

4.FAD-Konferenz „Herausforderung Abgasnachhandlung für Dieselmotoren“ Dresden 9.11.2006

## **Nanopartikel-Emissionen von HDV Euro 4 und Euro 5 Dieselmotoren im Vergleich zu Euro 3 mit/ohne Partikelfilter**

**A.Mayer/TTM, M.Kasper und Th.Mosimann /ME, F.Legerer/AKPF  
J.Czerwinski/FHS Biel, L.Emmenegger, J.Mohn, A.Ulrich/EMPA, P.Kirchen/ ETH**

### **Zusammenfassung**

EURO 4 mit PM-Kat und EURO 5 mit SCR zeigten gegenüber EURO 3 ohne Filter in den meisten Betriebspunkten eine moderate Verminderung der Nanopartikel-Konzentration; allerdings wurde bei Vollastbedingungen des EURO 5 eine höhere Partikelkonzentration beobachtet als bei EURO 3 ohne Partikelfilter. Der Teilstromfilter des EURO 4 irritierte durch ein stochastisches Verhalten mit Penetrationsschwankungen bis zum Durchbruch und erwies sich damit als stark beladungsabhängig. Gegenüber dem EURO 3 mit einem VERT-konformen Partikelfilter emittierten die beiden modernen Konzepte 100-500 mal mehr Nanopartikel. Bezüglich der gasförmigen Emissionen zeigte EURO 5 ein sehr gutes Ergebnis, die Konzentrationen von NH<sub>3</sub> und N<sub>2</sub>O blieben im Bereich der Nachweisgrenze, während EURO 4 ausserordentlich hohe NO<sub>2</sub>-Emissionen im mittleren Lastbereich aufwies. Die Vanadium- bzw. Platinkonzentrationen waren im Bereich der Nachweisgrenze.

### **Summary**

EURO 5 showed a very uniform but moderate reduction of solid nanoparticle emissions over the whole size range from 10-400 nm at part loads, while at full load EURO 5 emitted more nanoparticles than EURO 3 probably due to the higher performance setting of this engine. Compared to the DPF-equipped EURO 3 the EURO 4 and 5 emitted 100 – 500 times higher numbers of nanoparticles throughout all size ranges. PM-Kat did not prove to be a stable particle reduction technology since penetration varied between 40-50 % when regenerated and in some cases zero when loaded, also size-specific filtration characteristic showed large scatter in function of load and time in particular with respect to the smallest size classes. Gaseous emissions of Euro 5 were quite good while Euro 4 with PM-Kat showed very high NO<sub>2</sub>-emissions. Metal emissions were very low, in the range of DT in both cases.

### **Einleitung**

Als Nanopartikel werden alle Feststoffpartikel im nanoskaligen Bereich 1-999 nm bezeichnet. Solche Partikel kommen im motorischen Abgas in Sättigungskonzentrationen um 10<sup>7</sup> – 10<sup>8</sup> Partikel pro cm<sup>3</sup> im Grössenbereich 10-500 nm vor, der Mittelwert liegt bei 60-80 nm. Partikel dieser Grösse sind alveolengängig und gelangen nach dem Einatmen durch Penetration der Zellmembranen in kürzester Zeit in den Organismus, selbst ins Gehirn. Sie gelten als gefährlichster verkehrsbedingter Luftschadstoff, sind seit 1989 durch die WHO als krebserzeugend eingestuft – eine Erkenntnis, die auf P. Pott (1775) zurückgeht - und werden als Mitauslöser vielfältiger Krankheitserscheinungen bis hin zu Herzinfarkt, Alzheimer und Parkinson angesehen [1]. Die Bedeutung der Grösse wurde in der Arbeitsmedizin bereits um 1910 erkannt [2]. Die Umweltgesetzgebung verlangt ihre Minimierung unter Einsatz des bestverfügbaren Standes der Technik [3]. Sie können nach Methoden, die Aitkin (1888) eingeführt hat, messtechnisch mit hoher Auflösung bezüglich ihrer Anzahlkonzentration und Grösse erfasst werden, wobei auch die Trennung von Feststoffpartikeln und Kondensattröpfchen, die für das motorische Abgas bei Abkühlung typisch sind, nach dem durch GRPE evaluierten PMP-Messverfahren zuverlässig gelingt [4].

Die europäische Gesetzgebung zur Minimierung der Emissionen von Verbrennungsmotoren hat mit EURO 1 1992 erstmals Grenzwerte für die Partikelemission eingeführt und dabei die unglückliche USA-Definition „PM“ von 1982 übernommen, die zwar ein Messverfahren definiert, aber weder die Grösse der Partikel noch ihre Substanz berücksichtigt und daher für eine toxische Bewertung ungeeignet ist.

Im Gegensatz zur US Clean Air Act sieht die europäische Gesetzgebung keine Limitierung sekundärer Schadstoffe vor, wie sie bei Einführung neuer Technologien, vor allem dann, wenn diese durch katalytische Prozesse im Abgas unterstützt werden, nie ausgeschlossen werden sollten [5]. In der Schweiz besteht dagegen ein Prüfverfahren zur Bewertung von Partikelemissions-Minderungssystemen, genannt VERT [8], das sich auf das Kriterium der Anzahl nanoskaliger Feststoffpartikel abstützt [6] und seit 1990 einen Sekundäremissionstest verlangt [7]. Für die Nachrüstung bei Baumaschinen und Strassenfahrzeugen werden nur Systeme zugelassen, die diese Kriterien nach dem Stand der Technik erfüllen.

Es lag daher nahe, typische nach EURO 4 und EURO 5 zertifizierte Nutzfahrzeuge, die im Vergleich zu EURO 3 mit < 20mg/kWh eine in Relation zur DL ausserordentlich niedrige PM-Emission erreichen, bezüglich ihrer Emission von Nanopartikeln und bezüglich Sekundäremissionen zu überprüfen, um die Frage zu beantworten, ob auch für derart emissionsarme Motoren weiterhin Partikelfilter nach dem VERT-Standard gefordert werden müssen.

## **Testfahrzeuge und Emissionskomponenten**

### Testfahrzeug EURO 3

Marke: Mercedes Benz  
Fahrzeugtyp: 1846 LS-O3  
Motortyp: OM 4001 LA.III/9  
Nennleistung: 355 kW bei 1695 1/min  
max. Drehmoment: 2335 Nm bei 1196 1/min  
km-Stand: 49'051 km  
Ausrüstung zur Abgasminderung:  
nachgerüsteter Partikelfilter: HJS, CRT-System, Sintermetallfilter (VERT-Prüf-Nr. B159/03.05)

### Testfahrzeug EURO 4

Marke: MAN  
Fahrzeugtyp: TGA 18.430 4XBLS-TS  
Motortyp: D 2066 LF 11, EURO 4  
Nennleistung: 316 kW bei 1900 1/min  
max. Drehmoment: 2212 Nm bei 994 1/min  
km-Stand: 31'196 km  
Ausrüstung zur Abgasminderung: Abgasrückführung, gekühlt, PM-Kat

### Testfahrzeug EURO 5

Marke Mercedes Benz  
Fahrzeugtyp: 1896-LS EURO 5  
Motortyp: OM 5001 LA.V5  
Nennleistung: 348 kW bei 1796 1/min  
max. Drehmoment: 2221 Nm bei 1097 1/min  
km-Stand: 2'863 km  
Ausrüstung zur Abgasminderung: SCR mit Adblue-Technologie

### Treibstoff:

Handelsüblicher Diesel nach SN 181 160-1: 2005  
Die Analyse ergab 10 - 15 mg/kg Schwefel

Mit EURO 4 und EURO 5 wurde ein bedeutender Emissionsfortschritt gegenüber EURO 3 erzielt, die PM-Emission wurde von 100 auf unter 20 mg/kWh im ESC-Zyklus gesenkt, die Motoren rauchen nicht mehr – aber ihre Auspuffendrohre sind nach wie vor russgeschwärzt. Auch die NO<sub>x</sub> wurden ganz massiv abgesenkt, wobei allerdings nach wie vor keine Aussagen über das Verhältnis NO<sub>2</sub>/NO im Summenparameter NO<sub>x</sub> gemacht werden. EURO 5 und EURO 3 wurden zum gleichen Zeitpunkt vermessen, EURO 4 mit erweitertem Messaufbau einige Monate später.

### **Prüfstand und Messtechnik**

#### Rollenprüfstand der LARAG AG, Wil

Dieser Rollenprüfstand erlaubt die Einstellung stationärer Betriebspunkte im gesamten Betriebsbereich der Motoren und die Durchführung von Beschleunigungsvorgängen, jedoch nicht die Durchführung von dynamischen Fahrzyklen.

#### Messung gasförmiger Emissionen

Beim EURO 4 und EURO 5 wurden die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und den Stickoxiden (NO, NO<sub>2</sub>) im trockenen Abgas mit Hilfe zweier nicht-dispersiver Infrarotanalysatoren (NDIR) und eines 2-Kanal Chemilumineszenz-Analysators (CLD) bestimmt. Um die Verluste im Permeationstrockner auszuschliessen, wurden die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffe sowie Lachgas (N<sub>2</sub>O) Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) im feuchten heissen Abgas mittels Flammenionisationsdetektor (FID) bzw. Fourier Transform Infrarot (FTIR) Spektrometer analysiert [25]

#### Bestimmung von Metall-Emissionen

Es wurden die Emissionen von Vanadium (V) beim EURO 5 - Fahrzeug mit SCR und an Platin (Pt) beim EURO 4 – Fahrzeug mit PM-Kat bestimmt. Hierzu wurde über den gesamten Fahrzyklus ein volumenproportionales Aliquot des Abgase in saurer wässriger Lösung absorbiert und die Lösung mittels Quadrupol-Plasmamassenspektrometrie (Q-ICP-MS) analysiert.

#### Partikelanalytik

Dazu wurden die folgenden Messverfahren eingesetzt:

- SMPS (TSI)
- NanoMet mit PAS- und DC-Sensorik (Matter Engineering)
- PASS (AVL)
- ELPI (DEKATI)

Die Probenahme wurde für SMPS und NanoMet mit ME-Komponenten nach dem PMP-Verfahren durchgeführt, wobei die Probebeheizung in der Regel bei 300°C eingestellt wurde, um die Bildung von Kondensaten zu vermeiden. Für PASS und ELPI kam die FPS-Verdünnung zum Einsatz

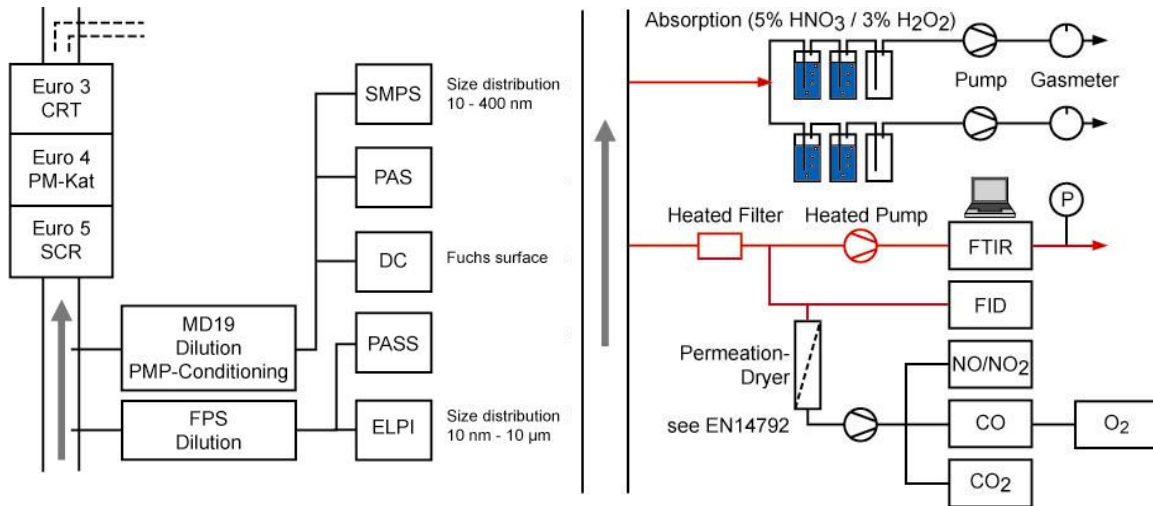


Bild 1: Messanordnung für die Partikelanalytik (links) und für die Gas- und Metallanalytik (rechts)

### Betriebspunkte

Die stationären Messpunkte wurden in Anlehnung an den ESC-Testzyklus gewählt. Zusätzlich wurde die Vermessung im Schwachlastbereich feiner gestuft, um einerseits dem Verhalten von Linienbussen im städtischen Verkehr Rechnung zu tragen, andererseits auch, um Schwachstellen der Systeme besser auszuleuchten. Beim SCR-Verfahren werden diese Schwachstellen im Bereich sehr tiefer Last dh bei geringer Katalysatoraktivität resp. Unterdrückung der Harnstoff-Einspritzung (um 225 °C) gesehen, beim PM-Kat-Verfahren immer dann, wenn die Regeneration des Nebenstromfilters aufgrund unzureichender NO → NO<sub>2</sub>-Konversion nicht stattfindet.

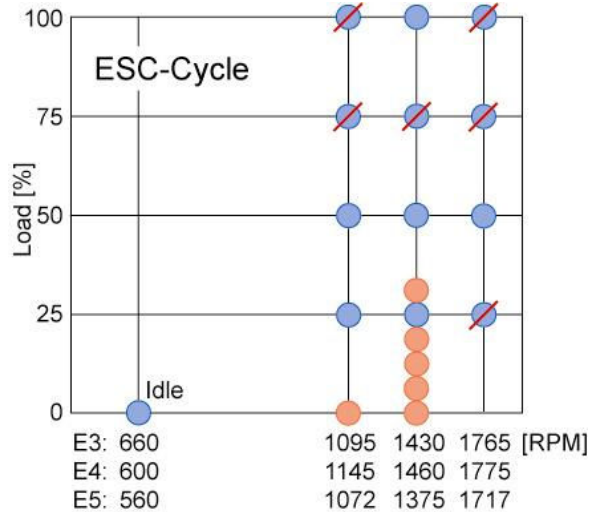


Bild 2: Betriebspunkte orientiert am European Stationary Testcycle ECS

Die gestrichelten Punkte wurden mit Rücksicht auf die Reifenbelastung nicht gefahren, sie standen nicht im Fokus der Untersuchung, ebenso wenig ein Zyklus-Gesamtergebnis. Die Zwischenpunkte im Drehzahlbereich 1400 U/min. wurden zusätzlich eingeführt, um das Tief-lastverhalten besser abzubilden.

Zur Untersuchung des transienten Verhaltens wurden sowohl freie Beschleunigungen ausgehend vom Tieflerlauf durchgeführt als auch Lastaufschaltungen, die von anderen Betriebspunkten ausgingen.

### Partikel-Emissionen unter stationären Bedingungen

Das folgende Bild zeigt Grössenverteilungen der 4 Systeme für Nulllast, 25% Last, 50 % Last und Volllast bei 1400 U/min. Bei den 3 unteren Laststufen, die zyklusbestimmend sind, ist sowohl für EURO 4 als auch für EURO 5 eine deutliche Verminderung gegenüber EURO3 zu erkennen, wobei die Minderungswirkung bei grösseren Partikeln um 200-400 nm deutlich stärker ausgeprägt ist als bei kleineren Partikeln, was dem Agglomerationsmodell bei Verminderung der Primärpartikelkonzentration entspricht. Grosse Partikel bestimmen die Masse, die ja gegenüber EURO 3 um Faktor 5 vermindert ist. EURO 4 und EURO 5 unterscheiden sich dabei aufs Ganze gesehen wenig.

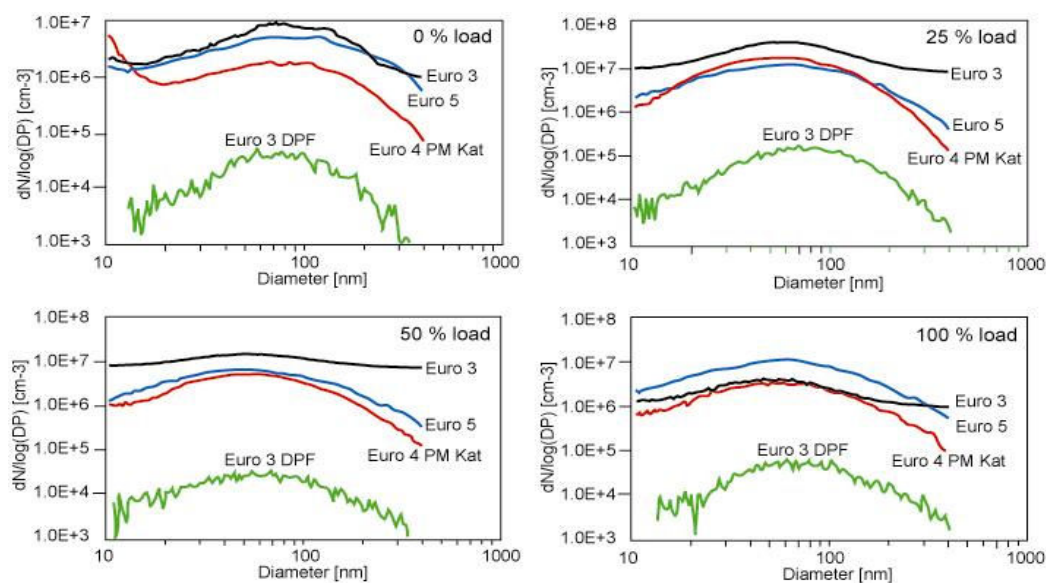


Bild 3: Feinpartikelemissionen im Lastschnitt bei 1400 U/min.

Interessant sind vor allem 2 Beobachtungen:

- bei Volllast liegt EURO 5 höher als EURO 3. Offenbar ist dieser Betriebspunkt derart wenig zyklusbestimmend, dass ein solches Verhalten im Zertifikationsverfahren akzeptiert werden kann. Da dieses Volllastverhalten aber bei jeder Ampelbeschleunigung die lokalen Emissionen bestimmt, ist Kritik angebracht.
- das ungünstige Verhalten des PM-Kat bei Leerlaufbedingungen zeigt sich in der erhöhten Penetration besonders kleiner Feststoffpartikel.

Weiter wird deutlich, dass mit Verwendung eines Partikelfilters nach dem seit 1998 gültigen VERT-Standard ein um 2-3 Grössenordnungen niedrigeres Partikel-Emissionsniveau als mit den neuesten HDV-Konzepten erzielt wird.

Während diese Ergebnisse für das EURO 5 Fahrzeug immer wieder reproduziert werden konnten ergaben sich für den Fall des PM-Kat im EURO 4 Fahrzeug irritierende Beobachtungen in einem weiteren Lastschnitt, der in gleicher Weise durchgeführt wurde, jedoch im unteren Lastbereich feiner geteilt. Auffallend waren bei dieser Vermessung der Durchlässigkeit (Penetration = 1-Abscheidegrad) des Teilstrom-Filterystems die grosse Streuung so-

wohl bei grossen als auch bei sehr kleinen Partikeln und die Tatsache, dass beim Übergang vom Nulllastpunkt (mit regeneriertem Filter) auf 10 % Last plötzlich ein vollständiger Durchbruch stattfand. Bei weiterer Steigerung der Last „verbesserte“ sich das System wieder auf Rückhalteraten von 30 – 50 % - der Filter war offenbar wieder frei und aufnahmefähig.

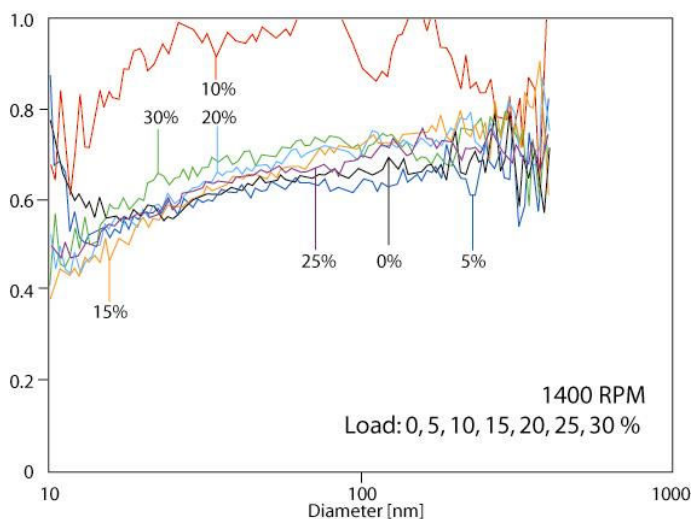


Bild 4: Penetration beim PM-Kat im Lastschnitt 1400 U/min

Die Rückhaltecharakteristiken sind in diesem Niedriglastbereich nicht reproduzierbar – das Regenerationsverhalten und damit die Vorgeschichte des Systems beeinflussen das Filtrationsgeschehen in unvorhersehbarer Weise, sodass von einem stochastischen Verhalten gesprochen werden muss.

### Das Beladungsverhalten des EURO4-PM-Kat-Systems

Dieser starke Einfluss der Beladung der Nebenstromfilter auf das Abscheideverhalten sollte durch gezielte Beladungsversuche unter Vermeidung der Regeneration weiter untersucht werden.

Von Schaumfiltern und Faser- resp. Drahtgestrieken, also Tiefenfiltern mit grosser Porosität ist bekannt, dass sie bei langer Beladung ohne Regeneration in einen Grenzzustand gelangen, in dem der Gegendruck konstant bleibt, die zuströmende Partikelmasse gleich der abströmenden ist, aber das Grössenspektrum sich stark zugunsten grosser Partikel verschiebt – sie werden zu Agglomeratoren [9, 10] . Beim Nebenstromfilter ist ein anderes Verhalten zu erwarten: bei Belegung des Nebenstromfilters wird der ungefilterte Hauptstrom zunehmen und es muss erwartet werden, dass der Abscheidegrad sich kontinuierlich verschlechtert bis hin zum vollständigen Durchbruch. Zudem bleibt der Filterkuchen, der sich währenddessen auf dem Nebenstromfilter bildet, im Gegensatz zu den bekannten Wandstromfiltern im Hauptstrom exponiert – Ablaseerscheinungen sind also durchaus plausibel.

Dieses Verhalten lässt sich am besten bei Nulllast zeigen; dabei ist die Partikelemission zwar gering, aber auch die Regenerationsfähigkeit des Systems ist wegen der geringen Aktivität des Katalysators verschwindend klein – ein Aufbau der Beladung kann erwartet werden. Diese Betriebszustände sind nicht typisch für das Fahrprofil eines Nutzfahrzeugs, aber durchaus realistisch d.h. sie können immer vorkommen und wurden hier im Sinne eines worst case zu Untersuchung dieses speziellen Verhaltens gewählt.

Im Tiefleerlauf zeigt sich beim frisch regenerierten Filter ein mittlerer Abscheidegrad von etwa 40 % mit einer ausgeprägten Schwäche für sehr kleine Partikel, der aber im Verlauf einiger Stunden bei langsamer Beladung nahezu gänzlich zu Null abgebaut wird. Bei ganz kleinen Partikeln wird sogar eine überhöhte Emission beobachtet. Diese hohen Emissionen feinsten Partikel werden im Tiefleerlauf häufig beobachtet, es handelt sich um Metalloxyde aus den Schmieröladditiven aufgrund des höheren Schmierölverbrauches wegen der schwachen blow-by-Wirkung. Im vorliegenden Fall wäre denkbar, dass das System viele dieser Feinstpartikel gespeichert hat und nun entlässt. Die Untersuchung bei 1400 U/min und Nulllast zeigt ein ähnliches Verhalten, allerdings ist der Abscheidegrad für Feinstpartikel mit 80% zunächst besonders hoch. Gerade diese positive Eigenschaft aber ändert sich bei Beladung – auch hier wurde während 2-4 Stunden in 2 Stufen beladen – die Abscheidecharakteristik kippt und es resultiert ein ähnliches Schlussergebnis wie im Tiefleerlauf.

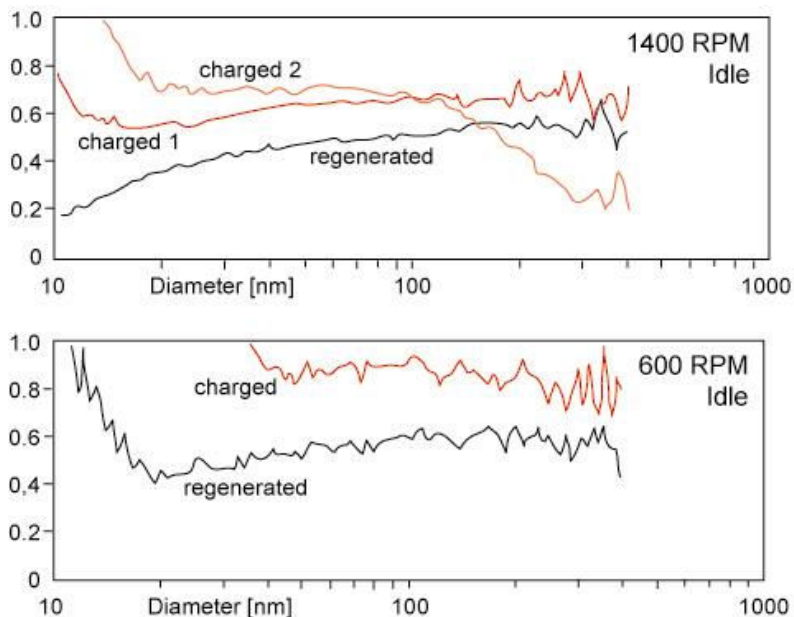


Bild 5: Beladungsversuche bei im Tiefleerlauf und bei 1400 U/min Nulllast

Ähnliche Beobachtungen zum Beladungsverhalten wurden auch in [11] und [12] publiziert. Es ist weiter zu erwarten, dass eine derartige Degradation des Abscheideverhaltens durch Verminderung des Nebenstromverhältnisses in irreversibler Weise durch die Einlagerung von feinsten Aschebestandteilen aus dem Schmieröl auftritt – die Verwendung von aschearmen Schmierölen ist daher besonders zu empfehlen.

### Die Bildung von flüchtigen Partikeln beim EUR 4-PM-Kat-System

Das folgende Bild zeigt sogenannte Thermogramme für das PM-Kat-System: bei 2 Lasten wurde der Einfluss der Probenahmetemperatur auf die Grössenverteilung der Partikel untersucht.

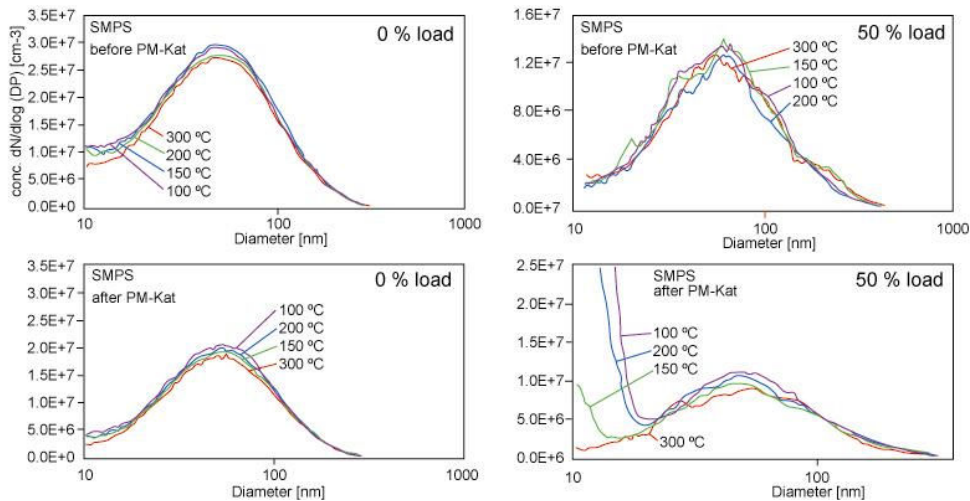


Bild 6: Thermogramme bei 1400 U/min und 2 Lasten vor/nach PM-Kat

Während bei Nulllast die Probenahmetemperatur keine Rolle zu spielen scheint, tritt bei Halb- last eine mit abnehmender Probenahmetemperatur zunehmend ausgeprägte Emission von Feinstpartikel auf. Die Erklärung ergibt sich aus der Aktivität des Katalysators, der bei tiefen Nulllast nicht aktiv ist, bei 50 % Last aber intensiv Schwefelsäure bildet, eine weitere toxische Komponente, die auch aus Korrosionsgründen unerwünscht sein dürfte.

### Besonderheiten im stationären Partikelemissionsverhalten mit dem EURO 5-SCR

Verschiedentlich wurden bei SCR-Systemen zusätzliche Feinstpartikelemissionen festgestellt [13, 22]. Die Untersuchung des EURO 5-System bot Gelegenheit, alle Betriebspunkte mit und ohne Adblue-Einspritzung zu fahren. Einige Ergebnisse sind im folgenden Bild für den Grössenausschnitt unter 100 nm gezeigt

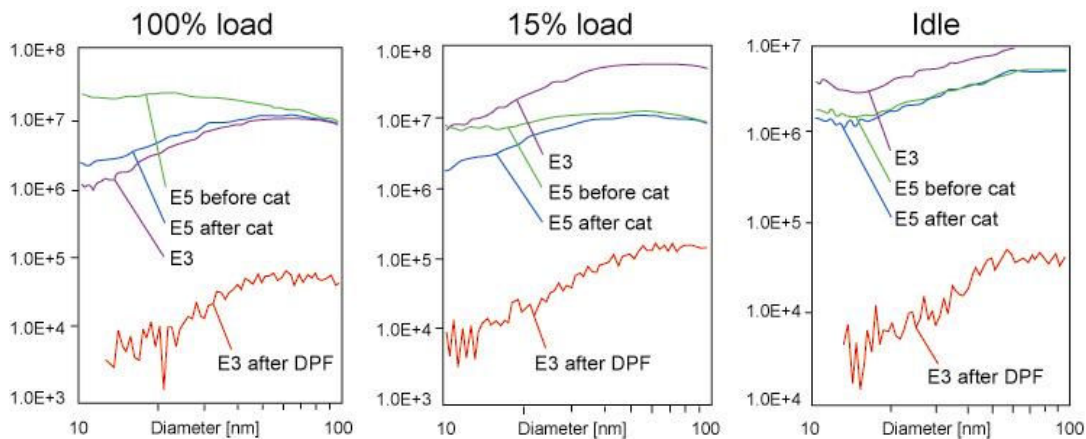


Bild 7: Einfluss der Adblue-Einspritzung auf die Feinstpartikelemissionen

Vor dem Katalysator zeigt sich eine deutliche Erhöhung von Feststoff-Feinstpartikeln, die mit zunehmender Last steigt und bei Vollast die Partikelkonzentration unterhalb von 30 nm um mehr als eine Größenordnung erhöht. Der feinzellige Katalysator nimmt durch Diffusionsabscheidung allerdings einen Teil dieser ultrafeinen Partikel wieder aus dem Gas heraus. Bei Leerlauf verschwindet dieses Phänomen, auch beim Abstellen der Einspritzung ist es nicht sichtbar. Während [13] die Bildung von Sulfaten vermutet wird hier die Hypothese vertreten,



dass es sich um Mineralpartikel aus dem offenbar nicht ganz entmineralisierten eingespritzten Wasser handelt. Ganz ähnliche Effekte wurden von den Autoren bei der Untersuchung von Diesel/Wasser-Emulsionen beobachtet und dort eindeutig verifiziert [20].

### Partikelemissionen während Beschleunigungen

Die Rauchemission dieser modernen Dieselmotoren ist so niedrig, dass die klassische Opazimetrie keine sinnvollen Resultate mehr liefert. Moderne Partikelsensoren, insbesondere die beiden Sensoren des NanoMet-Messsystems PAS und DC aber sind gegenüber der Opazimetrie um mehr als 2 Größenordnungen empfindlicher [21] und weisen eine ausreichende Dynamik auf, um die Partikelemission auch während derartig drastischer Beschleunigungsvorgänge messtechnisch abzubilden.

Im folgenden sind die Verhältnisse bei der freien Beschleunigung gezeigt: ausgehend vom stabilen Tieflerlauf wird das Gaspedal möglichst rasch voll durchgetreten, d.h. der Motor beschleunigt die Masse des Treibwerks, er geht also über die Vollastlinie und stabilisiert sich dann bei der Abregeldrehzahl. Dies ist für die Rauchbildung ein sehr kritischer Fall, der insbesondere auch ein Nachhinken des Ladersystems zeigen kann.

Die modernen Systeme EURO 4 und EURO 5 sind offenbar wesentlich besser geregelt als EURO 3, so dass die Beschleunigungsspitzen deutlich tiefer ausfallen. Das absolute Niveau der Emissionsspitze liegt allerdings bei allen Systemen um fast eine Zehnerpotenz über den Werten, die für die gleichen Systeme mit diesem Sensor bei Vollast gemessen worden sind!

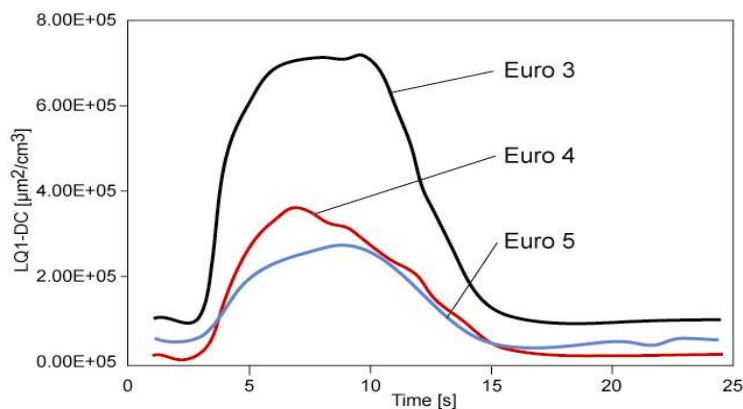


Bild 8: Freie Beschleunigung, aufgezeichnet mit dem DC-Sensor des NanoMet-Messsystems Die Kurven sind als Mittelwerte aus 5 Beschleunigungen gebildet

## Emission von gasförmigen Schadstoffen

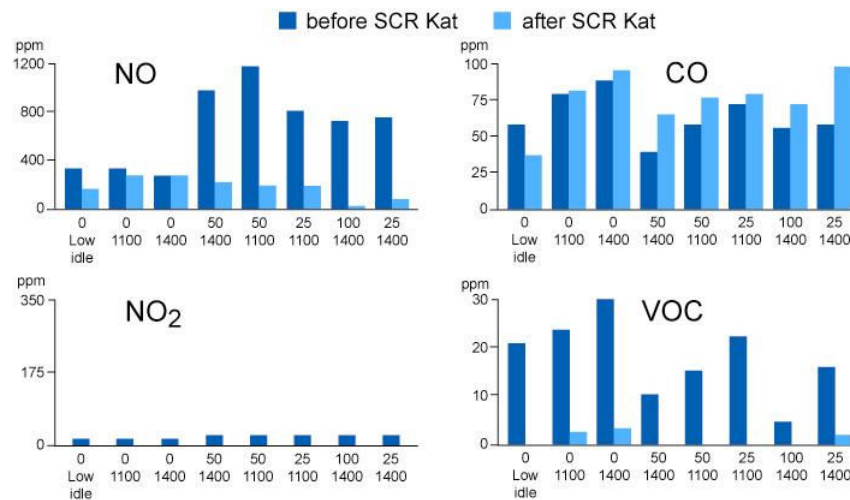


Bild 9: Emission gasförmiger Schadstoffe des EURO 5 - Fahrzeugs

Gezeigt sind die Emissionen der 4 Hauptkomponenten in den als wichtig erachteten Betriebspunkten vor und nach dem SCR-Katalysator bei zugeschalteter Adblue-Eindüsung. Bei allen Betriebspunkten oberhalb 25 % Last erweist sich das SCR-DeNOx-System als ausserordentlich leistungsfähig. NO<sub>x</sub>-Verminderung von bis zu 98 % konnte unter diesen stationären Bedingungen beobachtet werden. Nur in einem Messpunkt wurde ein sehr geringer Ammoniak-schlupf festgestellt, ansonsten lag die Ammoniakkonzentration unter der Nachweisgrenze von 20 ppm. Die Lachgaskonzentration lag immer unter der Nachweisgrenze von 5 ppm.

Bei Nulllast findet keine NO<sub>x</sub>-Verminderung statt, eine Beobachtung, die im Hinblick auf den Einsatz solcher Systeme im Linienbus kritisch bewertet werden kann. NO<sub>2</sub> ist bei allen Betriebszuständen auf vernachlässigbar niedrigem Niveau, angesichts der an verkehrsbelasteten Messstellen derzeit überall beobachteten Überschreitungen [14] ein sehr erfreuliches Ergebnis.

Auch zur Verminderung der Kohlenwasserstoffe ist der SCR-Katalysator sehr aktiv, nicht jedoch bei CO, was bekannt ist [19]. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass diese beiden Komponenten bei diesen modernen Dieselmotoren ohnehin weit unter den Grenzwerten liegen.

Beim EURO 4 mit dem PM-Kat zeigt sich das übliche Verhalten Pt-beschichteter Oxidationskatalysatoren, wie es auch von CRT-Filterssystemen bekannt ist [15]: CO und HC werden sehr effizient abgebaut und erreichen gemäss den Typenprüfdaten Werte, die um mehr als eine Zehnerpotenz unter den Grenzwerten liegen. NO wird sehr effizient zu NO<sub>2</sub> umgesetzt, sobald die Abgastemperatur den Anspringsbereich des Katalysators von 240 °C überschritten hat. Bei hohen Temperaturen ist die Konversionsrate aufgrund des chemischen Gleichgewichtes dann wieder geringer. Die überstöchiometrische Verfügbarkeit von NO<sub>2</sub> ist für die sichere Funktion des Systems, das auf möglichst kontinuierliche Regeneration angewiesen ist, entscheidend. Allerdings ist der ausserordentlich hohe NO<sub>2</sub>-Schlupf angesichts der Schadstoffeinstufung des NO<sub>2</sub> und der Immissionsüberschreitungen dieser Komponente [14] mittelfristig nicht länger vertretbar.

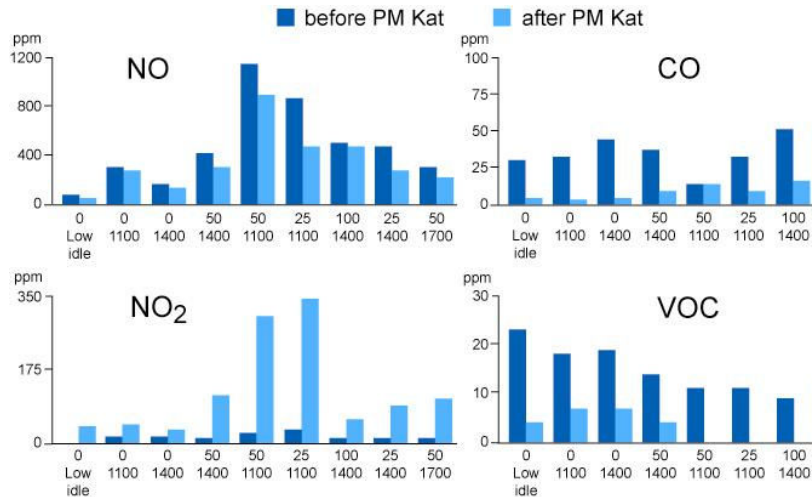


Bild 10: Emission gasförmiger Schadstoffe des EURO 4 - Fahrzeugs

### Metallemissionen

Dabei wurde für Vanadium eine mittlere Abgaskonzentration von  $102 \text{ ng/m}^3$  festgestellt, welche deutlich über der Umgebungskonzentration von  $0.8\text{-}2.4 \text{ ng/m}^3$  [16] liegt, jedoch unter dem Richtwert der WHO von  $1000 \text{ ng/m}^3$ , unterhalb dessen keine nachteilige gesundheitliche Auswirkung zu erwarten ist [26]. Die Platinemissionen lagen unter der Nachweisgrenze von  $7 \text{ ng/m}^3$  – bemerkenswert tief, da Emissionen moderner 3-Wege-Katalysatoren mit bis zu  $100 \text{ ng/m}^3$  angegeben werden [17].

### Bewertung der Partikelmesstechnik

Die vorliegende Untersuchung diente eigentlich nicht einem Instrumentenvergleich, vielmehr wurden die Methoden aus folgenden Gründen gewählt:

- SMPS als weitverbreitete Methode zur feinklassierten Analyse der Partikelgrößenverteilungen nach dem Diffusions-orientierten Beweglichkeitsdurchmesser gilt als Referenzverfahren. Allerdings ist der Grössenbereich bei der vorliegenden Einstellung mit  $400 \text{ nm}$  nach oben begrenzt d.h. die Emission von Agglomeraten, die bei offenen Systemen durchaus erwartet werden musste [9], kann nicht beobachtet werden. Zudem ist SMPS nicht transientfähig.
- NanoMet liefert über die beiden Sensoren PAS und DC Informationen zur Gesamtoberfläche (Fuchs-Oberfläche) der Partikel im Submikronbereich und zusätzliche Informationen zur chemischen Zusammensetzung. Das PAS-Signal korreliert sehr gut mit EC. Beide Sensoren sind ausreichend transientfähig, um selbst bei freier Beschleunigung die Partikelemission zu verfolgen.
- PASS liefert im gesamten Grössenbereich der Probe einen integrierten Wert für gesamt-EC
- ELPI liefert eine sehr breite Grössenklassierung im Bereich von ca  $30 \text{ nm}$  bis  $10 \text{ }\mu\text{m}$  und ermöglicht eine online-Verwertung des elektrischen Signals. ELPI und PASS wurden nur beim EURO 4 eingesetzt.

- das PMP-Probenahmesystem mit Probenbeheizung von 300 °C und anschliessender Verdünnung, die bis zum mehrhundertfachen Wert frei gewählt werden kann, trennt zuverlässig zwischen Feststoffpartikeln und flüchtigen Aerosolen [15].

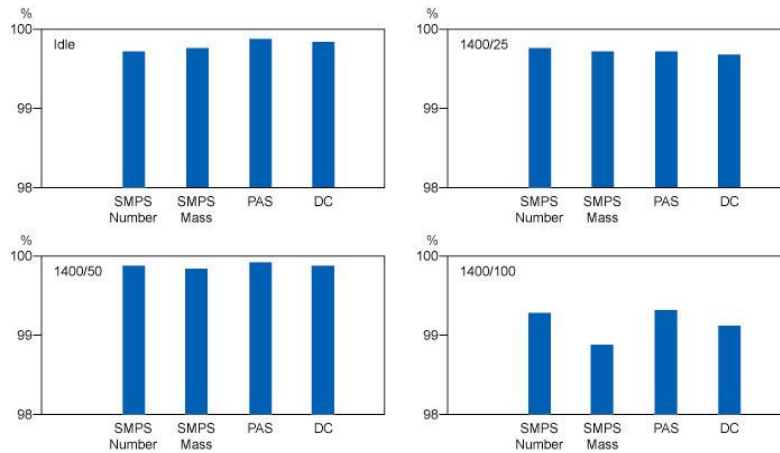


Bild 11: Abscheidegrad des im EURO 3-Fahrzeugs nachgerüsteten Partikelfilters

Im obigen Bild sind die Abscheidegrade für den VERT-geprüften HJS-Sintermetallfilter in 4 Betriebspunkten nach Daten von SMPS (Anzahl und Masse), PAS und DC ermittelt. Die Werte liegen im grössten Teil des Betriebsbereiches bei 99.8 %, bei der höchsten Raumgeschwindigkeit sinken sie auf 99 %. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Aussage sowohl für die Anzahl, als auch für die Bewertung der Masse nach SMPS und nach EC (PAS-Signal) als auch für die Gesamt-Oberfläche gilt. Das Ergebnis ist also sehr einheitlich und wird von alle Sensoren in gleicher Weise wiedergegeben

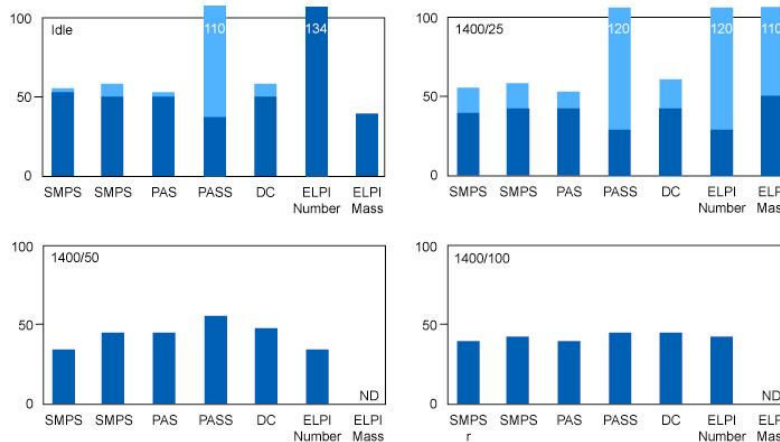


Bild 12: Penetration des PM-Kat im EURO 4-Fahrzeug

Beim EURO 4-Fahrzeug kamen mehr Messsysteme zum Einsatz. Die Ergebnisse sind hier in Form der Penetration dargestellt, da damit auch Aussagen über blow-off-Phänomene gemacht werden können. Bei höheren Lasten sind die Aussagen der 5 Instrumente recht einheitlich das ist der Bereich, in dem kontinuierliche Regeneration stattfindet, das Nebenstromverhältnis also konstant bleiben dürfte. Bei tiefen Lasten aber treten grosse Streuungen mit häufig verschwindenden Abscheidegraden auf – gerade bei den Instrumenten PAAS und ELPI, die auch die grösseren Partikel miterfassen. Die Streuungen nicht nur gross zwischen

den Messverfahren sondern auch bei Wiederholungsmessungen mit den gleichen Instrumenten.

### **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die modernen Systeme EURO 4 und EURO 5 im Vergleich zu EURO 3 in den meisten Betriebspunkten eine moderate Verringerung der Partikelkonzentration im gesamten Grössenbereich erzielen, relativ mehr bei grösseren Partikeln. Eine Veränderung der mittleren Partikelgrösse (Mobilitätsdurchmesser) lässt sich beim Übergang von EURO 3 auf EURO 4/5 aus diesen Beobachtungen nicht ablesen. Weiter wurde beobachtet, dass die Partikelemissionen des EURO 5 SCR-Konzeptes ebenso wie die Ergebnisse des EURO 3-Konzeptes mit und ohne Partikelfilter gut reproduzierbar sind, während die Partikelemissionen des EURO 4 mit PM-Kat ein stochastisches Verhalten zeigen: mehrfach wurden in Betriebspunkten mit Abscheidegraden von 30-40 % bei Wiederholung mit etwas anderer Vorgeschichte Abscheidegrade von nahezu Null gemessen. Die bereits mehrfach publizierte starke Abhängigkeit der Partikelminderung von der Beladung und von der Motorlast konnte bestätigt werden. Bezüglich der Langzeit-Stabilität bestehen bei PM-Kat Bedenken wegen möglicher Alterung des Regenerationskonzeptes und irreversibler Einlagerung feinsten Aschepartikel.

Bei den gasförmigen Emissionen überzeugt der SCR durch hohe Entstickungsraten bei minimalem Schlupf von Ammoniak während das EURO 4-Fahrzeug hohen NO<sub>2</sub>-Schlupf aufweist und in mittleren Betriebspunkten erhebliche Konzentrationen an Schwefelsäureaerosolen emittiert werden. Metallemissionen sind bei beiden Konzepten gering, allerdings waren die Versuche nicht darauf ausgerichtet, für diese Fragestellung worst-case-Verhältnisse zu erzeugen.

Die Untersuchung kommt zu der Schlussfolgerung, dass sowohl das EURO 4- als auch das EURO-5-Konzept durch Partikelfilter nach dem Stand der Technik nachgebessert werden müssen, um den Standard EURO 3 + Filter bezüglich der Nanopartikelemission zu halten oder zu verbessern.

Es ist daher zu begrüßen, dass das hier untersuchte EURO 5-System inzwischen für den Linienbus bereits mit einem dem SCR vorgeschalteten Partikelfilter angeboten wird und dass der gewählte Partikelfilter die VERT-Kriterien erfüllt.

### **Literaturhinweise**

- [1] PM and the Central Nervous System;  
Calderon, L / 10.ETH-conference on Combustion Generated Nanoparticles 8/2006
- [2] Proceedings of the Pneumoconiosis Conference, Feb. 1959 Johannesburg  
A.J.Ohrenstein, J&A Churchhill Ltd, 1960
- [3] Schweizerische Luftreinhalteverordnung LRV1985
- [4] Update on the PMP Light Duty Inter-Laboratory Correlation Exercise  
J.Anderson / 10.ETH-conference on Combustion Generated Nanoparticles 8/2006
- [5] Secondary Emissions Risk Assessment of Diesel Particulate Traps for HDV  
Applications  
N.V-Heeb et al, SAE 2005-26-014
- [6] VERT-Filterliste  
SUVA / BAFU 2006; [www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de](http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de)
- [7] Weisungen des Eidgenössischen Justiz- und Polizeidepartementes EJPD 8/1990
- [8] VERT Particulate Trap Verification  
A.Mayer et al. , SAE 2002-01-0435

- [9] The Influence of a Particle Trap on the Size Distributions of Diesel Particles  
D.Kittelsohn, SAE 850009
- [10] Pre-Turbo-Application of the Knitted Fiber Diesel Particulate Trap  
A.Mayer et al, SAE 94'459
- [11] Meeting EU 5 PM emission Standards. Comparison of different Particulate Traps  
Zelenka, P.; ETH-Nanopartikelkonferenz 8/2006
- [12] Metal supported particulate-matter-cat; a low impact and cost effective solution ...  
L.Pace et al ; SAE 2005-01-0471
- [13] Particle Emissions from a HD Diesel Vehicle with Urea SCR Catalyst  
Y.Goto; NTSEL, 9.ETH-conference on Combustion Generated Nanoparticles 8/2005
- [14] NO<sub>2</sub> – die neue Herausforderung ?  
J.Lemaire, W.Naschke; NO<sub>2</sub>-Workshop München 8.2.2006
- [15] The Use of Continuously Regenerating Trap CRT to Control Particulate Emissions ...  
R.Allansson et al. ; SAE 2002-01-1271
- [16] Chemical Characterization of PM2.5, PM10 and Coarse Particles ....  
Ch.Hueglin et al; Atmospheric Environment 39 , 2005, 637-651
- [17] Forschungsverbund Edelmetall-Emissionen, Abschlussbericht GSF  
GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit; D.Pohl, München, 1997
- [18] Fuel Effects on the Characteristics of Particle Emissions for Advanced Engines ...  
CONCAWE-Report Nr. 1/05.
- [19] Off-Highway Exhaust Gas Aftertreatment combining Urea-SCR, DOC and DPF  
H.T.Hug, A.Mayer et al. , SAE 930363
- [20] Influence of AQUAZOLE, a Water in Diesel Fuel Emulsion on Nanoparticle Emissions  
R.Tort, 4.ETH-conference on Combustion Generated Nanoparticles 8/2000
- [21] Sampling and Measurement of Nanoparticle Emissions for Type Approval ...  
M.Kasper, SAE 2005-26-013
- [22] Characterization of Nanoparticles from a 2010-Type heavy Duty Diesel Engine  
M.Khair et al; , 9.ETH-conference on Combustion Generated Nanoparticles 8/2005
- [23] Emissionsmessungen an einem EURO 5 LKW am Rollenprüfstand der LARAG AG in  
Wil. Sekundäremissionen von Stickstoffverbindungen und Vanadium.  
J.Mohn, et al; EMPA-Prüfbericht 438'957
- [24] Emissionsmessungen an einem EURO 4LKW mit PM-Kat. Sekundäremissionen von  
Stickstoffverbindungen und Platin  
J.Mohn et al. ; EMPA-Prüfbericht 439'927
- [25] Time-Resolved Ammonia Measurement in Vehicle Exhaust;  
J.Mohn et al.; Int. J. Environment and Pollution 22 3, 342-356  
WHO 2000, World Health Organization, Air Quality Guidelines