazdów ciężarowych [2, 3]. Wymagane jest też wyposażenie w filtry cząstek stałych pojazdów HDV oraz maszyn pozadrogowych [4]. Filtry z aktywną regeneracją wymagają określonych warunków pracy, a jednocześnie zwiększony ich koszt wytwarzania i rodzaj zabudowy w pojeździe stanowią przeszkodę stosowania ich w samochodach osobowych. Jednakże w krajach o znacznym udziale silników o ZS ochrona środowiska wymusza stosowanie prostszych i tańszych systemów redukcji emisji cząstek stałych. Systemy

benefit air quality in the Low Emission Zones. The German [5] specification, which the Netherlands and other countries have adopted, is based on a weighted average PM emission reduction measured over 3 New European Driving Cycles (NEDC) in the new state, after 2000 km, and after 4000 km operation.

This paper describes the investigation of 4 commercially available partial-flow filters. These were tested according to the German NEDC based criteria. Moreover, since the NEDC is regarded as not reflecting real world city driving conditions [6], tests were performed in various other driving cycles and at other realistic operating conditions. In addition to PM, the investigation also measured the emission of solid nano-particles in the size range 10–400 nm, and of the systems inherent NO<sub>2</sub> emissions.

## 2. Basic properties of full-flow (FFF) and partial flow filters (PFF)

The filtration response of the full-flow [7, 11, 21] filter and the partial-flow filter [8–10] is very extensively published. Fig. 1 shows schematically the basic concept of the full-flow filter and the partial-flow filter.

Whereas in FFF [11] all exhaust gas has to pass through the fine porous walls of the filter, in the PFF [10] some flow is allowed to pass unfiltered. The ratio of the two flows PFF/FFF may be designed to be 0.5, when clean but will vary with soot deposition and may reach very low values when the filter wall gets plugged, resulting in corresponding low overall filtration.

Figure 2 shows some of the basic characteristics of the FFF and PFF concepts. Figure 2a shows the characteristics of the FFF, with this design filtration is improved with soot loading, approaching nearly 100% after a few minutes of operation. Back-pressure also increases thus continuous or discontinuous regeneration is required. Figure 2b shows

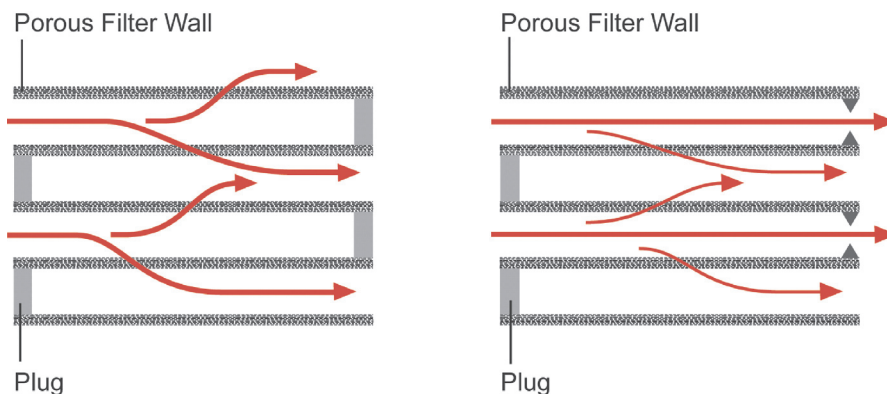


Fig. 1. Schematic of full-flow Filters FFF (left) and partial flow filters PFF (right)

Rys. 1. Schemat filtrów o pełnym (lewy) i częściowym przepływie spalin (prawy)

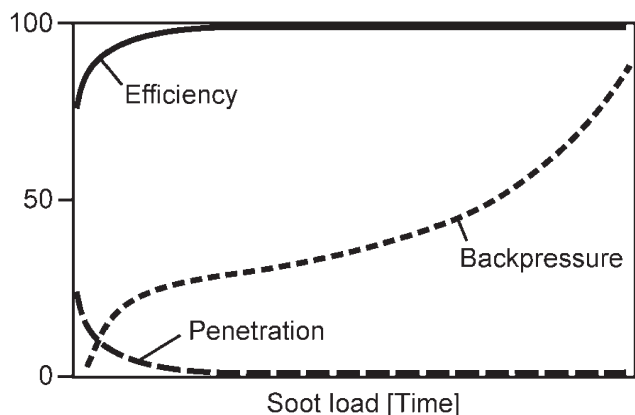


Fig. 2a. Basic properties of full-flow filters (FFF)

Rys. 2a. Właściwości filtra o pełnym przepływie

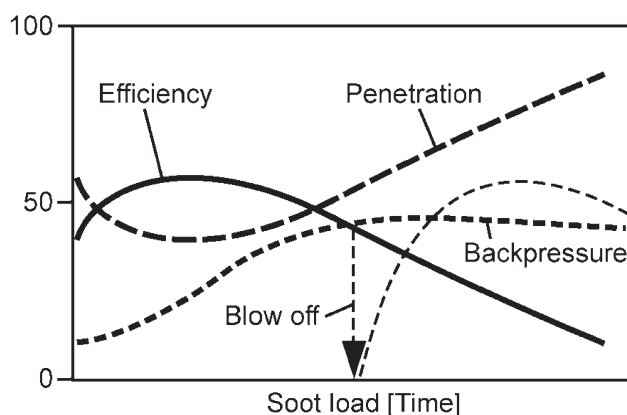


Fig. 2b. Basic properties of partial flow filters (PFF)

Rys. 2b. Właściwości filtra o częściowym przepływie

the characteristics of the PFF; these are clearly different. In the PFF design filtration efficiency decreases with soot loading and sudden blow off can happen where all stored material is lost. Backpressure however remains low.

With the FFF backpressure increases when soot loading and can become plugged if not regenerated properly while backpressure with PFF levels out with decreasing filtration efficiency. The PFF can clean itself by releasing stored soot to avoid plugging – which is undesirable from an environmental point of view.

The well-established full-flow filters, of the wall through-flow type, have porous cell walls, through which the exhaust gas passes at very low velocities (a few cm/s). Thus diffusion effects occur in the very small pores (about 10  $\mu\text{m}$ ). Such filters attain filtration efficiencies above 99.9% for all particle sizes prevalent in the exhaust-gas. The large surface area of these filters facilitates catalyst coating. The filtration efficiency of full-flow filters usually increases from 70–80%, in the new state, to the maximum value within minutes of engine operation. The maximum filtration rate is sustained during the filter life. The regeneration process periodically combusts the deposited soot particles. The full-flow filter also dependably intercepts incombustible ash particles from engine wear and combustion of lubricating oil. The backpressure initially increases rapidly, due to particle deposition in the filter walls; the back-pressure then increases linearly during soot-cake build up and finally rises rapidly if the filter becomes fully loaded. The consequent high back-pressure is not permissible. Hence, the filter must be regenerated before the back-pressure exceeds about 200 mbar (approx. every 1,000 km). Subsequently, after 2–3,000 operating hours the filter must be cleaned of ash. The filter is then fully reusable.

Prerequisites for effective regeneration are monitoring the back-pressure and initiating the regeneration through raising the temperature until ignition of the deposited soot is triggered. Engine management (delayed fuel injection, diminishing air through-flow) can raise the exhaust temperature. Other possibilities are heating after the engine, e.g. burner, catalytic combustion or electrical heating. These methods are expensive and relatively complex but they are required unless the exhaust temperature is high enough to guarantee continuous regeneration supported by catalysis [11, 35].

Partial-flow filters are essentially open cell systems, whose walls, too, are porous materials. Part of the inlet gas exits the system directly, without surrendering particles. The main channel flow has a very high velocity. The partial-flow through the filter walls is at a reduced flow rate, so that filtration can occur within the porous walls and on their surfaces. Here, too, soot deposition occurs that supports the filtration of ultrafine particles. The soot deposition in the filter medium however inevitably shifts the ratio of partial-flow to full-flow, i.e. more gas exits unfiltered. Thus the filtration efficiency decreases. The claimed advantage is that such a construction tends not to clog. Increasing soot deposits on the walls narrows the channels thereby raising the flow forces, until the deposited soot is blown off in a short but intensive

czynnik przepływu spalin dla filtra o częściowym przepływie do filtra o pełnym przepływie wynosi około 0,5, gdy filtr jest czysty, natomiast dla częściowo zatkanego filtra wartość ta może być bardzo mała, co wiąże się z bardzo małą skutecznością filtrowania.

Na rysunku 2 scharakteryzowano podstawowe właściwości filtrów o pełnym i częściowym przepływie spalin. Rysunek 2a dotyczy filtra o pełnym przepływie spalin – skuteczność filtrowania wynosi 100% po kilku minutach pracy filtra. Jednocześnie wzrost przeciwcisnienia wymusza ciągłą lub częściową regenerację filtra. Filtry o częściowym przepływie spalin (rys. 2b) różnią się charakterystyką od poprzednich. Sprawność filtracji zmniejsza się w miarę wzrostu masy cząstek w filtrze, a jednocześnie przy nagłym otwarciu filtra może nastąpić emisja znacznych ilości cząstek stałych. Przeciwcisnienie dla takiego rodzaju filtra jest niższe niż w przypadku filtra o pełnym przepływie spalin.

Dla filtrów o pełnym przepływie spalin wzrasta przeciwcisnienie w miarę załadowania filtra i przy braku regeneracji może to doprowadzić do zmniejszenia skuteczności filtrowania i zatkania filtra. W filtrach o częściowym przepływie spalin przeciwcisnienie może być regulowane przez otwarcie filtra, co jest zjawiskiem niepożądanym z punktu widzenia ochrony środowiska.

Spaliny przepływają z szybkością kilku cm/s przez porowate ścianki filtra o średnicy około 10  $\mu\text{m}$ , co skutkuje sprawnością filtracji 99,9% (łącznie dla wszystkich wielkości cząstek). Sprawność filtracji dla nowych filtrów pełnoprzepływowych wynosi do 70–80% po kilku minutach od rozruchu silnika. Maksymalny stopień filtracji jest utrzymywany podczas całego okresu eksploatacji przez stosowanie okresowej regeneracji filtra. Filtry o pełnym przepływie spalin zatrzymują cząstki stałe pochodzące ze spalania oleju napędowego i smarującego. Początkowy szybki wzrost przeciwcisnienia spowodowany jest zataniem ścianek filtra, następnie występuje okres liniowego powolnego wzrostu przeciwcisnienia, aż do chwili utworzenia dużych aglomeratów cząstek i nagłego wzrostu przeciwcisnienia. Dla wartości przeciwcisnienia około 200 mbar następuje regeneracja spalin (przeważnie po przebiegu 1000 km). Następnie co 2–3 tys. godzin użytkowania filtra powinien być on czyszczony ze związków popiołu – po takim zabiegu filtr jest w pełni użyteczny do wielokrotnego zastosowania.

Warunkiem wstępnym wywołania regeneracji filtra cząstek stałych jest odpowiednia wartość przeciwcisnienia w filtrze. Regeneracja powodująca samozapłon sadzy jest inicjowana przez wzrost temperatury gazów spalinowych, wywołany m.in. opóźnionym wtryskiem paliwa lub zmniejszeniem strumienia powietrza. Innymi sposobami jest podgrzewanie filtra z wykorzystaniem palnika płomieniowego, utlenianie katalityczne lub ogrzewanie elektryczne. Sposoby te są jednak dość drogie i złożone, ale są stosowane w przypadkach niskiej temperatury spalin niepowodującej regeneracji filtra [11, 35].

Filtry o częściowym przepływie spalin są systemami o otwartych celach filtracyjnych, których ściany wykonane są również z materiałów porowatych. Część spalin przepływa



smoke puff. That process then reiterates – an effect which is well known and described as store-and-release [12]. Any actual curtailment of particle emissions only occurs when the intercepted soot is converted to CO or CO<sub>2</sub>. The temperature in a passenger car exhaust is too low for oxygen to react with the soot. The only possibility is to utilize NO<sub>2</sub> for regeneration, a process, which may start at temperatures as low as 230°C if sufficient NO<sub>x</sub> is available. Hence, a very effective oxidation catalytic converter, coated with platinum, must be mounted ahead of the filter. This oxidation catalyst converts part of the engine NO into NO<sub>2</sub>. NO<sub>2</sub> will be decomposed again and will release an oxygen atom, which can combust soot above 230°C. This is a slow process and therefore only oxidizes deposited soot. The stoichiometric mass ratio of for this process is at NO<sub>2</sub>/C = 7.6 if CO<sub>2</sub> shall be formed. Experience indicates a 2–3 times higher NO<sub>2</sub> production is necessary, since not all NO<sub>2</sub> can react with soot [35]. The four critical parameters of partial-flow filters therefore are: filtration response, NO<sub>2</sub> availability, adequate temperature and storage capacity.

### 3. On-road test

The German test procedure was performed as per Annex 26 [5] of the German traffic certification directive. The filtration performance is assessed during the NEDC test in the as new state, then after 2000 km of light load city operation and then again after further a 2,000 km. Depending on the emission level of the vehicle, the distance can be extended to 2,500 km. The mileage accumulation can be performed on the road, or on the chassis dynamometer. The average speed is between 25 and 35 km/h but never exceeding 70 km/h. The idling time is > 7% of operating time. The duration between 50 and 70 km/h is < 10% of operating time. The highest exhaust temperature is < 300°C. The measurements on the chassis dynamometer are done after conditioning (2–3 times, Part 2 of the NEDC). A weighted average, which overweights the results after the city driving period, decides the approval. This value must be more than 30% filtration efficiency. After the actual test, a so-called worst-case test is performed at engine full load: as soon as exhaust temperature reaches values above 550°C an oxygen regeneration is initiated. This fast regeneration with high heat release is used to verify the thermo-mechanical dependability of the system. The test is supplemented with a smoke measurement during free acceleration.

This standard test was performed on two of the systems, here designated system A and system C, i.e. an actual partial-flow filter and a foam deep filter. Fig. 3 shows the results. In the figure C denotes the conditioning phase (3 times NEDC without measurement), T denotes the emissions testing phase (NEDC) and WC” denotes the worst case test. How the system behaves in between the test points T is not known.

The baseline is the filtration efficiency in the as new state, which complies with the limits. Compared to the baseline, the filtration decreases substantially for both systems after the first city driving period. This deterioration continues in the second stage but is mostly corrected through regeneration during the so-called worst case test (WC). The weighted

bezpośrednio przez filtr bez filtrowania ich z cząstek stałych. Główny strumień przepływu ma znaczną prędkość, natomiast tylko część spalin przepływa przez porowate ścianki, filtrując je z drobnych cząstek stałych. Częściowy przepływ spalin przez filtr powoduje niepełną filtrację, a jednocześnie zmniejsza sprawność filtracji, która jest mniejsza niż dla filtrów o pełnym przepływie spalin. Korzyścią natomiast jest niezatykanie się filtra. Osadzanie sadzy na ściankach filtra powoduje jednak zwężanie się kanałów i niepożądaną właściwość wydmuchiwanie sadzy przy dużych natężeniach przepływu spalin przez filtr. Proces ten jest znany pod nazwą *store-and-release* i opisany w literaturze [12]. Zmniejszanie emisji cząstek stałych następuje jedynie podczas utleniania sadzy (węgla) do CO lub CO<sub>2</sub>. Temperatura spalin samochodów osobowych jest zbyt niska, aby utlenić cząstki sadzy. Jedyną możliwością jest zwiększenie stężenia NO<sub>2</sub>, tak aby częściowa regeneracja filtra mogła rozpocząć się już w temperaturze 230°C. Jest to możliwe dzięki zamontowaniu reaktora utleniającego z nałożoną warstwą platyny przed filtrem cząstek stałych. Reaktor katalityczny utlenia NO do NO<sub>2</sub>, który następnie rozpada się, uwalniając atom tlenu potrzebny do utleniania sadzy. Jest to proces powolny i powoduje utlenianie jedynie zgromadzonej w filtrze sadzy. Jeżeli produktem reakcji ma być CO<sub>2</sub>, to stosunek stechiometryczny reagentów tego procesu wynosi NO<sub>2</sub>/C = 7,6. Badania doświadczalne wskazują, że wymagana jest 2–3-krotnie większa ilość NO<sub>2</sub>, gdyż niecały dwutlenek azotu może reagować z sadzą [35]. Sprawność filtrów o częściowym przepływie spalin jest uwarunkowana następującymi czynnikami: możliwością filtracji, stężeniem NO<sub>2</sub>, odpowiednią temperaturą oraz pojemnością.

### 3. Testy drogowe

Niemiecką procedurę badawczą zastosowano na podstawie Aneksu 26 [5] niemieckiej dyrektywy transportowej. Właściwości filtracyjne filtrów oceniono podczas testu NEDC dla nowego filtra, następnie po przebiegu 2000 km i po kolejnych 2000 km. W zależności od poziomu emisji spalin, ostatni dystans może być wydłużony do 2500 km. Dystans 2000 km może być pokonany podczas normalnej eksploatacji lub na hamowni podwoziowej. Średnia prędkość wynosi 25–35 km/h, ale nie przekracza 70 km/h. Czas pracy na biegu jałowym wynosi > 7% całkowitego czasu użytkowania. Zakres prędkości między 50 a 70 km/h nie powinien przekraczać 10% czasu użytkowania. Najwyższa wartość temperatury spalin powinna wynosić poniżej 300°C. Pomiar na hamowni podwoziowej były wykonywane po kondycjonowaniu pojazdu (2–3-krotna druga część testu NEDC). Wynikiem była wartość średnia, która musiała być większa od 30%. Po każdym teście wykonano próbę pełnego obciążenia, w której temperatura spalin osiągała 550°C, inicjując regenerację filtra. Szybka regeneracja ze znacznym wywiązywaniem się ciepła była podstawą do stwierdzenia wytrzymałości termiczno-mechanicznej systemu. Test uzupełniono również o pomiar zadymienia spalin w teście swobodnego przyspieszania.

Standardowy test przeprowadzono dla dwóch systemów oznaczonych symbolami A i C, tzn. dla filtra o częściowym

average filtration efficiencies are: system A 3.1%, and system C 8.2%. Both systems do not attain the objective.

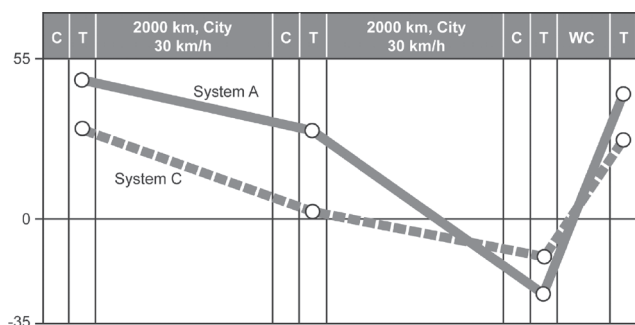


Fig. 3. Performance of system A and system C

Rys. 3. Charakterystyki systemów A i C

The soot puff, during free acceleration from idling engine speed to governed engine speed, was verified after the defined test runs. System B emitted 17% less soot than the base-line; system G emitted double the baseline value.

These tests clearly indicate the deficiency of these partial-flow filters. The filtration deteriorates, due to soot deposition, and thus the danger of soot puffs when the deposits are blown-off.

The filtration efficiency scatter indicates that conditions change from test to test. Possibly, other higher values might have been recorded, had the filter shed soot just before measurement, i.e. a stochastic phenomenon. These observations indicate that filter conditioning is unsuitable for system evaluation. During conditioning, deposits are removed. Thus the filter is restored to an more effective state than after the city driving period. Without assessing the conditioning phenomena, the results are unrealistically distorted. Hence, the results of this standard test are misleading, overestimating the real world efficacy of these devices.

In 2008 the German automobile club ADAC [13] tested 9 marketed partial-flow filters, types A and B. However, the city driving phase was only 1,500 km. The measurements before and after the city driving showed an average deterioration of the filtration efficiency from 39% to 21% with individual cases of -51%, despite conditioning before measurement. During a so-called "Autobahn-cycle" 8 of 9 filters candidates showed blow-off, emitting on average 110% PM above engine baseline, in one case 370%.

#### 4. Chassis dynamometer tests

In 2006 the Exhaust-Gas Test Center AFHB of the Swiss University of Applied Sciences, Biel investigated such devices. The tests comprised the following:  
INFLUENCE OF SOOT BURDEN AND BLOW-OFF PHENOMENA

Constant speed 35 km/h from cold start

4<sup>th</sup> gear

Exhaust temperature < 200°C

Test duration: 210 minutes

Constant speed 65 km/h from warm start

4<sup>th</sup> gear

Exhaust temperature ≈ 300°C

przepływie spalin (A) oraz dla filtra o pełnym przepływie (C). Na rysunku 3 pokazano wyniki badań: symbolem C oznaczono kondycjonowanie (3 razy test NEDC bez pomiaru), T – oznacza emisję w teście NEDC oraz WC oznacza najgorszy wynik. Wyniki badań między testami T nie są znane.

Punktem odniesienia jest sprawność filtracji elementów nowych. W porównaniu do stanu wyjściowego, sprawność filtracji znacznie zmniejsza się dla obydwu systemów już po pierwszym okresie użytkowania. Dalsze pogorszenie sprawności filtracji w drugim etapie zostało poprawione głównie dzięki procesowi regeneracji. Średnia ważona sprawności filtracji to 3,1% dla systemu A oraz 8,2% dla systemu C. Obydwa badane systemy nie osiągnęły celu (30-procentowej sprawności).

Zweryfikowano również emisję sadzy podczas swobodnego przyspieszenia od prędkości obrotowej biegu jałowego do maksymalnej prędkości obrotowej silnika. System B wyemitował 17% mniej sadzy (po testach NEDC) niż system określony jako bazowy, natomiast system G wyemitował dwa razy więcej niż system bazowy.

Niewielka wartość sprawności filtracji wskazuje zmianę warunków wykonywania testów. Prawdopodobnie mogłyby być rejestrowane większe wartości emisji PM, jednakże okresowe zjawisko wydmuchiwania cząstek z filtra o częściowym przepływie spalin nie jest w pełni kontrolowane. Spostrzeżenia te wskazują na niewłaściwe kondycjonowanie filtra przed oceną jego sprawności (usuwanie cząstek stałych podczas niemierzonego okresu kondycjonowania). W ten sposób filtr jest oczyszczony jeszcze przed pomiarem. Bez pomiarów emisji podczas kondycjonowania nie jest możliwe określenie sprawności filtrowania i uzyskane wyniki są niepełne. Tak więc istnieje potrzeba zmiany procedury badawczej filtrów cząstek stałych, w celu dokładnej oceny ich właściwości.

W roku 2008 niemiecki ADAC [13] przetestował 9 komercyjnych filtrów o częściowym przepływie spalin typu A i B. Długość cyklu badawczego wynosiła 1500 km, głównie w ruchu miejskim. Pomiary przed i po badaniach przedstawiono w postaci wartości średnich, które wskazywały na pogorszenie sprawności filtracji o 21–39% (w indywidualnych przypadkach o 51%) w stosunku do pomiarów przed testem. Podczas cyklu „autostradowego” 8 z 9 przebadanych filtrów emitują średnio 110% więcej cząstek stałych (sporadycznie aż do 370%) w stosunku do poziomu bazowego.

#### 4. Testy na hamowni podwoziowej

W roku 2006 w Exhaust-Gas Test Center AFHB na Uniwersytecie Szwajcarskim w Biel przebadano również podobne systemy oczyszczania spalin. Wyniki podano poniżej.

BADANIA WYPALANIA I WYDMUCHIWANIA SADZY

Stała prędkość 35 km/h od zimnego rozruchu

4. bieg

temperatura spalin < 200°C

czas próby 210 min

Stała prędkość 65 km/h od gorącego rozruchu

4. bieg

temperatura spalin ok. 300°C

Test duration: 210 minutes

Load variation to investigate temperature dependence

Constant speed 85 km/h in 6<sup>th</sup> gear

Wheel load incremented in 5 steps from 0–1600 N chassis dynamometer setting i.e. until full load.

#### EMISSIONS AT CONSTANT SPEED

Setting the chassis dynamometer, which simulates roll resistance on a horizontal road; driven in 5<sup>th</sup> gear. At constant speeds of 45–120 km/h

#### EMISSION FACTORS IN VARIOUS DRIVING CYCLES

The following driving cycles were tested twice on two different days:

- New European Driving Cycle NEDC, cold and warm
- Federal Test Procedure FTP75, warm
- CADC (so-called ARTEMIS cycle [6]) warm
- New York City Cycle NYCC, warm
- German Autobahn Cycle BAB, warm

This program is based on over 10 years experience in testing and certification of full-flow particle filters deployed in Switzerland. It also considers results of prior investigations [1, 14–17].

The test vehicle details are given below.

VW Passat TDI (on the chassis dynamometer):

- Manufactured in year 2005
- Vehicle type 3BG
- Engine displacement 1.9 dm<sup>3</sup> (1896 cm<sup>3</sup>)
- Power rating 96 kW at 4000 rpm
- Torque 310 N·m at 1900 rpm
- Engine type AVF
- Engine TDI 2V VTG
- Injection system Pump nozzle
- Exhaust after-treatment DOC close coupled
- Emission level Euro 3
- Gear box 6 gear manual
- Odometer at start 23,700 km

The test fuel used throughout this work was Shell Formula Diesel, compliant to EN-SN-590 with a sulfur content of less than 10 ppm. Details of the test lubricant are given below.

Lubrication oil: SAE OW/30

Sample analysis of fresh oil:

Sulfur	5000 ppm
Calcium	2847 ppm
Iron	171 ppm
Phosphorous	1078 ppm
Zinc	1243 ppm

The baseline emissions results over the different test cycles are given in Tab. 1 and the baseline emissions values at the different load settings at 85 km/h in 6<sup>th</sup> gear are given in Tab. 2.

The measurement of the emitted gaseous components and the particle mass PM is performed according to EU-legislation for passenger car emission measurement. The measurement system is shown schematically in Fig. 4. The nanoparticle analysis was done using the heated rotary diluter MD 19, the instruments CPC for the total particle

czas próby 210 min

zmiennie obciążenie w zależności od temperatury

Stała prędkość 85 km/h na 6 biegu

wzrost obciążenia w 5 krokach od 0 do 1600 N na hamowni podwoziowej do wartości maksymalnej.

#### POMIARY EMISJI PRZY STAŁEJ PRĘDKOŚCI POJAZDU

Pomiary na hamowni podwoziowej, symulowany opór po poziomej drodze, prędkość z zakresu 45–120 km/h na 5. biegu.

#### WSKAŹNIKI EMISJI DLA RÓŻNYCH TESTÓW BADAWCZYCH

Testy jezdne wykonywano dwukrotnie w kolejnych dniach:

- NEDC – New European Driving Cycle, zimny i gorący rozruch
- FTP75 – Federal Test Procedure, gorący rozruch
- CADC (zwany również ARTEMIS cycle [6]), gorący rozruch
- NYCC – New York City Cycle, gorący rozruch
- BAB – German Autobahn Cycle, rozruch gorący.

Program badań oparto na 10-letnim doświadczeniu szwajcarskim w certyfikacji i badaniach systemów o pełnym przepływie spalin. Jest on również potwierdzony wcześniejszymi badaniami [1, 14–17].

Charakterystykę techniczną badanych pojazdów podano niżej.

VW Passat TDI (badania na hamowni podwoziowej):

- rok produkcji: 2005
- typ pojazdu: 3BG
- pojemność silnika: 1,9 dm<sup>3</sup> (1896 cm<sup>3</sup>)
- moc maksymalna: 96 kW przy 4000 obr/min
- moment obrotowy: 310 N·m przy 1900 obr/min
- typ silnika: AVF
- silnik: TDI 2V VTG
- system wtrysku: pompa wtryskowa
- system oczyszczania spalin: reaktor utleniający
- poziom emisji: Euro 3
- skrzynia biegów: 6-biegowa, manualna
- przebieg: 23 700 km

Paliwo wykorzystywane w badaniach to Shell Formula Diesel, którego wymogi były zgodne z EN-SN-590 (zawartość siarki poniżej 10 ppm). Poniżej podano szczegółowe dane dotyczące oleju smarującego:

olej SAE OW/30;

skład nowego oleju:

siarka:	5000 ppm
wapń:	2847 ppm
żelazo:	171 ppm
fosfory:	1078 ppm
cynk:	1243 ppm

W tabeli 1 podano wartości emisji bazowej dla różnych testów, a w tab. 2 emisję dla różnych obciążeń silnika przy prędkości 85 km/h na 6. biegu.

Pomiar emisji związków gazowych i masy cząstek stałych dokonano zgodnie z europejskimi wymaganiami dotyczącymi emisyjności samochodów osobowych. Sys-

Table 1. Emissions baseline of the test vehicle over the different driving cycles

Tabela 1. Emisja bazowa pojazdu w różnych testach drogowych

g/km	Euro 3	NEDC cold/ NEDC zimny	NEDC warm/ NEDC gorący	FTP 75 warm/ FTP 75 gorący	CADC warm/ CADC gorący	NYCC warm/ NYCC gorący	BAB warm/ BAB gorący
CO	0.64	0.21	0.05	0.04	0.24	0.27	0.02
HC	–	0.06	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
NOx	0.5	0.35	0.35	0.40	0.72	0.75	0.8
PM	0.05	0.03	0.025	0.033	0.07	0.07	0.025

count, SMPS for the particle size analysis 10–400 nm, and the sensors DC and PAS for the online determination of the particle surface and the overall elemental carbon (EC) in the size range 10–1000 nm. The equipment was deployed at various test locations. For measurements in the CVS-Tunnel, the instrumentation was enhanced with the Electrical Particle Impactor (ELPI), which provides information on count and mass in 12 size classes 30–10,000 nm. Details of the instrumentation are given in [18]. Sampling was according to Particulate Measurement Protocol (PMP) [36] with 300°C preheated sampling lines and dilution range (DR) > 100 to guarantee that only solid particles were counted.

tem pomiarowy przedstawiono na rys. 4. Pomiary liczby cząstek stałych wykonano z użyciem grzanej linii gazowej z rozcieńczaniem spalin MD19, licznika cząstek stałych CPC, analizatora SMPS wielkości cząstek stałych w zakresie 10–400 nm oraz czujników DC i PAS do bieżącego określania powierzchni cząstek i całkowitego udziału węgla (elemental carbon) o rozmiarze 10–1000 nm. Analizatory te były podłączone w różnych miejscach układu wylotowego. W pomiarach z wykorzystaniem systemu CVS użyto analizatora ELPI do pomiaru liczby i masy cząstek w 12 przedziałach dla zakresu średnic cząstek 30–10 000 nm. Szczegółowe informacje o analizatorach podano w [18]. Próbkowanie

Table 2. Emissions baseline of the test vehicle in load steps at 85 km/h, 6th gear

Tabela 2. Emisja bazowa pojazdu dla różnych obciążeń przy prędkości 85 km/h na 6. biegu

Load/Obciążenie	Exhaust temp./ Temperatura spalin [°C]	PM [g/km]	PN x 10 <sup>6</sup> 10–400 nm [# /cm <sup>3</sup> ]	P Ø [nm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> [%]
3 N	230	0.007	35.7	60	50	41
400 N	330	0.019	21.1	70	196	39
800 N	390	0.033	10.6	80	461	23
1200 N	435	0.046	4.4	80	856	15
1600 N	465	0.055	4.5	80	1099	8

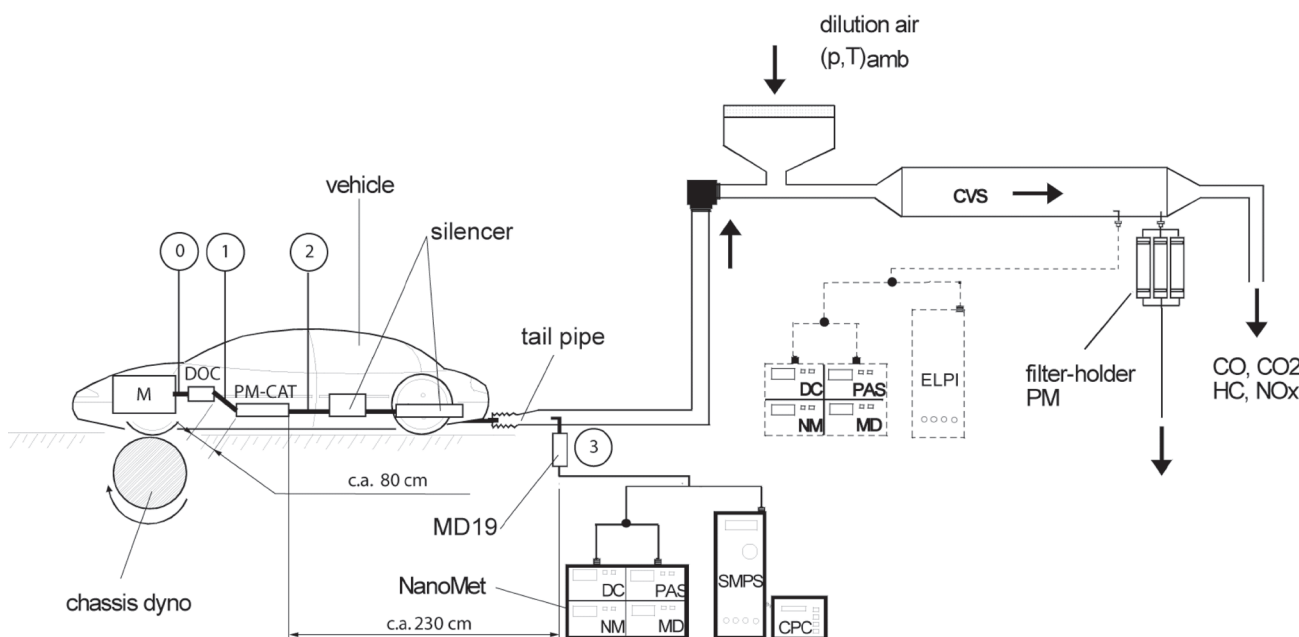


Fig. 4. Sampling points and instrumentation for exhaust-gas and nanoparticles on the chassis dynamometer

Rys. 4. Punkty poboru spalin i wykorzystywana aparatura do pomiaru emisji związków gazowych i cząstek stałych w badaniach na hamowni podwoziowej



A specialty of this investigation is the sample extraction before and after the test object. This segregates the influence from other parts of the exhaust system on the investigated emissions and permits a proper evaluation of the properties of each single device e.g. the filtration of the filter and the conversion of the DOC. It also identifies any trends in the engine emissions during the testing period. The sampling points are "0" before the DOC, "1" between DOC and filter, and "2" immediately after the filter, for nanoparticles and NO<sub>2</sub>. The sampling lines are instrumented for pressure and temperature.

The sampling points are connected to the instrumentation chain through a heated switching valve. In some cases a DOC was integrated in the device and then unfortunately there was no access to the point between the integrated DOC and the filter unit.

#### Test candidates

Filter A is actually a partial-flow filter [19, 20]. The design features are a metallic substrate of corrugated and perforated foils and a fleece of very fine metallic fibers acting as the actual filter medium. Deflection blades in the channels create flow conditions, which intensify momentum cross-transfer between the channels and flow through the filter fleece. This PMS used the existing closed coupled DOC of the vehicle for the necessary NO<sub>2</sub>-formation and an integrated DOC immediately upstream of the PFF in addition.

Filter B [10] is derived from a VERT-certified full flow sintered metal filter. This filter provides a high filtering surface and excellent ash storage by a filter pocket design instead of a cellular filter structure. The filter medium itself consists of a fine metal grid covered with sintered metal powder. It attains a filtration efficiency of > 98% according to the VERT verification protocol [1]. For the application as partial-flow filter each filter pocket has received two exit holes, providing an overall section of about 400 mm<sup>2</sup>, through which the exhaust-gas can escape unimpeded and unfiltered. This PMS also used the vehicle DOC for the necessary NO<sub>2</sub> formation, but the existing was replaced by a new one.

The other two test candidates C and D are coarse-pored deep filters of ceramic and metallic foams. This concept goes back to the early days of exhaust filter development [22, 23], when filtration efficiencies up to 90% were attained with well engineered foams. However, the store-and-release problem, i.e. the occasional soot blow-off, was never adequately mastered. The pore size of these filters is in the range 1–3 mm i.e. almost two orders of magnitude larger than the usual pore size of ceramic wall flow filters. Since filtration efficiency of ultrafine particles is proportional to the filter depth/pore diameter × flow velocity [24] the disadvantage of large pore size and large flow velocity must be compensated for by a greater filter depth, which is basically detrimental to the pressure loss. An acceptable trade-off is not easy to achieve. C uses an integrated DOC and was placed close coupled replacing the vehicle DOC. D again used the existing vehicle DOC but in addition some Pt coating inside the PMS-structure. The different filter technologies are shown in Fig. 5.

spalin było zgodne z wytycznymi podanymi w Protokole Pomiaru Cząstek Stałych (PMP – *Particulate Measurement Protocol*) [36], w którym określono temperaturę grzanej linii gazowej na 360°C oraz stopień rozcieńczenia powyżej 100, gwarantujący pomiar części węglowej cząstek stałych.

Celem badania jest ekstrakcja próbna przed zastosowaniem przedmiotu testu i po jego zastosowaniu. W ten sposób oddzielony zostaje wpływ innych części układu wylotowego na badane emisje oraz pozwala to na poprawną ocenę właściwości każdego z urządzeń, np. wydajności filtra i konwersji reaktora katalitycznego (DOC – *Diesel Oxidation Catalyst*). Możliwe jest także zidentyfikowanie wszelkich zachowań emisji silnika podczas przeprowadzania testu. Punktami próbkowania są "0" przed DOC, "1" między DOC a filtrem i "2" za filtrem cząstek stałych. Linie próbkowania są wyposażone w pomiar wartości ciśnienia i temperatury.

Punkty próbkowania połączono z analizatorami za pomocą zaworu łączeniowego. W niektórych przypadkach DOC zintegrowano z filtrem, co niestety powodowało, że do punktu między zintegrowanym DOC a filtrem nie było dostępu.

#### Testowane filtry

Filtr A to filtr częściowego przepływu [19, 20]. Wykonany jest z metalicznego substratu, składającego się z falistych i perforowanych folii oraz z włókniny powstałej z włókien metalicznych wysokiej jakości, które pełnią funkcję środka filtrującego. Znajdujące się w kanałach łopatki odchylające tworzą takie warunki przepływu, które intensyfikują pęd między kanałami oraz przepływ przez włókninę filtrującą. Badany PMS użyto łącznie w reaktorze katalitycznym pojazdu do wytworzenia NO<sub>2</sub>.

Filtr B [10] to filtr pełnego przepływu, wykonany ze spieku metalowego, posiadający certyfikat VERT. Filtr ten charakteryzuje się dużą powierzchnią filtrującą oraz doskonałym magazynowaniem popiołu dzięki specjalnie przewidzianej kieszeni zamiast konstrukcji komorowej. Samo medium filtrujące składa się z wysokiej jakości siatki metalowej pokrytej proszkiem ze spieku metalowego. Wydajność filtracji osiąga sprawność powyżej 98% zgodnie z protokołem weryfikacyjnym VERT [1]. W celu zastosowania filtra jako częściowo przepływowego każdą kieszeń zaopatrzone w dwa otwory wylotowe, zapewniając w ten sposób całkowitą powierzchnię około 400 mm<sup>2</sup>, przez którą może wydostać się bez przeszkód nieprzefiltrowany gaz wylotowy. Ten PMS również wykorzystał DOC pojazdu do wytworzenia NO<sub>2</sub>, lecz obecny wymieniono na nowy.

Dwa pozostałe filtry C i D to chropowato-porowate filtry z pianek ceramicznych i metalicznych. Taka budowa filtrów wynika z początków prac nad filtrami cząstek stałych [22, 23], kiedy wydajność filtracji do 90% osiągnano z zastosowaniem wysokiej jakości pianek. Jednak nigdy nie poradzono sobie całkowicie z problemem magazynowania oraz wydzielania sadzy, a dokładniej – ze sporadycznym wybuchem sadzy. Wielkość porów w tych filtrach wynosi od 1 do 3 mm, tzn. prawie dwa rzędy wielkości więcej niż normalna wielkość poru w filtrach ceramicznych. Ponieważ wydajność filtracji cząsteczek ultradrobnych jest propor-



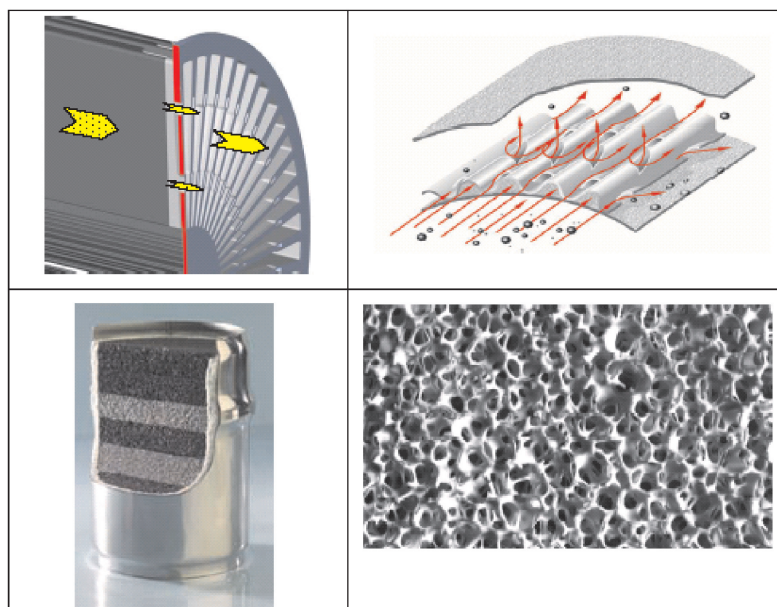


Fig. 5. System B above left; system A above right, system C below left; the picture below right shows the typical structure of an open pore ceramic foam from [23]

Rys. 5. System B (na górze po lewej), system A (na górze po prawej), system C (na dole po lewej); rysunek na dole po prawej przedstawia standardową strukturę cel ceramicznych [23]

Table 3 shows some of the physical properties of the test systems. Some of the dimensions are estimated. The velocities are based on an average engine flow  $0.076 \text{ m}^3/\text{s}$ . The storage volume of A, C and D was calculated assuming that agglomerates larger than  $10 \mu\text{m}$  will be blown off, since aerodynamic forces exceed adhesion forces.

The comparison demonstrates the large differences of these concepts. Filter B has so much volume-storage capacity that it will never need to clean itself during the actual chassis dynamometer testing period of less than 1500 km while all other systems, which can only store soot on their flow exposed surfaces must blow off if they do not regenerate during the 1500 km testing period. This means that the quality of Filter B will be overestimated during short time testing as performed here.

cyjona do głębokości filtra/średnicy celi  $\times$  prędkość przepływu [24], niekorzystną wielkość celi i dużą prędkość przepływu należy zrekomensować większą głębokością filtra, co jest szkodliwe dla przeciwcisnienia. Niełatwo jest znaleźć dopuszczalne rozwiązanie. Filtr C wykorzystuje wbudowany reaktor katalityczny (DOC) i jednocześnie zastępuje filtr cząstek stałych. Filtr D również wykorzystuje istniejący reaktor katalityczny DOC pojazdu, ale dodatkowo też powłokę Pt wewnątrz konstrukcji PMS. Różne technologie filtrów przedstawiono na rys. 5.

W tabeli 3 przedstawiono właściwości fizyczne testowanych układów. Niektóre wymiary są szacunkowe. Prędkości oparto na średnim przepływie spalin wynoszącym  $0,076 \text{ m}^3/\text{s}$ . Objętość magazynowania filtrów A, C i D obliczono zakładając, że aglomeraty większe niż  $10 \mu\text{m}$  zostaną uwolnione, gdyż siły aerodynamiczne przekraczają siły przylegania.

To porównanie dowodzi dużej różnicy między tymi koncepcjami. Filtr B ma tak dużą objętość magazynowania i w związku z tym nigdy nie będzie wymagał czyszczenia podczas faktycznego okresu testu na hamowni podwoziowej poniżej 1500 km, natomiast wszystkie pozostałe układy, które mogą jedynie magazynować sadzę na swoich powierzchniach przepływu muszą emitować sadzę, jeśli nie zregenerują się w trakcie 1500 km testu. Oznacza to, że jakość filtra B będzie przeszacowana podczas wykonywanego testu krótkiego.

$\text{NO}_2$ , który potrzebny jest do regeneracji, można uzyskać różnymi metodami. Filtr B zastępuje DOC pojazdu innym DOC. Filtr A integruje DOC we własnej obudowie oraz dodatkowo wykorzystuje oryginalny DOC. Kompaktowy filtr C zawiera elementy powleczone katalizatorem, więc oryginalny DOC nie jest konieczny. Pianka metaliczna w filtrze D również zawiera elementy powleczone katalizatorem, ale dodatkowo wykorzystuje oryginalny DOC.

Table 3. Basic properties of the 4 candidates

Tabela 3. Podstawowe dane czterech filtrów

	A	B	C	D
Diameter/średnica [m]	0.115	0.150	0.118	0.145
Length/długość [m]	0.150	0.170	0.076	0.180
Inflow section/przekrój poprzeczny dolotu [ $\text{m}^2$ ]	0.010	0.018	0.011	0.016
Filter volume/objętość [litr]	1.56	3.00	0.84	2.97
Inflow velocity/prędkość przepływu na wlocie [m/s]	7.6	4.3	6.9	4.8
Filtration surface/pole powierzchni filtrowania [ $\text{m}^2$ ]	1.0	1.0	0.4	1.5
Space velocity/prędkość uwalniania [1000/h]	175	91	326	97
Face-velocity/prędkość filtrowania [cm/s]	3.8	3.8	730	480
Pore size/wielkość cel [ $\mu\text{m}$ ]	25	25	3000	3000
Storage volume/objętość filtrowania [litr]	0.1	1.0	0.04	0.15
Storage distance/przebieg [km]	1000	10,000	400	1500
Part. flow section/przekrój częściowego przepływu [ $\text{m}^2$ ]	0.005	0.0004	–	–

The NO<sub>2</sub>, needed for the regeneration, can be obtained through various methods. The B filter substitutes the vehicle's DOC with another DOC. The A filter integrates a DOC in its own casing and uses the original DOC in addition. The very compact C filter contains catalytic coated foam elements and the original DOC is unnecessary. The metallic foam D filter, too, contains catalytic coated elements but uses the original DOC in addition.

For these tests the manufacturers matched the filters to the test vehicle. To identify manufacturing scatter, a further example was purchased from the market and compared. No major difference was found.

### Influence of the soot burden

The soot loading of the filters was done at two operating conditions:

- Cold start and acceleration to 35 km/h in 4<sup>th</sup> gear. Subsequently, constant operation during 210 mins at exhaust temperatures before filter < 200°C.
- Constant speed, after warm-start, at 65 km/h in 4<sup>th</sup> gear at exhaust-gas temperature of about 300°C.

At intervals of 10 minutes, the limited components CO, HC, NO<sub>x</sub> and PM were extracted from the CVS-Tunnel. Additionally, the ELPI instrument was used. The nanoparticle analysis was connected to the sampling locations 1 and 2.

The particle concentration as measured size-specific by SMPS was integrated over the size range 10 nm to 400 nm and the comparison of results from sampling point 1 and 2 was used to determine the filtration efficiency. The filtration efficiency determined at some of these 10 minute intervals is shown in Tab. 4.

The A filter is a classical partial-flow filter with limited deposition capability in the filter fleece. It performs as anticipated: the ratio of partial-flow/main-flow shifts and decreases the filtration efficiency from the initially 55% to 31%, i.e. the filtration efficiency is almost halved. Unfortunately the test was not continued to observe the probable continuation of this trend. The second partial-flow filter B has a substantially higher deposition capability in the filter body. The efficiency decreases from 61% to 55%. Here, the degradation obviously is slower. The deep-filters C and D exhibit, as expected, an inverse trend. The filtration efficiency slightly increases with deposition of particle matter. Deposited soot raises the available deposition surface inside the filter matrix and thus improves the filtration efficiency. This trend always occurs in deep filters [25]. Eventually, saturation will occur and the trend will reverse because the adhesion locations are occupied. The high flow velocity in such filters then expels the agglomerates [26].

This second test variant has the higher exhaust-gas temperature of 300°C. An intensive regeneration can be expected, because the peak NO<sub>2</sub> generation usually happens around 300°C [27]. The test results indeed indicate a more sustained filtration. The results of this testing are shown in Table 5, again the particle concentration as measured size-specific by SMPS was integrated over the size range 10 nm to 400 nm and the comparison of results from sampling point 1 and 2 was used to determine the filtration efficiency.

Do celu testów producenci dostosowali filtry do badanych pojazdów. Aby rozpoznać rozrzut produkcyjny, zakupiono kolejny model, który następnie poddano porównaniu. Nie znaleziono większych różnic.

### Wpływ obciążenia sadzą

Obciążenia filtrów sadzą dokonano w dwóch trybach pracy:

- rozruch zimny i przyspieszenie do 35 km/h na 4. biegu. Następnie nieprzerwana praca przez 210 min, temperatura spalin przed filtrem < 200°C,
- stała prędkość, po rozruchu ciepłego silnika, przy 65 km/h na 4. biegu, przy temperaturze spalin około 300°C.

W dziesięciominutowych przerwach dokonywano pomiaru składników spalin: CO, HC, NO<sub>x</sub> i PM z tunelu rozcieńczającego. Dodatkowo zastosowano analizator ELPI. Analizę nanocząsteczkową wykonano z miejsc próbkowania oznaczonych 1 i 2.

Stężenie cząstek zmierzone za pomocą SMPS przy uwzględnieniu ich wielkości w zakresie od 10 do 400 nm wykorzystano do ustalenia wydajności filtracji i porównania wyników z punktów próbkowania 1 i 2. Wydajność filtracji ustaloną w dziesięciominutowych przerwach przedstawiono w tab. 4.

Table 4. Filtration efficiency at 35 km/h

Tabela 4. Efektywność filtrowania przy prędkości 35 km/h

–	A [%]	B [%]	C [%]	D [%]
Cold start/ zimny rozruch	53.02	60.37	31.34	20.72
10 min	55.75	61.05	7.76	ND
30 min	50.20	56.37	8.99	ND
60 min	43.18	57.56	9.51	23.96
120 min	36.49	54.39	10.38	26.65
180 min	31.72	55.00	12.56	24.55

Filtr A to klasyczny filtr obejściowy o ograniczonej zdolności osadzania na włókninie filtrującej. Zachowuje się według przewidywań: stosunek obejście/ruch główny zmienia się i zmniejsza wydajność filtracji z początkowych 55% do 31%, co oznacza spadek wydajności filtracji o prawie połowę. Niestety nie wznowiono testu, by zaobserwować dalsze możliwe utrzymanie się tej tendencji. Drugi filtr obejściowy B ma większą zdolność odkładania. Wydajność spada z 61% do 55%. W tym przypadku degradacja jest oczywiście wolniejsza. Filtry C i D wykazują, zgodnie z oczekiwaniami, tendencję odwrotną. Wydajność filtracji nieznacznie wzrasta wraz z odkładaniem się sadzy. Odłożona sadza zwiększa dostępną powierzchnię odkładania wewnątrz filtra i w ten sposób poprawia wydajność filtracji. Tendencja ta zawsze ma miejsce w filtrach głębokich [25]. Ostatecznie następuje saturacja i tendencja ulega odwróceniu. Duża prędkość przepływu w tego rodzaju filtrach powoduje usuwanie aglomeratów [26].

Drugi wariant testowy charakteryzuje się wyższą temperaturą spalin wynoszącą 300°C. Można oczekiwać intensywnej regeneracji, gdyż największe stężenie NO<sub>2</sub> zazwyczaj

Table 5. Filtration efficiency at 65 km/h

Tabela 5. Efektywność filtrowania przy prędkości 65 km/h

–	A [%]	B [%]	C [%]	D [%]
Warm start/ gorący rozruch	35.30	59.70	29.48	6.20
10 min	21.65	51.89	15.33	8.58
30 min	20.79	51.99	20.35	11.27
60 min	18.43	52.68	23.45	16.72
120 min	23.28	52.14	24.12	21.86
180 min	20.11	54.97	25.38	25.66

The A filter indeed sustains a filtration efficiency of about 20% – however far below expectations. The explanation may be that at 65 km/h, which is above city driving speeds, the designs space velocity is exceeded. The B filter sustains an acceptably high filtration efficiency. But the deep filters C and D interestingly are reaching the 25% rate, i.e. higher than the A filter.

#### Blow-off/store-and-release

The Store-and-Release phenomena in exhaust systems have been extensively investigated [12, 13]. The observed response is usual in exhaust systems with mufflers. It is very similar to the physical behavior in catalytic converters and the open filter systems discussed here.

The investigation of blow-off phenomena is technically difficult. It is a stochastic event, which occurs sporadically and unpredictably depending on deposition burden, prior events and space velocity.

In order to provoke this store-and-release phenomenon, after 5000 km controlled city driving according to [5] – and after conditioning and EUDC-cycle-measurement – the vehicle was run at 40 km/h on the chassis dyno and suddenly accelerated – see photographs from video clips taken during this testing are shown in Fig 6. The time at the bottom of each frame indicates the time after the start of the sudden acceleration.

A systematic investigation of the blow-off phenomena was done at free acceleration as specified above in the section on the influence of the soot burden.

The soot puff was logged twice as follows:

- online CPC recording, directly at the tailpipe
- online recording with ELPI, at the CVS tunnel.

The Tables 6 and 7 summarize the peak values from the two instruments.

The CPC data shows a respectable result for the B filter, but very modest values for the A, C and D filters. At first sight the comparison of the ELPI data to CPC is surprising. The emission peaks measured by the ELPI are consistently much higher with the filter systems compared to the baseline without filter.

następuje w około 300°C [27]. Rzeczywiście, wyniki testu wskazują na bardziej długotrwałą filtrację. Wyniki tego testu przedstawiono w tab. 5; dokonano również pomiarów rozkładu wymiarowego cząstek za pomocą SMPS w zakresie od 10 do 400 nm, a porównania wyników z punktów próbkowania 1 i 2 użyto do ustalenia wydajności filtracji.

Filtr A rzeczywiście utrzymuje wydajność filtracji rzędu około 20% – jest to jednak wartość poniżej oczekiwań. Wyjaśnieniem tego może być fakt, że przy prędkości pojazdu 65 km/h, która przekracza limit prędkości w mieście, przekroczone jest natężenie przepływu spalin przez filtr. Filtr B utrzymuje wystarczająco wysoką wydajność filtracji. Jednak, co ciekawe, filtry C i D uzyskują wartość 25%, czyli większą niż filtr A (tab. 5).

#### Emisja sadzy – magazynowanie i uwalnianie

Zjawisko magazynowania i uwalniania w układzie wylotowym było już szeroko badane [12, 13]. Zaobserwowana reakcja jest typowa dla układów wylotowych z tłumikiem. Jest bardzo zbliżona do zachowania fizycznego w reaktorach katalitycznych i omawianych tu otwartych układach filtrów.

Badanie zjawiska emisji sadzy jest trudne od strony technicznej. Jest to zdarzenie stochastyczne, które występuje sporadycznie i w sposób nieprzewidywany, a zależy od obciążenia sadzą, warunków pracy silnika i szybkości przepływu spalin.

W celu wywołania zjawiska magazynowania i uwalniania, po 5000 km kontrolowanej jazdy po mieście zgodnie z [5] – oraz po kondycjonowaniu i pomiarze w cyklu pozamiejskim EUDC – pojazd rozpędzono do prędkości 40 km/h na hamowni podwoziowej, po czym nagle przyspieszono – patrz zdjęcia z videoklipów zrobione podczas testu (rys. 6). Czas podany na dole zdjęcia wskazuje czas po rozruchu i nagłym przyspieszeniu.

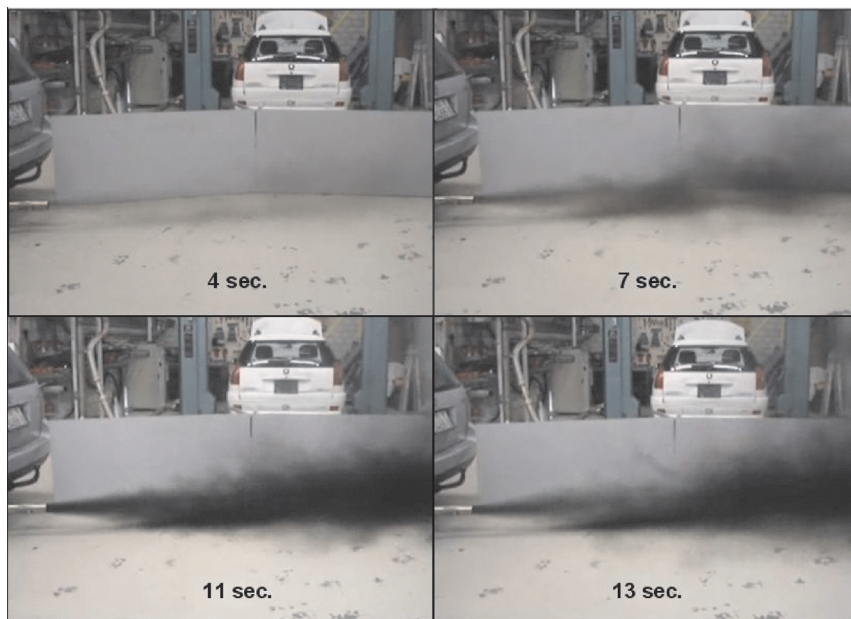


Fig. 6. Typical blow-off during full load acceleration after city driving according to [5]

Rys. 6. Typowy przebieg wydmuchiwania cząstek stałych podczas maksymalnego przyspieszania [5]



Table 6. Peak values of solid particle number emissions during free acceleration, measured with CPC at the tailpipe

Tabela 6. Maksymalne ilości cząstek stałych podczas swobodnego przyspieszania, zmierzone w układzie wylotowym

–	CPC			
	A	B	C	D
Basis/ wartość podstaw.	$9.8 \times 10^7$	$9.8 \times 10^7$	$9.8 \times 10^7$	$9.8 \times 10^7$
With filter/ z filtrem	$8.6 \times 10^7$	$4.5 \times 10^7$	$9.8 \times 10^7$	$9.0 \times 10^7$
Reductione/ redukcja	12.2%	53%	2%	8.2%

Table 7. Peak values of solid particle number emissions at the CVS tunnel during free acceleration, measured with ELPI at the CVS tunnel

Tabela 7. Maksymalne ilości cząstek stałych podczas swobodnego przyspieszania, zmierzone w układzie CVS

–	ELPI			
	A	B	C	D
Basis/ wartość podstaw.	$4.5 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$
With filter/ z filtrem	$10 \times 10^5$	$6.6 \times 10^5$	$27.7 \times 10^5$	$9 \times 10^5$
Reductione/ redukcja	-122%	-47%	-515%	-100%

This observation, too, is not new [17] and can be explained as follows: the CPC only detects very small particles. But the ELPI detection range is up to 10,000 nm. The particles expelled from open systems, during the free acceleration, are previously deposited soot particles, i.e. agglomerated and substantially larger than the engine emitted particles. Hence, the CPC will just not “see” many of them but the ELPI will. So it is not surprising at all that the ELPI registers higher values for open systems during acceleration. It is clear proof of blow-off.

Comparing the visual impression (Fig. 6), even the ELPI might be underestimating the extent of blow-off, because many particles may be much larger than the 10  $\mu\text{m}$  ELPI detection limit.

This blow-off hypothesis was further investigated. The particle mass PM was measured during 10 minutes, within which three free accelerations were performed. This measurement is presumably not very precise; because the mass is so small. Nevertheless, in these measurements all four systems emitted a higher mass with filter than without filter.

#### Load variation at 85 km/h

The load variation at 85 km/h was performed to discover the system dependence of the filtration efficiency and the  $\text{NO}_2$  emissions. Again the number count is measured size-specific by SMPS and then integrated in the size range 10–400 nm to determine filtration efficiency. The filtration efficiency results are presented in Tab. 8.

The system B apparently exhibits sustained filtration efficiency at relatively high level, although due to the higher capacity of this filter this may in fact be merely soot storage. The system A deteriorates with increasing load,

Badanie systematyczne zjawiska wydmuchiwania sadzy przeprowadzono przy przyspieszeniu swobodnym, jak opisa-no wyżej w części dotyczącej wpływu obciążenia sadzą.

Uwolnienie sadzy zarejestrowano dwukrotnie:

- nagranie online CPC, bezpośrednio na rurze wylotowej
- nagranie online za pomocą ELPI, w tunelu rozcieńczającym.

W tabelach 6 i 7 podsumowano wartości maksymalne z tych dwóch analizatorów.

Dane z licznika cząstek stałych (CPC) wykazują dobre wyniki dla filtra B, ale bardzo małe wartości dla filtrów A, C i D. Porównanie danych ELPI do CPC jest zaskakujące. Wartości maksymalne emisji zmierzone przez ELPI są konsekwentnie dużo wyższe przy układach filtrujących w porównaniu z wartością bazową bez filtra.

Powwyższa obserwacja również nie jest nowa [17] i można ją wytłumaczyć w następujący sposób: CPC wykrywa jedynie cząsteczki o bardzo małych wymiarach. Natomiast zakres wykrywalności ELPI wynosi do 10 000 nm. Cząstki usuwane z układów otwartych podczas przyspieszania swobodnego są uprzednio odłożonymi cząsteczkami sadzy, tzn. są skupione i zdecydowanie większe niż cząsteczki emitowane przez silnik. Zatem CPC po prostu nie będzie “widział” wielu z nich, a ELPI przeciwnie. Nie zaskakuje zatem, że ELPI rejestruje wyższe wartości dla układów otwartych w trakcie przyspieszania. To dowodzi zjawiska emisji (wydmuchiwania) sadzy.

Porównując wrażenie wizualne (rys. 6), ELPI może niedoszacować stopnia emisji sadzy, gdyż wiele cząstek może być dużo większych rozmiarów niż 10  $\mu\text{m}$ , które stanowią limit wykrywalności tego analizatora.

Powwyższą hipotezę dotyczącą emisji sadzy zbadano dokładniej. Masę cząstek PM mierzono przez 10 min, w trakcie których przeprowadzono trzykrotne swobodne przyspieszanie. Przypuszczalnie pomiar ten nie jest zbyt precyzyjny ze względu na tak małą masę cząstek. Niemniej jednak w tych pomiarach wszystkie cztery układy emitowały większą masę z filtrem niż bez filtra.

#### Zmiana obciążenia przy 85 km/h

Zmiany obciążenia przy 85 km/h dokonano w celu stwierdzenia zależności układu od wydajności filtracji i emisji  $\text{NO}_2$ . Ponownie stężenie cząsteczek mierzono przy uwzględnieniu ich wielkości w zakresie 10–400 nm za pomocą SMPS w celu określenia wydajności filtracji. Wyniki wydajności filtracji przedstawiono w tab. 8.

Układ B wykazuje stałą wydajność filtracji na względnie wysokim poziomie, choć ze względu na większą objętość tego filtra w rzeczywistości może to być jedynie magazynowanie sadzy. Układ A pogarsza się wraz ze wzrostem obciążenia, prawdopodobnie z powodu wzrostu stosunku ruch główny/obejściowy i nadal słabej regeneracji. Po wznowieniu się regeneracji przy wysokim obciążeniu wydajność poprawia się. Podobne zachowanie zaobserwowano w przypadku układu C. Układ D emituje sadzę przy wzrastającym przepływie spalin.

Ostatnia kolumna przedstawia temperaturę spalin gazu wylotowego na początku filtra. Na ostatnim punkcie ro-



probably because the ratio main-flow/partial-flow increases and regeneration is still weak. Once regeneration becomes active at high load then the efficiency improves. A similar pattern is observed for system C. System D is blowing off at increasing flow.

The last column shows the exhaust-gas temperatures upstream of the filter. At the last operating point, an oxygen based regeneration may occur. That might explain the step improvement of systems A and C, and also the clear improvements in system B.

The load variations were also used to scrutinize the systems' NO<sub>2</sub> emissions. The emissions of NO<sub>2</sub> are very temperature dependent because of the equilibrium reaction NO – NO<sub>2</sub> [27], Diesel engines without exhaust-gas after-treatment only have elevated NO<sub>2</sub> emissions at very low exhaust-gas temperatures in the idling range. As the temperature increases, the equilibrium shifts towards NO and only 5–8% NO<sub>2</sub> is measured. Oxidation catalysis using Pt, when the fuel is sulfur free, creates a completely different situation, which is fully described in the cited publication [27].

NO<sub>2</sub> is measured hot [28], so that no loss of the easily water soluble NO<sub>2</sub> in condensate occurs. Table 9 shows, for all four systems, the concentration of NO<sub>2</sub> in the ratio to total NO<sub>x</sub>, before and after each filter system.

System A has high NO<sub>2</sub> values before the filter system, as a result of the vehicle catalytic converter, decreasing at high temperatures because of the equilibrium shift. Within the PMS some NO<sub>2</sub> seems to be used for regeneration thereby lowering the slip of this toxic gas compound to some extent.

B has an even higher inlet value, because a new catalytic converter was used. Also here some NO<sub>2</sub> is used for soot oxidation.

System C replacing the vehicle DOC shows upstream the typical Diesel engine-out NO<sub>2</sub> emission characteristic and downstream the effect of the integrated DOC. System D, using 2 DOC's, the vehicle DOC and coatings inside is clearly strengthening the emission effect.

### Varying the vehicle speed

This test focuses on the influence of space velocity. The temperature varies simultaneously with the speed. Table 10 shows the influence on filtration efficiency. Again the number count is measured size-specific by SMPS and integrated over a size range of 10–400 nm to determine the filtration efficiency. In the table Tv corresponds to the temperature upstream the filter, and Tn corresponds to the temperature downstream of the filter.

The data do not identify a clear influence of increasing space velocity. Apparently, the simultaneously higher temperature increases conversion and hence better efficiency for all systems. The systems C and D are nevertheless below expectation.

The temperatures, logged before and after the filter, do not indicate a significant chemical reaction. The distance of the thermocouples from the filter, approx. 10 cm, may explain the difference since the pipes were not insulated.

Table 8. Particle filtration efficiency at 85 km/h, 6th gear  
Tabela 8. Efektywność filtrowania cząstek stałych przy prędkości 85 km/h na 6. biegu

–	A	B	C	D	Temp. [°C]
0 N	18.72	48.18	3.15	21.82	244
400 N	23.86	56.06	16.52	13.93	345
800 N	13.06	56.58	19.44	–5.65	409
1200 N	15.24	60.59	19.19	–31.85	472
1600 N	33.44	63.52	33.44	–29.63	519

boczym może wystąpić regeneracja poprzez tlen. Może to wyjaśniać stopniową poprawę sprawności układów A i C jak również wyraźną poprawę sprawności filtracji układu B.

Zmiany obciążeń wykorzystano także do analizy emisji NO<sub>2</sub> w badanych układach. Emisja NO<sub>2</sub> w znacznym stopniu zależy od temperatury, ze względu na reakcję równowagową NO – NO<sub>2</sub> [27]; silniki o ZS bez obróbki spalin mogą mieć jedynie podwyższoną emisję NO<sub>2</sub> przy bardzo niskich temperaturach spalin w zakresie biegu jałowego. Wraz ze wzrostem temperatury spalin równowaga przechyla się w stronę NO i stwierdza się tylko 5–8% NO<sub>2</sub>. Kataliza utleniająca wykorzystująca Pt, gdy w paliwie nie ma siarki, stwarza zupełnie inną sytuację, którą opisano dokładnie w cytowanej publikacji [27].

NO<sub>2</sub> mierzy się na gorąco [28], żeby nie wystąpiła żadna strata w kondensacie rozpuszczalnego w wodzie NO<sub>2</sub>. W tabeli 9 przedstawiono, dla wszystkich czterech układów, stężenie NO<sub>2</sub> w stosunku do całkowitego NO<sub>x</sub>, przed i za każdym układem filtrującym.

Układ A charakteryzuje się wysokimi wartościami NO<sub>2</sub> przed układem filtrującym, w wyniku zastosowania utleniającego reaktora katalitycznego, zmniejszającymi się w wysokiej temperaturze, ze względu na zmianę równowagi. W badanych układach część NO<sub>2</sub> zdaje się być wykorzystana do regeneracji, co obniża w pewnym stopniu ulatnianie się związków spalin.

Filtr B ma nawet wyższą wartość wejściową ze względu na zastosowanie nowego reaktora katalitycznego. Wykorzystano tu również część NO<sub>2</sub> w celu utlenienia.

Układ C zastępujący DOC pojazdu wykazuje typową dla silników o ZS emisję NO<sub>2</sub>. Układ D, wykorzystując reaktor katalityczny pojazdu oraz powłoki wewnętrzne, wyraźnie wzmacnia efekt emisji.

### Zmienna prędkość pojazdu

Test ten skupia się na wpływie zmian natężenia przepływu spalin przez filtr. Temperatura spalin zmienia się wraz z prędkością pojazdu. W tabeli 10 przedstawiono wpływ prędkości pojazdu na wydajność filtracji. Stężenie cząstek mierzono w zakresie 10–400 nm za pomocą SMPS, a następnie określono wydajności filtracji. W tabeli 10 oznaczenie Tv odpowiada temperaturze na początku filtra, natomiast Tn odpowiada temperaturze na końcu filtra.

Dane nie dowodzą wyraźnego wpływu wzrastającego natężenia przepływu. Najwyraźniej jednocześnie wzrastająca temperatura zwiększa konwersję, a tym samym polepsza wydajność wszystkich układów. Pomimo to układy C i D nadal zachowują się poniżej oczekiwań.

Table 9. NO<sub>2</sub> emissions relative to total NO<sub>x</sub>, before and after particle filter, with load variations at 85 km/hTabela 9. Udział NO<sub>2</sub> w emisji NO<sub>x</sub> przed i za filtrem cząstek stałych, dla różnych obciążeń silnika przy prędkości 85 km/h

NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> [%]	Before PMS/pomiar przed filtrem			
	A	B	C	D
Idle/bieg jałowy	35.8	49.2	27.1	36.7
398 N	33.5	40.6	4.8	34.5
798 N	23.4	26.0	3.2	22.4
1198 N	14.4	12.8	3.2	15.0
1598 N	5.9	6.3	3.7	8.9

NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> [%]	After PMS/pomiar za filtrem			
	A	B	C	D
Idle/bieg jałowy	21.6	36.6	20.5	44.0
398 N	25.5	21.7	27.0	49.3
798 N	22.3	11.0	22.8	36.0
1198 N	17.5	3.6	16.2	26.9
1598 N	7.2	0.4	10.6	19.1

Table 10. Filtration efficiency from the integrated particle counts 10–400 nm, at increasing speed in 5<sup>th</sup> gear

Tabela 10. Współczynnik sprawności filtracji dla zakresu cząstek 10–400 nm, przy zwiększaniu prędkości na 5. biegu

km/h	A	B	C	D	Tv [°C]	Tn [°C]
45	39.27	55.43	16.19	25.16	195	150
60	29.39	50.27	9.48	19.21	250	200
80	27.62	57.01	15.98	17.54	295	230
100	32.19	58.95	19.65	18.32	350	285
120	36.45	62.76	15.90	23.00	350	290

Temperatury rejestrowane przed i po zastosowaniu filtra nie wskazują istotnych reakcji chemicznych. Odległość termoelementów od filtra wynosząca ok. 10 cm może wyjaśniać tę różnicę, ponieważ nie były one izolowane.

### Testy jezdne

Test NEDC przestano już traktować jako cykl odzwierciedlający warunki jazdy rzeczywistej [6]. Testowano zatem inne cykle jazdy. Były to FTP 75 oraz CADC (obydwa są bardziej dynamiczne niż NEDC), New York City Cycle NYCC (z bardzo niskimi obciążeniami) oraz

Table 11. Characteristic data of the used driving cycles

Tabela 11. Charakterystyczne dane wykorzystywanych testów badawczych

–	Overall length/ długość całkowita	Average speed/ prędkość średnia	Max. speed/ prędkość maksymalna	Estimated engine work/ wyznaczona praca silnika	Max accel./ maksymalne przyspieszenie	Max decel./ maksymalne hamowanie	% of accel./ udział przyspieszania	% of decel./ udział hamowania	% of idle/ udział biegu jałowego
	[m]	[km/h]	[km/h]	[kJ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
NEDC, ECE part	4073	18.8	50	1779	1.042	-0.992	18.5	17.4	30.8
NEDC, EUDC part	6955	62.6	120	3583	0.833	-1.389	25.8	10.5	10.0
NEDC, complete	11028	33.6	120	5362	1.042	-1.389	20.9	15.1	24.8
FTP-75, 1 <sup>st</sup> part	5777	41.2	91.2	3117	1.806	-1.500	34.3	35.4	19.6
FTP-75, 2 <sup>nd</sup> part	6209	25.8	55.2	3010	1.889	-1.806	35.9	34.5	19.5
FTP-75, 3 <sup>rd</sup> part	5777	41.2	91.2	3117	1.806	-1.500	34.3	35.4	19.6
FTP-75, complete	17763	34.1	91.2	9244	1.889	-1.806	35.0	35.0	19.6
CADC, urb.	4870	17.7	57.7	3644	2.861	-3.139	33.5	32.5	30.3
CADC, road	17272	57.5	111.5	9388	2.361	-4.083	39.8	39.8	3.3
CADC, Mw.	28736	97.0	131.8	20890	1.917	-3.361	39.9	34.7	1.7
NYCC	1896	11.4	44.6	1398	2.682	-2.637	28.1	31.6	40.3
BAB, 1 <sup>st</sup> part	12963	106.8	124.2	7998	0.750	-1.000	32.0	29.7	0.0
BAB, 2 <sup>nd</sup> part	9554	114.6	138.6	7543	0.750	-1.250	58.7	25.7	0.0
BAB, 3 <sup>rd</sup> part	10112	138.4	162.0	9823	0.250	-1.250	51.0	21.7	0.0
BAB, complete	32628	117.5	162.0	25318	0.750	-1.250	45.0	26.4	0.0

### Driving cycles

The NEDC cycle is no longer considered to mirror real driving conditions [6]. Hence, further driving cycles were tested. These were the FTP 75 and CADC (which are both more dynamic driving cycles), the New York City Cycle NYCC (which has very low loads) and the German Autobahn cycle BAB (for high driving speeds). Table 11 provides characteristic data comparing these driving cycles.

Table 12 shows the integrated filtration efficiency for the 4 system based on particulate mass PM and overall particle number CPC when tested during these driving cycles. All tests were repeated once on the following day to provide information on repeatability.

The big span of measured filtration efficiencies is typical for these systems. The results are not reproducible, because they are so heavily dependent on prior events and the operating conditions. All systems attain or exceed the required range of 30% in the NEDC cycle. Other cycles very often show worse efficiencies, due to greater proportion of transients, much lower load or very high motorway speeds. These operating conditions are realistic, too.

Hence, system evaluation based on the NEDC alone is inappropriate. In some cases measured efficiencies are extremely low, especially for the particle mass evaluation. The only explanation is the blow-off phenomena, which occur in these cycles and appear as emitted mass.

cykl German Autobahn BAB (dla jazdy z dużą prędkością). W tabeli 11 przedstawiono dane charakteryzujące wymienione testy.

W tabeli 12 przedstawiono zintegrowaną wydajność filtracji dla czterech systemów, opartą na masie cząsteczkowej PM i całkowitej liczbie cząstek CPC podczas testu. Wszystkie testy powtórzone następnego dnia w celu określenia powtarzalności.

Duża rozpiętość mierzonych wydajności filtracji jest typowa dla tych układów. Wyniki są nieodtwarzalne, ponieważ zależą w dużym stopniu od warunków eksploatacji. Wszystkie układy utrzymują bądź przekraczają wymagany zakres 30% w cyklu NEDC. Pozostałe cykle często wykazują gorsze wydajności ze względu na większe proporcje kondycjonowania, dużo niższe obciążenie lub bardzo duże prędkości na autostradzie.

Ocena układu oparta wyłącznie na badaniach w teście NEDC jest zatem niewłaściwa. W niektórych przypadkach zmierzona wydajność jest bardzo niska, zwłaszcza dla oceny masy PM. Jedynym wyjaśnieniem jest zjawisko emisji sadzy z filtra, które występuje w cyklach i pojawia się w postaci dodatkowo emitowanej masy.

Ocena liczby cząstek przed i po zastosowaniu filtra dla tych samych punktów roboczych wykazuje zupełnie odmienne wartości. Dzieje się tak, ponieważ licznik cząstek nie wykrywa dużych aglomeratów uwalnianej sadzy.

Table 12. Filtration efficiency based on particulate mass PM and the particle count measured by CPC in the driving cycles. Sampling from the CVS-Tunnel. Conditioning between cycles was 3 mins at 80 km/h 4<sup>th</sup> gear

Tabela 12. Sprawność filtracji wyznaczona na podstawie zmiany masy (PM) i liczby (CPC) zmierzonej licznikiem cząstek w różnych testach jezdnych; pobór próbek z układu CVS; kondycjonowanie między testami 3 min przy 80 km/h na 4. biegu

–	Filter A				Filter B			
	1 <sup>st</sup> day [%]		2 <sup>nd</sup> day [%]		1 <sup>st</sup> day [%]		2 <sup>nd</sup> day [%]	
	PM	CPC	PM	CPC	PM	CPC	PM	CPC
NEDC c.	42.0	40.6	47.2	41.3	55.7	56.1	55.0	50.8
NEDC w.	37.9	31.0	ND	ND	59.8	50.2	ND	ND
FTP 75 w.	42.1	31.9	46.8	35.6	60.5	55.2	61.2	53.4
CADC Urb w.	26.4	28.9	47.1	32.2	60.5	54.9	61.7	50.0
CADC Rd w.	2.9	23.8	13.3	25.0	49.6	49.8	43.9	48.1
CADC Mw w.	37.6	35.9	40.8	36.6	63.4	61.7	59.9	58.0
NYCC w.	3.8	58.2	27.7	60.0	39.6	67.0	27.2	61.8
BAB w.	16.5	24.6	28.4	28.8	41.2	45.8	51.9	46.8
–	Filter C				Filter D			
	1 <sup>st</sup> day [%]		2 <sup>nd</sup> day [%]		1 <sup>st</sup> day [%]		2 <sup>nd</sup> day [%]	
	PM	CPC	PM	CPC	PM	CPC	PM	CPC
NEDC c.	38.1	30.6	33.3	26.6	31.3	32.5	25.0	35.6
NEDC w.	26.4	19.8	ND	ND	33.3	29.9	–	–
FTP 75 w.	37.9	20.7	40.3	24.8	30.3	31.1	45.9	38.9
CADC Urb w.	17.6	29.3	52.9	24.9	44.4	35.9	49.9	38.3
CADC Rd w.	10.8	22.3	–1.1	14.5	17.3	32.0	6.8	35.5
CADC Mw w.	32.8	30.9	33.4	27.9	44.3	37.1	48.1	42.3
NYCC w.	22.6	27.2	17.0	20.8	25.0	34.2	33.2	38.0
BAB w.	18.9	18.3	9.4	14.1	19.2	32.5	30.8	37.6

The particle-count evaluation before/after the filter, at the same operating points, shows completely different values. This is because particle counting does not detect the large blow-off particle agglomerates.

### Fuel consumption

The fuel consumption was measured during all tests. Minor improvements and minor deterioration were recorded. These are in the scatter band. No definitive statement can be made about the influence of these open filter systems on the engine fuel economy.

This is consistent with the measured back-pressures of the filters. The pressure loss, even at the highest speeds and loads was a maximum of 100 mbar more than the baseline with muffler. This 100 mbar, compared to the indicated mean pressure of the passenger car engine at the operating points, represents an increased engine pumping work of 1–2%. This should cause a small fuel penalty but could not be experimentally confirmed.

### Risk of clogging

No clogging occurred during these investigations. Clogging of “open” systems however cannot be excluded, as reported elsewhere [29]. Filters may clog when the vehicles are operated at low loads, so that no regeneration occurs, and simultaneously there is high lubricating oil consumption. In such systems, sticky layers can block the fine cells.

Consequently, the back-pressure and therefore the exhaust-gas temperature increases and may trigger a hazardous uncontrolled regeneration. Heat release during this event can destroy the underfloor catalytic converter and may be a risk of fire.

### Ash accumulation

The manufacturers of most open filters claim that ash particles cannot clog the filter and are emitted into the atmosphere. If this is true then ash particles which are probably orders of magnitude more toxic than the soot particles [30] will be released to the atmosphere – not a desirable attribute. Filtration of exhaust-gas should also comprise the filtration of ash particles.

If it is not true then there is a danger that fine ash particle can irreversibly accumulate in the partial-flow filter. The low storage capacity of these filter media causes an irreversible shift in the ratio of partial-flow/main-flow, and consequently to lower the filtration efficiency. An investigation of ash accumulation requires long test times but is highly desirable.

To clarify the basic processes, a test was run with metallic fuel additive, which forms oxide clusters in the size range 20–30 nm. Figure 7 shows that the filter system A was indeed not very effective in curtailing soot emissions. But when a Fuel Borne Catalyst (FBC) was used, some of the additive particles were trapped in the filter system, many however were emitted, which would never be acceptable in full-flow filters.

### Zużycie paliwa

Podczas wszystkich testów zmierzono również zużycie paliwa. Jego wartości charakteryzują się dużym rozrzutem pomiarowym. Nie można stwierdzić definitywnie, jaki jest wpływ otwartych układów filtrujących na zużycie paliwa. Jest to zgodne ze zmierzonymi wartościami przeciwcisnienia w filtrach. Przeciwcisnienie nawet przy największych prędkościach i obciążeniach wynosiło maksymalnie 100 mbar w stosunku do pomiaru bazowego z tłumikiem. Wartość 100 mbar, w porównaniu ze wskazanym średnim ciśnieniem efektywnym silnika samochodu osobowego w punktach roboczych, przedstawia zwiększoną pracę pompowania silnika o 1–2%. Powinno to spowodować niewielkie zwiększenie zużycia paliwa, czego jednak nie można potwierdzić eksperymentalnie.

### Ryzyko zapychania się filtra

W trakcie badań nie wystąpiło zjawisko zapychania się filtra. Nie można jednak wykluczyć zapychania się układów “otwartych”, jak napisano w publikacji [29]. Filtry mogą zapychać się podczas eksploatacji pojazdu przy małym obciążeniu, gdy nie następuje regeneracja, a jednocześnie mamy do czynienia z dużym zużyciem oleju smarującego. W takich układach powłoki lepkie mogą blokować drobne komory.

W rezultacie wzrasta przeciwcisnienie i tym samym temperatura gazów wylotowych, co może spowodować niekontrolowaną regenerację. Uwalnianie ciepła podczas tego zdarzenia może zniszczyć reaktor katalityczny i stanowić ryzyko pożaru.

### Gromadzenie się popiołu

Producenci większości filtrów otwartych twierdzą, że cząstki popiołu nie mogą zapchać filtra i są emitowane do atmosfery. Gdyby to była prawda, cząstki popiołu, które są prawdopodobnie wielokrotnie bardziej toksyczne niż cząstki sadzy [30], byłyby uwalniane do atmosfery – nie jest to pożądane zachowanie. Filtracja spalin powinna również zakładać filtrację cząstek popiołu. Jeżeli nie jest to prawdą, wówczas istnieje niebezpieczeństwo, że drobne cząstki popiołu mogą

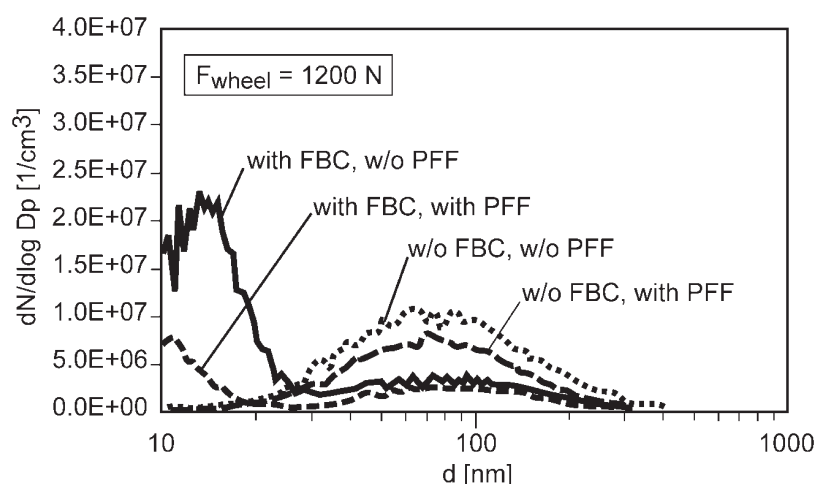


Fig. 7. Penetration and accumulation of small ash particles in the filter system A

Rys. 7. Przenikliwość i akumulacja bardzo małych cząstek w filtrze A



### Repercussion on the engine

In European passenger car Diesel engines of emission category Euro 3,  $\text{NO}_x$  emissions are usually controlled through Exhaust-Gas Recirculation (EGR). If this EGR is not backpressure controlled the engine may become very sensitive if back-pressure rises due to filter soot loading. Also in these tests, the raw emission of the engine increased with back-pressure, despite the modest back-pressures. This is shown in Tab. 13.

If the back-pressure rises, due to filter clogging, then the raw emission of the engine increases. This diminishes the overall filter efficacy.

Table 13. Influence of back-pressure on the raw emission of the engine. Load variation at 85 km/h

Tabela 13. Wpływ przeciwcisnienia na emisję cząstek stałych z silnika; zmienne obciążenie przy 85 km/h

–	Particle concentration $\times 10^7$ / koncentracja cząstek $\times 10^7$	
	Without filter/bez filtra	With filter/z filtrem
0	3.6	3.3
400 N	2.1	2.6
800 N	1.05	1.16
1200 N	0.44	0.53
1600 N	0.48	0.55

### 5. Partial flow filter in HD-vehicles

The effect of partial-flow filters in HD onroad vehicles is extensively reported by the authors in [17]. Unlike the results reported in this paper, conditions in heavy duty road vehicles are more favorable because the exhaust-gas temperatures are usually higher. Also the  $\text{NO}_x$  level is higher in vehicles of Euro III and earlier.

It is indeed possible to design partial-flow filters for HD-vehicles so that it can have a filtration efficiency of 50% and more, provided continuous regeneration is ensured. If not, the partial-flow filter will be soot burdened and the filtration efficiency will drift to lower values [17] and all the negative effects as they were observed here with LDV will happen as well.

Furthermore it has to be noted that while passenger cars usually already have a DOC prior to filter retrofit, HD vehicles have not. They must first be equipped with a DOC in order to permit the use of such a partial-flow filter unless the part flow filter will have an integrated DOC. Thus  $\text{NO}_2$  created for regeneration is a new pollutant in the exhaust-gas of the HDV. The toxicity of this  $\text{NO}_2$  must be scrutinized for certain locations.

### 6. Cost/benefit – analysis of particle filter retrofit

Retrofit plans have no business justification. They cause substantial investment and operating costs. The cost-benefit ratio, i.e. the ratio of the invested funds to particle emission curtailment, is expressed as Euro/kg soot.

As an example: consider the retrofitting of a passenger car having an anticipated rest-of-life of 100'000 km, an

nieodwracalnie nagromadzić się w filtrze częściowego przepływu. Niewielka zdolność magazynowania tego filtra powoduje nieodwracalną zmianę w ruchu obejściowym/głównym, a w konsekwencji obniża wydajność filtracji. Badanie gromadzenia się popiołu wymaga długotrwałych testów, jednak jest bardzo potrzebne.

W celu wyjaśnienia procesów podstawowych przeprowadzono test z dodatkiem paliwa metalicznego, które tworzy wiązki tlenków o rozmiarach 20–30 nm. Rysunek 7 pokazuje, że układ filtrujący A nie był zbyt skuteczny w ograniczaniu emisji sadzy. Jednak po zastosowaniu, opartego na związkach kompleksowych żelaza, dodatku typu FBC (*Fuel Borne Catalyst*), niektóre cząstki były filtrowane przez układ, wiele jednak zostało uwolnionych, co nigdy nie miałyby miejsca w filtrach pełnego przepływu.

### Wpływ na silnik

W silnikach o ZS europejskich samochodów osobowych kategorii Euro 3, emisja  $\text{NO}_x$  zwykle jest kontrolowana przez system recyrkulacji spalin (EGR). Jeśli EGR nie jest sterowany przeciwcisnieniem, silnik może być wrażliwy na wzrost ciśnienia wskutek obciążenia filtra sadzą. Również w wykonywanych testach pierwotna emisja silnika wzrastała przy wzroście przeciwcisnienia, pomimo że było ono niewielkie. Problem ten przedstawiono w tab. 13.

Przy wzroście przeciwcisnienia, na skutek zapychania się filtra, wzrasta emisja pierwotna silnika. Zmniejsza to całkowitą wydajność filtra.

### 5. Filtry o częściowym przepływie spalin w pojazdach ciężarowych

Zastosowanie filtrów o częściowym przepływie spalin w pojazdach drogowych HD szeroko opisano w [17]. W przeciwieństwie do wyników przedstawionych w niniejszej pracy, warunki eksploatacyjne pojazdów ciężarowych są korzystniejsze, ponieważ zwykle temperatura spalin jest wyższa. Poziom  $\text{NO}_x$  także jest wyższy w pojazdach kategorii Euro III i wcześniejszych.

Można rzeczywiście tak skonstruować filtry częściowego przepływu dla pojazdów ciężarowych, aby osiągały wydajność filtracji rzędu co najmniej 50%, pod warunkiem zapewnienia ciągłej regeneracji. W przeciwnym razie filtr taki będzie magazynował sadzę, a wydajność filtracji zmniejszy się [17] i nastąpią negatywne skutki, jakie zaobserwowano dla samochodów osobowych. Co więcej, należy zauważyć, że samochody osobowe zwykle posiadają już reaktory katalityczne przed filtrem, natomiast nie mają go pojazdy ciężarowe. Należy je najpierw wyposażać w reaktory katalityczne, co umożliwi zastosowanie filtra o częściowym przepływie, chyba że taki będzie wbudowany w DOC. Zatem  $\text{NO}_2$  wytworzony do regeneracji jest nowym czynnikiem w spalinach pojazdów ciężarowych.

### 6. Koszt a korzyść – analiza zastosowania filtra cząstek stałych

Relację koszt–korzyść, tzn. stosunek zainwestowanych funduszy do ograniczenia emisji cząstek stałych wyrażono w euro/kg sadzy. Oto przykład: rozważmy modernizację

average PM emission of 0.04 g/km and a filtration efficiency of 30% on average: the retrofit will prevent an emission of 1.2 kg of soot. The purchase price and retrofitting costs of the filter may be about Euro 750 for a midsize car. Hence, the cost/benefit factor is Euro 625 per kg soot. This is illustrated in Tab. 14.

The cost/benefit analysis of HD road vehicles with full-flow filters yields substantially better value:

The emission of 0.1 g/kW·h is eliminated from a Euro 3 vehicle. Assuming a life of 10,000 operating hours and average performance of 100 kW, the emission of 100 kg soot is prevented. Retrofit costs plus operating costs may be Euro 7,500 for individual retrofits. The cost/benefit factor is 75 Euro/kg soot.

This factor improves to < 50 Euro/kg for older vehicles of larger production volume [31] and higher production volumes.

Maximum environmental benefits therefore require highly efficient filters on long-life HD-vehicles, instead of low efficiency filters on either HD or LD vehicles to provide high benefit at low cost for the society.

## 7. Global warming potential GWP

Diesel's share in the European passenger car fleet is increasing rapidly. It is justified on the Diesel engines' better thermodynamic efficiency, hence smaller CO<sub>2</sub> footprint. This facilitates achieving the automobile industry's self-imposed objective to reduce global warming.

However, atmospheric soot particles also have a very high potential for global warming. These particles absorb sunlight and radiate heat, in the infrared range, thus warming the atmosphere. Acc. to [32, 33] the global warming potential of black carbon (BC) particles finely dispersed in the atmosphere is enormous: per kg, BC causes 360,000–840,000 times higher global warming than CO<sub>2</sub>.

Spark ignition (SI) engines emit much less particles. Table 15 presents a simplified comparison.

To restrict global warming potential at the SI engine level, and assuming a CO<sub>2</sub>-difference of 15% between Diesel and SI, average Diesel engines must be fitted with particle filters having a filtration efficiency of at least 98%. Only filters with better efficiencies enable Diesel technology to cause less global warming than SI engines.

Table 14. Cost/benefit for HD-truck with a full flow filter compared to a passenger car equipped with so-called "low-cost" partial-flow filter

Tabela 14. Koszty–korzyści dla pojazdów ciężarowych z filtrem pełnego przepływu w porównaniu do filtrów o częściowym przepływie stosowanych w pojazdach osobowych

	HDV	LDV
PM-Emission/emisja PM	0.1 g/kW·h	0.04 g/km
Mileage/przebieg	500 hrs/y	10,000 km/y
Average performance/średnia moc maksymalna [kW]	100	10
PM emission/emisja PM [kg/year]	5	0.4
Overall vehicle life/długość życia pojazdu [year]	20	10
Emission/emisja [kg/vehicle life]	100	4
Filter type/typ filtra	wall flow/ pełny przepływ	partial flow/ przepływ częściowy
Filter efficiency/sprawność filtra [%]	99.9	30
Filter cost/koszt filtra [euro]	7500	750
Total prevented soot/całkowita masa zgroźonej sadzy [kg/vehicle life]	100	1.2
Cost/benefit/koszt/korzyść [EUR/kg soot]	75	625

samochodu osobowego o przewidywanej żywotności 100 000 km, o średniej emisji PM wynoszącej 0,04 g/km oraz średniej wydajności filtracji 30%: modernizacja zapobiegnie emisji 1,2 kg sadzy. Cena zakupu i koszty modernizacji zastosowanego filtra mogą wynieść około 750 euro w przypadku samochodu średniej wielkości. Zatem czynnik koszt–korzyść to 625 euro na kilogram sadzy. Przykład ten zilustrowano w tab. 14.

Analiza koszt–korzyści pojazdów ciężarowych z filtrami pełnego przepływu daje znacznie lepsze wyniki: z pojazdu kategorii Euro III usuwane jest 0,1 g/kW·h. Zakładając jego żywotność 10 000 h i średnie osiągi 100 kW, zapobiegamy emisji 100 kg sadzy. Koszty modernizacji indywidualnej pojazdu oraz koszty operacyjne mogą wynieść 7500 euro. Czynnik koszt–korzyść wynosi 75 euro/kg sadzy.

Czynnik ten wynosi poniżej 50 euro/kg w przypadku pojazdów starszych, o większej objętości silnika [31].

Uzyskanie maksymalnych korzyści dla środowiska wymaga zatem wysoce wydajnych filtrów w pojazdach ciężarowych o długiej żywotności, a nie mało wydajnych filtrów w pojazdach ciężarowych lub lekkich.

## 7. Problem globalnego ocieplenia

Udział silników o ZS w europejskim rynku samochodowym gwałtownie wzrasta. Przyczyną jest lepsza wydajność termodynamiczna silników, a tym samym mniejsza emisja CO<sub>2</sub>. Ułatwia to przemysłowi motoryzacyjnemu osiągnięcie celu, który przed sobą postawił: zmniejszenie globalnego ocieplenia. Za globalne ocieplenie odpowiedzialne są cząstki sadzy będące aerozolem atmosferycznym. Cząstki te pochłaniają światło słoneczne i emitują ciepło w zakresie podczerwieni, tym samym ocieplając atmosferę. Zgodnie z [32, 33] cząstki węgla czarnego (BC) drobno rozproszone w atmosferze stanowią olbrzymie ryzyko pogłębienia globalnego ocieplenia: 1 kg BC powoduje od 360 000 do 840 000 razy większe globalne ocieplenie niż CO<sub>2</sub>.

Silniki o zapłonie iskrowym emitują o wiele mniej cząstek. W tabeli 15 przedstawiono uproszczone zestawienie.

Table 15. Relative Global Warming Potential (GWP) of Diesel-engines including black carbon effects on GWP with and w/o filters compared to SI engines

Tabela 15. Względny potencjał globalnego ocieplenia (GWP) dla silników o ZS ujmujący emisję węgla z filtrem i bez filtra cząstek stałych w porównaniu do silników o ZI

	LDV SI without filter/LDV ZI bez filtra	LDV Diesel w/o filter/LDV ZS bez filtra	LDV Diesel with FFF/LDV ZS z filtrem pełnego przepływu	LDV Diesel with PFF/ LDV ZS z filtrem o częściowym przepływie
CO <sub>2</sub> -emission/emisja CO <sub>2</sub> [g/km]	SI/CI=1.15 184	160	160	160
Soot-emission/emisja sadzy [g/km]	0.002	0.04	99.9% 0.00004	30% 0.028
Rel. GWP due to CO <sub>2</sub> / względny GWP do CO <sub>2</sub>	normalized 1	0.87	0.87	0.87
Rel. GWP due to soot/ względny GWP do sadzy	6,5	130	0.13	91.3
Total rel GWP/całkowity względny GWP	7.5	130.87	1	92.2

W celu ograniczenia wzrostu globalnego ocieplenia dla silników o ZI i przyjmując różnicę 15%, jeśli chodzi o emisję CO<sub>2</sub> między silnikiem o ZS a ZI, średni silnik o ZS należy wyposażać w filtry PM o wydajności filtracji co najmniej 98%. Tylko filtry o zwiększonej wydajności sprawiają, że konstrukcje silników o ZS wywołują mniejsze ocieplenie globalne niż silniki o ZI.

## 8. Recommended test methods

A test method to curtail particle emissions, whose only metric is the particulate mass, does not adequately reflect the health aspects [36]. The alveoli penetrating particles are smaller than 1 μm and their influence culminates in the size range of about 20 nm [1]. If the attributes of particle filters are not determined size-specific to this toxic range, then statements on filtration efficiency have no relevance. The larger particles dominate the particulate mass. Hence, the PM metric is inappropriate for toxicity evaluation and curtailment.

Beside ozone, lead and sulfur respiratory air quality legislation also limits particulate mass PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub>, which both mostly originate from road traffic. Methods to curtail particle emissions must therefore simultaneously ensure that the NO<sub>2</sub> emissions do not increase.

Fundamental re-thinking is needed of the following two test aspects. Firstly, the testing of retrofit filters in standard driving cycles. Secondly, the conditioning routine of expelling accumulated particles. More suitable test procedures are worst-case protocols, which scrutinize the store-and-release phenomena, the extreme operating situations at lighter loads, at high space velocities, and under transient operating conditions.

## 9. Overall penetration

Filtration means that soot is intercepted and stored in a filter substrate. Not to reach the atmosphere requires in addition that this soot is converted to CO<sub>2</sub>. Clearly these are two processes with different prerequisites. Mastering both only guarantees that soot does not penetrate into the environment. The overall penetration P of engine soot reaching the atmosphere is calculated from the product of filtration efficiency AG and regeneration efficiency RG to  $P = 1 - AG \times RG$ .

Full-flow filters have filtration efficiencies > 0.99. The regeneration efficiency is almost 1, otherwise the filter would soon clog and become ineffective. Overall penetration into the atmosphere is < 0.01 or 1% of engine emitted soot. Prerequisites are complex regeneration equipment, and

## 8. Zalecane metody testowe

Metoda testowa ograniczenia emisji cząstek stałych, której jedyną miarą jest masa PM, nie odzwierciedla prawidłowo wpływu na zdrowie człowieka [36]. Cząstki penetrujące pęcherzyki płucne nie przekraczają 1 μm, a największy wpływ mają cząstki o wymiarach około 20 nm [1]. Jeśli nie określi się cech filtrów pod względem stosunku wielkości do ich toksyczności, to wszelkie stwierdzenia na temat wydajności filtracji nie mają znaczenia. Większe cząstki przeważają w masie cząsteczkowej. Zatem metodyka pomiarów PM jest niewłaściwa w przypadku oceny i ograniczania toksyczności. Poza tym przepisy dotyczące ozonu, ołowiu i siarki także ograniczają masę cząstek PM<sub>2.5</sub> i NO<sub>2</sub>, które powstają w ruchu ulicznym. Tym samym metody ograniczania emisji PM muszą jednocześnie uniemożliwiać wzrost emisji NO<sub>2</sub>.

Należy przemyśleć następujące dwa aspekty: po pierwsze testowanie wprowadzanych filtrów w standardowych cyklach jazdy, po drugie emisję nagromadzonych cząstek. Bardziej odpowiednie procedury testowe to ostatecznie protokoły, które analizują zjawiska magazynowania i uwalniania, sytuacje eksploatacyjne przy mniejszych obciążeniach, dużych natężeniach przepływu spalin i w zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

## 9. Penetracja całkowita

Filtracja oznacza przechwytywanie sadzy i magazynowanie jej w filtrze. Niedopuszczenie jej do atmosfery dodatkowo wymaga przekształcenia jej w CO<sub>2</sub>. Oczywiście te dwa procesy wymagają różnych warunków początkowych. Prawidłowe zestawienie obydwu gwarantuje, że sadza nie przedostanie się do środowiska. Całkowitą penetrację P sadzy silnikowej, która dostała się do atmosfery oblicza się z wydajności filtracji AG i skuteczności regeneracji RG, co daje  $P = 1 - AG \times RG$ .

Filtry pełnego przepływu charakteryzują się wydajnością filtracji powyżej 0,99. Wydajność regeneracji to prawie 1, w przeciwnym razie filtr szybko by się zapchał i zmniejszył skuteczność. Całkowita penetracja sadzy emitowanej przez silnik do atmosfery to poniżej 0,01 lub 1%. Regeneracja



on-board diagnostics. Regeneration does not eliminate ash and other inert substances. These accumulate in the filter, and may only partially escape at the tail-pipe when the filter pores are too coarse ( $> 20 \mu\text{m}$ ).

Partial-flow filters can be designed for 50% filtration efficiency. The actual filtration rate is often worse, as reported in this paper. So even in favorable circumstances, 50% of the engine originated soot directly reaches the atmosphere. Some of the intercepted and stored soot also later escapes into the atmosphere. The quantity depends on the regeneration efficiency integrated over the driving cycle. Regeneration in partial flow filters is exclusively  $\text{NO}_2$  enabled. The  $\text{NO}_2$  is formed on platinum catalysts and subsequently can release an oxygen radical in the soot cake. The regeneration is thus a two-stage chemical process. The two stages (catalytic oxidation of NO and oxidation of C) are sequential, disparate and partially follow opposing chemical dynamics. The catalytic formation of  $\text{NO}_2$  has its maximum at about  $350^\circ\text{C}$  and, for equilibrium reasons, rapidly decreases at higher temperatures [35]. The oxidation of C begins at  $250^\circ\text{C}$ , proceeds very slowly and only attains higher reaction rates above  $400^\circ\text{C}$ . Thus, the engine generated  $\text{NO}_2$  during idling (approx. 25% of  $\text{NO}_x$ ) is useless for soot burn-off. Moreover, the availability of  $\text{NO}_2$  is limited. Depending on the driving cycle, only 30–50% of the engine originated NO is converted into  $\text{NO}_2$ . The gravimetric stoichiometric ratio  $\text{NO}_2/\text{C}$  is 7.6. Experience shows that twice this ratio is actually needed.

The data for the tested Euro 3 engine: particle emission limit in NEDC is  $50 \text{ mg/km}$  and the  $\text{NO}_x$  limit is  $500 \text{ mg/km}$ . The maximum available  $\text{NO}_2$  per km is therefore  $150 \text{ mg/km}$  to  $250 \text{ mg/km}$ , which at double stoichiometry can oxidize 9.8 to a maximum of  $16.4 \text{ mg soot per km}$ . Regeneration is thus constraining the performance of such partial-flow filters. Assuming 50% filtration, the calculated regeneration rate is thus 39 to 65%, which is close to the 45% measured in [13], the rest of the intercepted soot must be blown-off. The combined best case with 50% filtration and 65% regeneration reaches an overall penetration rate of  $1 - 0.5 \times 0.65 = 67\%$ . If filtration is only 30% [5] and 45% of the intercepted soot are regenerated [13], the overall penetration will be 86%, only 14% of the engine emitted soot will be converted to  $\text{CO}_2$ . Penetration of 86% must be compared to the penetration 0.1% of a good wall flow filter – leading to a quality comparison of 86/0.1 which means that PMS releases 860 times more particles to the atmosphere, which is the real effect on the environment [34].

## 10. Conclusions

Three of the four tested retrofit systems, for curtailing particle emissions from Diesel passenger cars, did not fulfill the expectations in the short duration tests that were performed. Filters which attained the minimum 30% efficiency in the new state, deteriorated substantially in driving cycles comprising lower loads, higher dynamics or higher space velocities. Moreover, all four partial-flow filters tend to soot deposition and stochastic release, which cause high smoke emissions unacceptable in traffic situations.

nie eliminuje popiołu ani innych substancji. Akumulują się one w filtrze i tylko częściowo mogą ulec emisji do układu wylotowego, gdy cele filtra są zbyt duże ( $> 20 \mu\text{m}$ ).

Filtry o częściowym przepływie spalin mogą mieć 50% sprawności filtracji. Filtracja rzeczywista często jest gorsza, co opisano w niniejszym artykule. Zatem nawet w korzystnych okolicznościach 50% sadzy powstałej z silnika trafia bezpośrednio do atmosfery. Część przechwyconej i zmagazynowanej sadzy także emitowana jest do atmosfery. Jej ilość zależy od wydajności regeneracji w trakcie jazdy. Regeneracja w filtrach o częściowym przepływie możliwa jest wyłącznie z wykorzystaniem  $\text{NO}_2$ .  $\text{NO}_2$  tworzy się na katalizatorze platynowym i w konsekwencji może uwolnić tlen pierwiastkowy. Regeneracja jest zatem dwuetapowym procesem chemicznym. Te dwa etapy (utlenienie katalityczne NO i utlenienie węgla) są sekwencyjne. Katalityczne tworzenie się  $\text{NO}_2$  osiąga swoje maksimum dla około  $350^\circ\text{C}$  i dla zachowania równowagi gwałtownie spada w wyższej temperaturze [35]. Utlenianie węgla rozpoczyna się w temperaturze  $250^\circ\text{C}$ , postępuje bardzo wolno i osiąga wyższe wartości reakcji powyżej  $400^\circ\text{C}$ . Tym samym  $\text{NO}_2$  wytworzone przez silnik na biegu jałowym (około 25%  $\text{NO}_x$ ) jest beзуyteczne dla wypalania sadzy. Co więcej, dostępność  $\text{NO}_2$  jest ograniczona. W zależności od warunków jazdy tylko 30–50% NO wytworzonego przez silnik jest przetworzone w  $\text{NO}_2$ . Masowy stosunek stechiometryczny  $\text{NO}_2$  do C wynosi 7,6. Badania wskazują, że wymagana jest dwukrotnie większa wartość.

Dane dla testowanego silnika kategorii Euro 3: limit emisji cząstek PM w teście NEDC wynosi  $50 \text{ mg/km}$ , a limit  $\text{NO}_x$  to  $500 \text{ mg/km}$ . Osiągalna wartość maksymalna  $\text{NO}_2$  na km to zatem  $150$  do  $250 \text{ mg/km}$ , co przy podwójnym stosunku stechiometrycznym może utleniać 9,8 do maksymalnie  $16,4 \text{ mg sadzy na km}$ . Regeneracja zatem ogranicza działanie filtrów o częściowym przepływie spalin. Przyjmując poziom 50-procentowej filtracji, obliczona wartość regeneracji wynosi 39 do 65%, co jest bliskie 45% zmierzonym w [13], pozostała przechwycona sadza musi być wydalona. Najlepszy możliwy przypadek połączenia 50% filtracji i 65% regeneracji pozwala osiągnąć całkowitą wartość penetracji  $1 - 0,5 \times 0,65 = 67\%$ . Jeśli filtracja wynosi jedynie 30% [5], a 45% przechwyconej sadzy ulega regeneracji [13], całkowita penetracja wyniesie 86%, tylko 14% z sadzy emitowanej przez silnik zostanie przetworzone na  $\text{CO}_2$ . Penetrację 86% należy porównać do penetracji 0,1% z nowego filtra – co prowadzi do porównania jakościowego 86/0,1; oznacza to, że PMS uwalnia do atmosfery 860 razy więcej cząstek PM, co stanowi rzeczywisty wpływ na środowisko [34].

## 10. Wnioski

Jeśli chodzi o ograniczanie emisji cząstek stałych przez samochody osobowe z silnikami o ZS, trzy z czterech testowanych układów nie spełniły oczekiwań. Filtry, które osiągnęły co najmniej 30% wydajności w stanie nowym, ulegały znaczącemu pogorszeniu w testach jezdnych z małymi obciążeniami, większą dynamiką i większym natężeniem przepływu spalin. Co więcej, we wszystkich czterech filtrach



Test procedures must be enhanced to include these aspects. That would provide the guidelines for a retrofit technology, which ensures sustainable emission curtailment. Simultaneously, the cost/benefit ratios must reach an acceptable range and also the global warming potential. Finally the emitted number of particles must become the decision criterion and not the reduced mass.

### Acknowledgement

This investigation was performed within the research-project “Messtechnische Untersuchung offener Partikelminderungssystemen FKZ: 20545125/01” directed by the German Environmental Agency UBA and financed by the Federal Republic of Germany in 2006. All results, which are the basis of this report were published by UBA 2007 on their homepage under <http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/techemissmm/technik/pms.htm>. The authors would like to express their sincere thanks to UBA for providing the opportunity for this investigation. The authors would also like to thank the Swiss Environment Protection Agency BAFU for supporting the investigation of System A installed in a HD-truck.

Artykuł recenzowany

o częściowym przepływie spalin wystąpiła stochastyczna tendencja do osadzania się i uwalniania sadzy, co powoduje duże dymienie, niedopuszczalne w warunkach drogowych. W procedurach testowych należy uwzględnić również te warunki. W ten sposób powstaną wytyczne do modernizacji badań, zapewniające trwałe ograniczenie emisji. Jednocześnie stosunek koszt–korzyść powinien znajdować się w dopuszczalnym zakresie, również dla zagrożenia globalnym ociepleniem. Także liczba emitowanych cząstek stałych, a nie masa PM, muszą być kryterium decydującym.

### Podziękowania

Badania wykonano w ramach projektu badawczego “Messtechnische Untersuchung offener Partikelminderungssystemen FKZ: 20545125/01”, którym kierowała Niemiecka Federalna Agencja Ochrony Środowiska i który był sfinansowany przez Republikę Federalną Niemiec w 2006 r. Wszystkie wyniki będące podstawą tego sprawozdania opublikowano przez UBA w 2007 r. na stronie internetowej tej organizacji pod adresem <http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/techemissmm/technik/pms.htm>. Autorzy dziękują Niemieckiej Federalnej Agencji Ochrony Środowiska za umożliwienie tego badania oraz dziękują Szwajcarskiemu Federalnemu Urzędowi do Spraw Ochrony Środowiska za wspieranie badań nad układem A zainstalowanym w pojeździe ciężarowym.

### Acronyms/Skróty

Euro	Currency EUR (approx. 1.39 US\$)/kurs euro (około 1,39 dolara)
AG	Filtration rate/współczynnik filtracji
BAB	German Autobahn Cycle
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CPC	Condensation Nucleus Counter/kondensacyjno-nukleacyjny licznik cząstek stałych
CVS	Dilution tunnel/tunel rozcieńczający
DC	Diffusion charging/ladowanie dyfuzyjne
DR	Dilution ratio/współczynnik rozcieńczenia
DOC	Diesel Oxidation Catalyst/reaktor utleniający do silników o ZS
ELPI	Electrical Particle Impactor/impaktor niskiego ciśnienia
FTP	Federal Test Procedure/federalny test jezdny (w USA)
NEDC	New European Driving Cycle/nowy europejski test jezdny
NYCC	New York City Cycle/test miejski Nowego Jorku

PAS	Photoelectric Aerosol-Sensor/analizator fotoelektryczny
PM	Particulate mass/masa cząstek stałych
PMP	Particle Measurement Program; an UN-ECE-program 2003-2007 to develop a number based particle measurement protocol, leading to [36]/Program Pomiaru Cząstek Stałych; projekt z lat 2003-2007 mający na celu rozwój metod badawczych do oceny liczby cząstek stałych
PMS	«Partikelminderungssystem» – particle reduction system reaching at least 30% reduction of PM/system redukcji cząstek stałych zapewniający 30-procentową skuteczność filtracji
VERT	Verification of Emission Reduction Technology; a particle filter verification protocol used by Swiss authorities since 1998 [1]/Weryfikacja Technologii Redukcji Emisji; protokół weryfikacji skuteczności filtrów cząstek stałych wykorzystywany przez władze Szwajcarii od 1998 r.

### Bibliography/Literatura

- [1] Mayer A. et al.: Quality standards and test procedures for particle filters to retrofit utility vehicles. MTZ 00/2009.
- [2] Belot G. et al.: Passenger Car Serial Application of a Particulate Filter System on a common-rail Direct Injection Diesel Engine. SAE 2000-01-0473, Detroit 2000.
- [3] Eckerle W.A.: Technology for Advanced Heavy Duty Diesel Engines. 12<sup>th</sup> ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich 2008.
- [4] Mayer A. et al.: Reliability of DPF-Systems: Experience with 6000 Applications of the Swiss Retrofit Fleet. SAE 2004-01-0076, Detroit 2004.
- [5] Massnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Partikel von Kraftfahrzeugen mit Selbstzündungsmotor. Anhang zu Artikel 1 Nr. 4, Anlage XXVI, zu § 47 Abs. 3a der Strassenverkehrszulassungsordnung der Bundesrepublik Deutschland.

- [6] Rexeis M., Hausberger S.: ARTEMIS, Assessment and Reliability of Transport Emission Models in Inventory Systems. Final Report of the WP400-Heavy Duty Vehicles Emission; Institut für Vkm and Thd, TU-Graz 2003.
- [7] Rembor H.J.: Hot Gas Filtration of Fine and Ultra Fine Particles. Particle Filter Retrofit for all Diesel Engines, Expert Verlag ISBN 978-3-8169-2850-8.
- [8] Okawara S. et al.: Soot trapping and continuously oxidizing behaviour by flow-through Metallic PM filter. Toyota Motor Corp., Emitec, JSAE Annual Congress Sept. 2005, paper No. 20055824.
- [9] Koltsakis G.C. et al.: Filtration and Regeneration Performance of a Catalyzed Metal Foam Particulate Filter, Aristotle Univ. Thessaloniki, Inco Special Products, SAE 2006-01-1524, Detroit 2006.
- [10] Kolke R. et al.: Einsatz wechselnder Filtersysteme und Regenerationsverfahren für die Nachrüstung von PKW, LKW, Baumaschinen. „Dieselabgas-nachbehandlung“, München 11–12. Juli 2006, CTI Car Training Institute [www.iir-verlag.de](http://www.iir-verlag.de); [info@iir-verlag.de](mailto:info@iir-verlag.de); [www.car-training-institute.com](http://www.car-training-institute.com)
- [11] Mayer A. and 50 co-authors: Particle Filter Retrofit for all Diesel Engines. published by Expert-Verlag, 2008, ISBN 978-3-8169-2850-8.
- [12] Andrews G.E. et al.: Particulate Mass Accumulation and Release in Practical Diesel Engine Exhaust Systems under Cold Start conditions. SAE 2000-01-0508, University of Leeds, Ford Research, 2000.
- [13] Kolke R. et al.: ADAC Verbraucherschutztest an Nachrüstfilter für PKW. 6. FAD-Konferenz, Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, November 2008 in Dresden.
- [14] Rüdý C. et al.: Nachrüst-Partikelfilter für Diesel-Personenwagen. EMPA Untersuchungsbericht Nr. 441179, Dezember 2006, EMPA, Überlandstrasse 129, CH 8600 Dübendorf.
- [15] Hausberger S. et al.: Testverfahren und Optimierung für Partikelkatalysatoren. Bericht des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, Inffeldgasse 21A, A-8010, Graz 2006.
- [16] Nylund N.O. et al.: Heavy-duty Vehicles: Safety, Environmental Impacts and new Technology. VTT Annual report 2006.
- [17] Mayer A. et al.: Nanoparticle-Emission of Euro IV and Euro V HDV Compared to Euro III with and without DPF. SAE 2007-01-1112, Detroit 2007.
- [18] Mohr M. et al.: Conventional and New Methods of Particle Measurement. Elimination of Engine Generated Nanoparticles, expert verlag ISBN 3-8169-2552-9.
- [19] Rice M. et al.: Innovative Substrate Technology for High Performance Heavy Duty Truck SCR Catalyst Systems. SAE 2007-01-1577, Detroit 2007.
- [20] Brück R., Reck A.: Retrofit with Particulate Traps – the first Step. Experience and Outlook into the Future; 6.FAD-Conference Dresden, Nov.2008.
- [21] Schrewe K. et al.: SMF – AR Autarkes Partikelfiltersystem für Nach- und Erstausrüstung von LDV und Industriemotoren. 6. FAD-Konferenz, Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, November 2008 in Dresden.
- [22] Bykowski B.: Formulation and Evaluation of Alternate Diesel Particulate Trap Media. Southwest Research Institute, The American Society of Mechanical Engineers, 87-ICE-36.
- [23] Mizra T. et al.: Open-Pore Ceramic Foam as Diesel Particulate Filter. SAE 890172.
- [24] Van Basshuysen, Schäfer: Handbuch Verbrennungsmotor. Published by Vieweg&Sohn, ISBN 3-528-03933-7.
- [25] Jodeit H.: Partikelabscheidung in technischen Tiefenfiltern. VDI-Fortschrittsberichte Verfahrenstechnik Nr.108, VDI-Verlag 1985.
- [26] Mayer A. et al.: Pre-Turbo Application of the Knitted Fiber Diesel Particulate Trap. SAE 940459, Detroit 1994.
- [27] Allansson R. et al.: The use of the Continuously Regenerating Trap (CRTTM) to Control Particulate Emissions: Minimising the Impact of Sulfur Poisoning. SAE 2002-01-1271, Detroit 2002.
- [28] Stationary source emissions – Determination of mass concentration of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) – Reference method: Chemiluminescence; European Standard, EN 14792, June 2005.
- [29] Payne S. et al.: Fundamental Studies of Soot Deposition Using Flow-through Substrates. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich 2008.
- [30] Gojova A. et al.: Induction of Inflammation in Vascular Endothelial Cells by Metal Oxide Nanoparticles: Effect of Particle Composition. Environmental Health Perspectives – Volume 115, Number 3, March 2007.
- [31] U.S. EPA: The Cost Effectiveness of Heavy-Duty Diesel Retrofits and Other Mobile Source Emission Reduction Projects and Programs. EPA 420-B-07-006; May 2007.
- [32] Jacobson M.Z.: Testimony for the Hearing on Black Carbon and Global Warming. Stanford University, United States House of Representative, October 2007.
- [33] Waxman H.A.: Hearing on Black Carbon and Global Warming. US House of Representatives, October 2007.
- [34] Leutert G.: Quality Criteria, Test Methods and Test Standards for Particle Filter Systems. Chapter 7 of [11].
- [35] Görsmann C.: Catalytic Coatings for diesel Particulate Trap Regeneration. Chapter 5.1 of [11].
- [36] Regulation (EC) No. 715/2007 for the European Parliament and the Council of 20. June 2007 on type approval of motor vehicles.

Mr. Andreas Mayer, Dipl. Ing., – Technik Thermische Maschinen, Switzerland.

*Inż. Andreas Mayer – pracownik Termodynamicznej Techniki Maszyn (TTM), Szwajcaria.*

e-mail: [ttm.a.mayer@bluewin.ch](mailto:ttm.a.mayer@bluewin.ch)



Mr. Jan Czerwinski – Prof. Dr – Laborat. for IC-Engines and Exhaust Gas Control, University of Applied Sciences, Biel-Bienne, Switzerland (AFHB).

*Prof. dr Jan Czerwinski – Laboratorium Silników Spalinowych i Kontroli Gazów Wylotowych, Uniwersytet Nauk Stosowanych w Biel-Bienne, Szwajcaria.*

e-mail: [jan.czerwinski@hti.bfh.ch](mailto:jan.czerwinski@hti.bfh.ch)



Mr. Pierre Comte – University of Applied Sciences, Biel-Bienne, Switzerland (AFHB).

*Pierre Comte – Uniwersytet Nauk Stosowanych w Biel-Bienne, Szwajcaria.*

e-mail: [pierre.comte@hti.bfh.ch](mailto:pierre.comte@hti.bfh.ch)

