



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise



Hochschule für
Technik und Architektur Biel
Ecole d'ingénieurs de Bienne

Gwerdtstrasse 5
CH-2560 **Nidau**
Tel./Tél. +41 (0)32 331 64 26
Fax +41 (0)32 331 59 34

Abgasprüfstelle
Contrôle des gaz d'échappement

VERT Filtertest VFTa mit dem EHC – Aufsteckfilter HT am Liebherr D914T Baumaschinenmotor

gemäss der VERT¹⁾ Messvorgangsweise

Auftraggeber:

EHC Teknik AG, SE-43330 Partille, Sweden

Projektleitung:

TTM, Technik Thermische Maschinen, Niederrohrdorf / Schweiz

Berichterstattung:

J. Czerwinski, Dipl. Ing. Dr. techn.,
J.-L. Pétermann, Dipl. Ing. FH,
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND ARCHITEKTUR, BIEL
ABGASPRÜFSTELLE
Gwerdtstrasse 5, CH-2560 Nidau / Schweiz

M. Kasper, Dr. sc. nat. ETH
Th. Mosimann, Dipl. Ing. FH
Matter Engineering AG, 5610 Wohlen

May 2003

B135

¹⁾ siehe S. 3

INHALTSVERZEICHNIS

1. Zusammenfassung	3
2. Einleitung	3
3. Gesetzlicher Hintergrund und VFT-Ziele	4
4. VFT Testprotokoll	5
4.1. Test-Messzyklus und Vorgehen	5
4.2. Probenahmen und Versuchsaufbau	7
5. Vorhandene Informationen	8
5.1. Allgemeine Information über Emissionen mit Partikelfiltern und mit Kraftstoffadditiven	8
5.2. Allgemeine Information über Sekundäremissionen mit Partikelfiltern und mit Kraftstoffadditiven	9
5.3. Anstieg von NO ₂ /NO-Verhältnis mit Edelmetallbeschichtungen	10
5.4. Ergebnisse mit einem ähnlichen Filtermaterial	10
6. Beteiligte Labors und verantwortliche Personen	10
7. Versuchsträger, Treibstoff, Schmieröl	11
7.1. Motor	11
7.2. Treibstoff	11
7.3. Schmieröl	11
8. Prüfstands Aufbau und Messtechnik	12
8.1. Motorprüfstand und Standard-Messtechnik	12
8.2. Emissionsmesstechnik für limitierte Abgaskomponenten	13
8.3. Partikelgrößen-Analytik	14
8.4. Coulometrische Analyse des PM-Filterrückstandes (EC + OC) *)	22
8.5. Analyse von SOF/INSOF und Sulfaten durch Extraktionsmethoden *)	22
9. Versuchsdurchführung	22
10. Probanden	23
10.1. Partikelfilter	23
11. Ergebnisse	24
12. Schlussfolgerungen	25
13. Dokumentation	25
14. Literatur	25
15. Beilagenliste	27
16. Anhang	27

*) optionale Messmethoden

1. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht fasst die Untersuchungen mit dem EHC HT-Aufsteckfilter am Liebherr Baumaschinenmotor gemäss VERT^{*)} Filter Test für Aufsteckfilter (VFTa) zusammen.

Die Untersuchungen beinhalten alle Messungen und Auswertungen, welche an Baumaschinenmotoren während des VERT^{*)}-Projektes durchgeführt wurden.

Neben den üblichen Motorbetriebsparametern und flüchtigen Schadstoffemissionen, wurden die Grössenverteilungen der Partikel systematisch gemessen.

Die Analysen fanden statt in verschiedenen Testphasen bei 2, oder bei 3 Motorbetriebspunkten.

Die Ergebnisse können folgendermassen zusammengefasst werden:

Die Resultate können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Im Neuzustand ist die Abscheidung des EHC-HT-Wechselfilters nicht befriedigend, vorwiegend wegen der Eigenemission der Nanopartikel durch das Filtermaterial
- Die Abscheideeffizienz des belegten und konditionierten Filters ist sehr gut (PZAG = 95 %)
- Die Reduzierung des opazimetrischen Rauchstosses bei Freibeschleunigung ist mit dem Spitzenwert bis zu 5,5 % befriedigend.

Der untersuchte EHC-HT-Wechsel-Partikelfilter erfüllt die Anforderungen des VERT-Filtertests (VFTa) mit Vorbehalt, dass die Filterkonditionierung als Bestandteil des Produktionsprozesses beim Hersteller durchgeführt sein wird.

2. Einleitung

Im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen an die Luftqualität am Arbeitsplatz im Untertagebetrieb und im Offroad-Bereich haben die Arbeitsgesundheitsbehörden von Schweiz, Österreich und Deutschland: SUVA, AUVA und TBG gemeinsam mit der schweizerischen Luftreinhaltebehörde BUWAL ein Projekt VERT^{*)} 1994 – 1999 durchgeführt, [1].

Ziele des VERT-Projektes

- Evaluierung der Abgas Nachbehandlungssysteme für bestehende Motoren zwecks Verminderung der Partikelemissionen bis zu < 5 % des Rohemissionsniveaus – dies im Bezug auf EC + OC-Masse und die Partikelzahlen im Grössenbereich 10 - 500 nm
- Definieren der Zertifikationsprozeduren solcher Abgasnachbehandlungssysteme
- Festlegung der Richtlinien zur Emissionsüberwachung der Baumaschinen im Feld
- Festlegung der Richtlinien zur Emissionsnachrüstung im Konsens mit den Motorherstellern und mit den Betreibern.

VERT war abgeschlossen 3/2000, [2], mit solchen Anwendungsinstrumenten, wie: Spezifikationen, Zertifizierungsprozeduren und Feldüberwachungsvorschriften der Partikelfiltersysteme. Eine jährlich aktualisierte Liste der nach VERT geprüften und akzeptierten Partikelfiltersysteme – die SUVA/BUWAL – Empfehlungsliste, [3], wurde erstellt. Nur diese Partikelfiltersysteme sind in diesem Dokument empfohlen, welche den VERT-Filter-Test VFT erfolgreich bestanden und welche ihre Qualität im Feldeinsatz fortlaufen beweisen.

Die Partikelfiltersysteme haben sich als die einzige verfügbare effiziente Massnahme erwiesen um die Partikelemissionen drastisch zu reduzieren. Die Regeneration solcher Filter erfordert geeignete technische Mittel, wie Brenner, Heizer, katalytische Beschichtungen und Kraftstoffadditive. Alle diese Mittel sollen gemeinsam mit dem Filter zertifiziert und im Feldeinsatz überwacht werden. Eine weitere Anforderung ist die kontinuierliche elektronische OBD, welche durch die automatische Überwachung die Sicherheit des Partikelfiltersystems für den Motor und für die Umwelt gewährleistet.

^{*)} VERT ... Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau

Die Forschung an den Filtern zeigte, dass diese aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche als hochaktive chemische Reaktoren funktionieren können. Sie können manche Substanzen aus dem Abgas absorbieren, ihre Verweilzeit in hohen Temperaturen verlängern und damit Produkte kreieren, welche im Abgas nicht vorhanden, oder nur in geringeren Konzentrationen vorhanden waren. Diese chemische Reaktivität kann durch die Anwesenheit von Katalysatoren, welche aus den Kraftstoff- oder Öladditiven und/oder aus den katalytischen Beschichtungen stammen, gesteigert werden. Es wurde gezeigt, dass solche extrem toxische Substanzen, wie PCDD/F***) in hohen Konzentrationen gebildet werden können, [4]. Dies hat die Einführung eines sogenannten VERT-Sekundär-Emissionen-Tests VSET veranlasst, welcher bei allen Anwendungen der katalytischen Mittel durchgeführt sein muss.

Schweizer Verordnung für Arbeitsplatz [5] und für Offroad [6], wo die Partikelfilter für Dieselmotoren obligatorisch sind, basieren auf den VERT-Resultaten und fordern die Anwendung ausschliesslich solcher Systeme, welche VFT und VSET erfolgreich bestanden haben. Diese Testprotokolle sind auch anerkannt von: UBA (D), AUVA (A), TBG (D) und DEEP (Canada).

3. Gesetzlicher Hintergrund und VFT-Ziele

Schweizer Gesetzgebung unterstützt den Gebrauch von Dieselpartikelfiltern, doch im Falle der Regenerationen mit Kraftstoffadditiven, oder mit katalytischen Beschichtungen verlangt das Gesetz den Beweis, dass keine zusätzlichen Substanzen entstehen, welche die menschliche Gesundheit, oder die Umwelt im allgemeinen beeinträchtigen könnten.

Die erste Regelung erlassen durch das EJPD (Eidgenössisches Justiz und Polizei Departement) am 7. August 1990, basierend auf dem Art. 84, Abs. 1 der BAV stellte fest: „In Verkehr stehende und neue, ohne Partikelfilter typengeprüfte Fahrzeuge, können nachträglich mit Partikelfiltern ausgerüstet werden. Beim Einsatz von additiv- oder katalytischunterstützten Regenerationsverfahren ist nachzuweisen, dass eine Gefährdung von Gesundheit und Umwelt durch die zusätzlichen entstehenden Reaktionsprodukte ausgeschlossen ist“ [7].

Basierend darauf verlangt die VERT-Partikelfilter Spezifikation unter „Zusätzliche Beschränkungen der Emissionen“, dass es „im Vergleich zu dem Motorausgangszustand keine relevanten, nachweisbaren Anstiege folgender Emissionskomponenten - auch während der Regeneration - geben darf:

- CO, HC, NO, NO₂ (zwingend)
- Schwefelsäure und/oder Sulfatbildung (empfohlen)
- Festpartikel und andere Substanzen im Grössenbereich 10 – 500 nm (zwingend)
- Sekundäremissionen, wie Dioxine, Furanen und PAH (zwingend)

Dabei ist „relevant“ durch die SUVA-MAK-Schwellwerte am Arbeitsplatz und durch die allgemeine BUWAL-Grenzwerte (schweizer UBA) für die Luftreinhaltung definiert, [8], [6].

VFT-Ziele:

Die Ziele der drei Phasen des VERT-Filter-Tests sind:

Phase 1 (Motorprüfstand):

- Qualitätskontrolle des Filtermaterials – Abscheidegrade von Anzahl und Masse bei verschiedenen Russbelastungen
- Funktionalität des Regenerationssystems
- Partikelgrössen Analyse im Bereich 10 – 500 nm:
Die Partikelzahlenkonzentrationen dürfen im keinen Grössenbereich die Werte der Rohemissionen überschreiten, der gesamte Abscheidegrad für Additivschepartikel muss mindestens so gut sein, wie für die Russpartikel

**) PCDD/F ...polychlorinated dibenzodioxins / furans (isomers)

- Aufzeigen der flüchtigen Emissionen während der Regeneration (teil des VFT): keine Emissionsspitzen von CO, HC oder PM sind erlaubt, welche in einem gesetzlichen Testzyklus ohne Regeneration die Emissionen um mehr als die Standardabweichung erhöhen würden.

Phase 2 (Feldtest):

- Kontrolle des Langzeitverhaltens des Partikelfiltersystems bei der Feldanwendung

Phase 3 (Motorprüfstand):

- Verkürzte Qualitätskontrolle des Partikelfilters nach einem längerem Feldeinsatz (bis 2000h).

Zusätzlich zu diesen Anforderungen müssen die in den Offroad-Fahrzeugen arbeitenden Partikelfiltersysteme die bestehenden Gesetze bezüglich Lärm, Sicherheit, [9] und die Stoffverordnung [10] erfüllen.

Für die Aufsteckfilter gibt es eine verkürzte Messprozedur bei 2 bis 4 Betriebspunkten (VFTa).

4. VFT Testprotokoll

4.1. Test-Messzyklus und Vorgehen

Auf Basis des für Off-road-Motoren vorgeschriebenen Zyklus nach ISO 8178 C1 resp. D2 wurden die folgenden 4 Betriebspunkte festgelegt, Fig. 1:

- Betriebspunkt 1: Volllast-Nerndrehzahl
- Betriebspunkt 2: Volllast-Mitteldrehzahl (max. Drehmoment)
- Betriebspunkt 5: Nerndrehzahl, 50% Last
- Betriebspunkt 6: Mitteldrehzahl, 50% Last

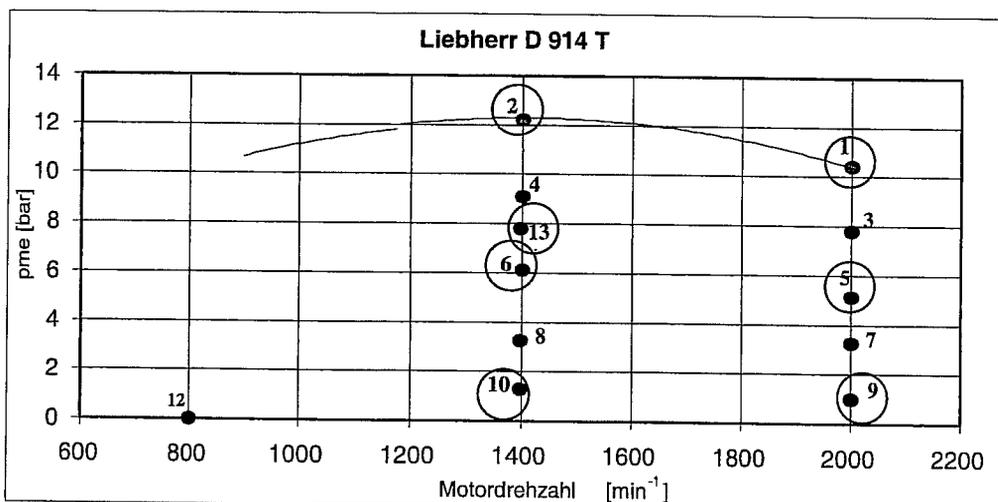


Fig.1: Betriebspunkte des VERT-Filter-Tests

Der untersuchte Partikelfilter soll nur bis zu Temperatur 350 °C und Durchsatz von 16 m³/min arbeiten. Daher wurden für die Untersuchungen die Teillastbetriebspunkte 6, 9, 10 und 13 gewählt.

Der Test wird in einer bestimmten Reihenfolge der Betriebspunkte gefahren, nachdem die Warmlaufphase bis Kühlmitteltemperatur > 83 °C und Schmieröltemperatur > 90°C absolviert wurde (s. Kap. 9).

VFT, Phase 1

Die erste Qualitätskontrolle des Filters ist die freie Beschleunigung mit der Opazimetrie-Messung. Der Spitzenwert der Rauchtrübung soll 5 % nicht überschreiten.

Im weiteren folgen die Messreihen:

- 4-Punkte-Test mit dem neuen Filter (oder im Anlieferungszustand), Freibeschleunigung
- Beladung des Filters mit Russ
- 4-Punkte-Test mit dem beladenen Filter, Freibeschleunigung
- Regeneration des Filters mit Additiv
- 4-Punkte-Test mit dem regenerierten Filter, Freibeschleunigung.

Nach den Erfahrungen des VERT-Projektes bilden die Freibeschleunigungen eine identische Beurteilungsbasis des Partikelfilters, wie die Wandler-Lastaufschaltungen.

Während des Regenerationsversuches wird bei konstanter Motordrehzahl (Nenn Drehzahl) das Drehmoment im Stufen erhöht. Dabei resultiert steigende Abgastemperatur und die Regeneration wird mit Hilfe des Abgasgedruckes, der flüchtigen Abgaskomponenten und der NanoMet-Signale aufgezeigt. Alle diese Parameter werden kontinuierlich über der Zeit gemessen, Fig. 2.

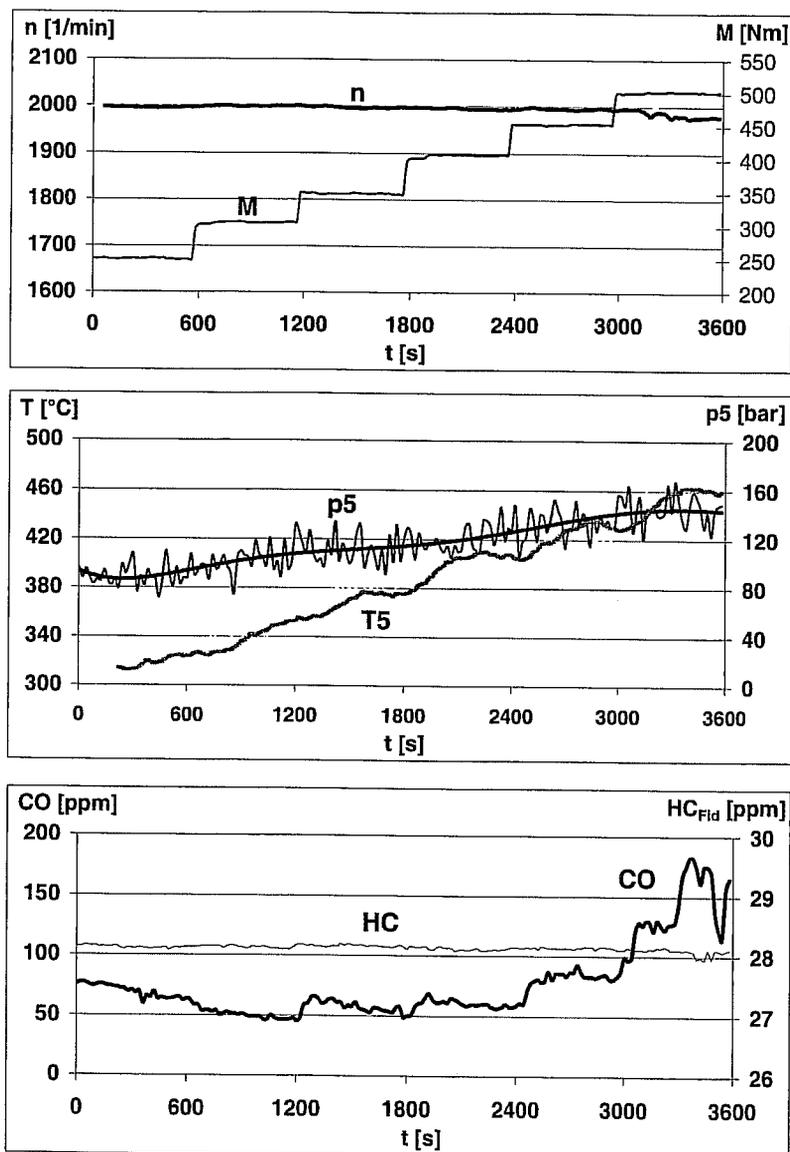


Fig. 2: Regeneration des Partikelfilters mit dem Fe-Additiv, [14].

Bei dem VFTa wird kein Regenerationsversuch durchgeführt, da der am Auspuffende aufgesteckte Filter extern gereinigt, oder regeneriert wird.

In manchen Fällen, z.B. wenn das Filtermaterial schon in anderen Filtertypen gemessen war, kann eine verkürzte VFT-Variante, Phase 1 durchgeführt werden.

Die in diesem Fall ausgeführten Messungen sind, [11]:

- Freibeschleunigungen
- Filterbelegung
- Regeneration des Filters mit Additiv
- 4-Punkte-Test mit dem regenerierten Filter
- Freibeschleunigungen.

4.2. Probenahmen und Versuchsaufbau

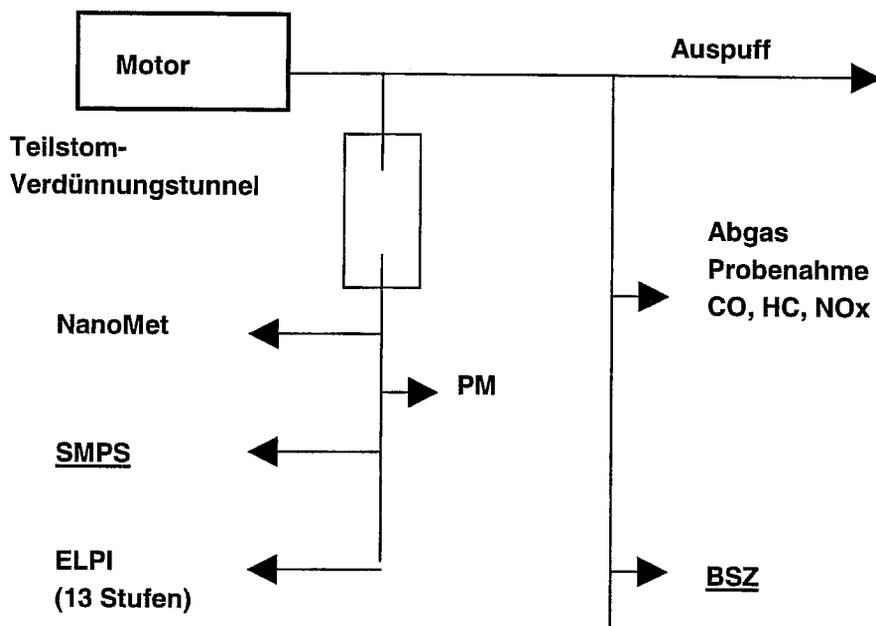


Fig. 3: Prinzipielle Skizze der Probenahmen und des Versuchsaufbaues

2 Arten der Probenahmen werden gebraucht:

- Probenahme über den Teilstrom – Verdünnungstunnel – für die direkte, on-line-Information bezüglich Grösse, Anzahl und summarische Oberfläche mittels SMPS, NanoMet und ev. ELPI, sowie für die gravimetrische Messung der Partikelmasse (PM).
- Probenahme aus dem unverdünnten Abgas für die Messung der gasförmigen Bestandteile und der Bosch Schwärzungszahl BSZ.

Kontinuierliche Messungen (für jeden Betriebspunkt)

- Limitierte Schadstoffkomponenten: total HC_{FID}, CO (NDIR), NO_x CLD (chemiluminescence detector)
- Partikelzahlen mit SMPS in Kombination mit dem Thermodesorber, oder mit dem NanoMet-Miniverdünner
- Grössenspezifische Gravimetrie mit Hilfe von ELPI (wenn erwünscht)
- Partikeloberfläche und Partikelzusammensetzung mit NanoMet
- Kontrollparameter: Drücke und Temperaturen

Für weitere Details über die in dieser Studie verwendeten Methoden der Probenahme, der on-line-Messungen und der off-line-Analytik siehe Kap. 8.

5. Vorhanden Informationen

5.1. Allgemeine Information über Emissionen mit Partikelfiltern und mit Kraftstoffadditiven

Während des VERT-Projektes wurden die Erfahrungen über die Emissionen der ultrafeinen Partikel gesammelt, dies sowohl im Rohgas des Motors, als auch nach den Abgasmachbehandlungselementen, wie Partikelfilter, Oxidationskatalysator, oder Kombination von den beiden, [1], [2],[15],[16],[17],[18].

Insbesondere konnte festgestellt werden, dass die Kraftstoffadditive (genannt Regenerationsadditive) die Partikelmasse meistens reduzieren, gleichzeitig aber die Anzahlkonzentrationen der ultrafeinen Partikel erhöhen. Diese Erhöhung beträgt manchmal bis zu 2 Größenordnungen und ist in der Regel von einer klaren Bimodalität der Partikelgrößenverteilungsspektren im Rohgas begleitet. Es wurde nachgewiesen in vorherigen Untersuchungen, dass es sich um feste nicht kohlenstoffhaltige Partikel handelt, welche aus dem Clustern der primären Metalloxidpartikel im Größenbereich von etwa 20 nm gebildet wurden.

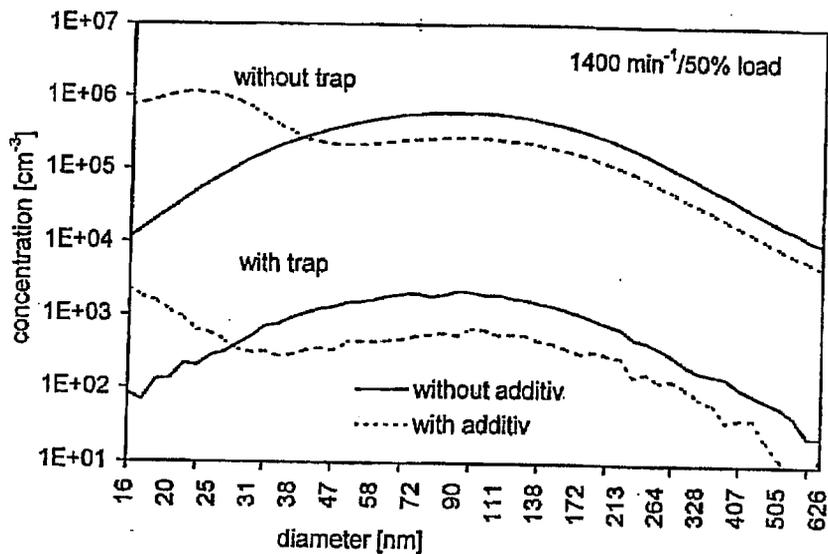


Fig. 4: Partikelgrößenverteilungen mit/ohne Additiv EOLYS: 100 ppm Cerium [1]

Es wurde auch gezeigt, dass diese bimodale Größenverteilung von Konzentration des Additivs im Kraftstoff abhängig ist. Mit höheren Konzentrationen ist die Bimodalität stärker ausgeprägt, mit geringeren Additivkonzentrationen kann sie sogar verschwinden, während sich immer noch ein katalytischer Effekt für die Russnachverbrennung zeigt, [12].

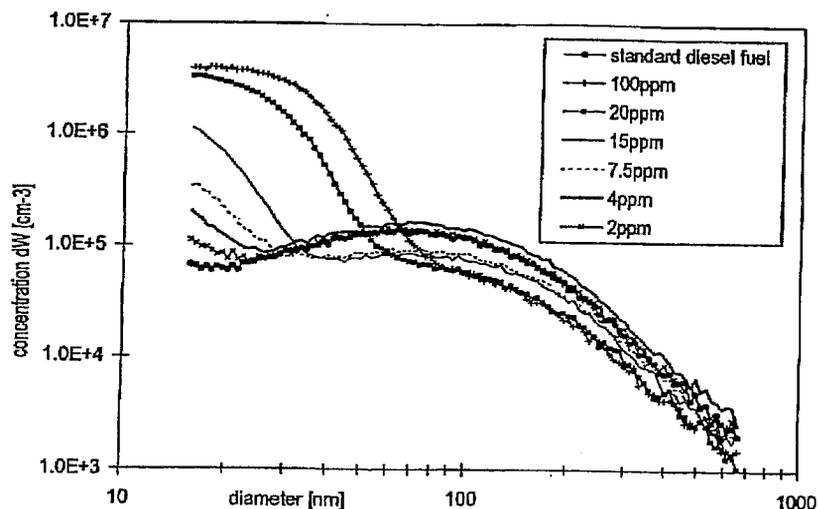


Fig. 5: Entstehung der Additivschepartikel abhängig von der Additivkonzentration, [12]

In bestimmten Konfigurationen, z.B. mit Partikelfilter, doch aber ohne Kraftstoffadditiv, können die Kleinstpartikelzahlen ebenfalls erhöht werden, was hauptsächlich auf die Spontankondensation der flüchtigen Sulfate oder HC zurückzuführen ist. Diese Partikel sind überwiegend flüssig und können durch die Aktivkohlefaller absorbiert werden. Sie werden als Spontankondensate bezeichnet und entstehen besonders unter den Bedingungen wo wenig Kondensationsfläche von festen Partikeln zur Verfügung steht und die betreffende Substanz sich im gesättigten Zustand befindet.

Bei Anwendung des Kraftstoffadditivs mit einem Partikelfilter, können die Feinstpartikel infolge der Ueberlagerung der beiden obengenannten Effekte erhöht werden.

Erfahrungsgemäss haben die Partikelfilter eine gute Abscheidecharakteristik der Kohlenstoffpartikel.

5.2. Allgemeine Information über Sekundäremissionen mit Partikelfiltern und mit Kraftstoffadditiven

Die Partikelfilter stellen eine ideale Umgebung zur Erzeugung neuer Substanzen aus Kraftstoff, Schmieröl, Verbrennung und Motorabrieb bereit. Es muss angenommen werden, dass solche chemische Prozesse durch die Katalyse beschleunigt werden können, wenn die katalytischen Materialien vorhanden sind. Die Kraftstoffadditive sind per Definition katalytisch aktiv. Zwei Beispiele aus den früheren VSET's zeigen auf wie stark solche Effekte sein können, womit auch die Notwendigkeit weiterer Tests dieser Art bekräftigt ist, Fig. 6:

Generation of PCDD/F when using a Copper-Additive

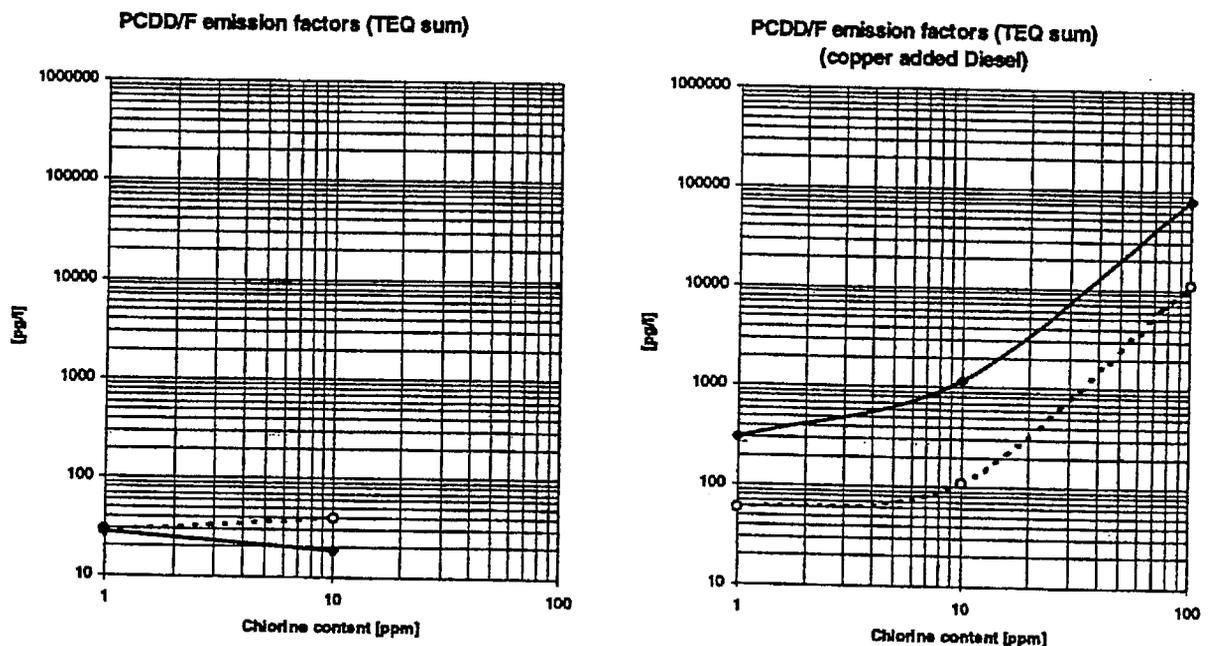


Fig. 6: Linkes Diagramm: mit Filter (ausgezogene Linie) und mit Fe & Ce Kraftstoffadditiven
 Rechtes Diagramm: mit/ohne Filter und mit Kraftstoffadditiven auf Basis von Cu

Beim Gebrauch von Kupfer-Additiv wurde der Filter rasch aktiv. Die PCDD/F-Emissionen wurden bei einem beschränkten Chlorgehalt um etwa 1 Grössenordnung und beim erhöhten Chlorgehalt um mehr als 3 Grössenordnungen erhöht, wogegen bei Fe- und Ce-Additiven die PCDD/F-Konzentrationen mit Partikelfilter gleich bleiben, oder sogar abgesenkt werden.

5.3. Anstieg von NO₂/NO-Verhältnis mit Edelmetallbeschichtungen

Das Verhältnis NO₂/NO liegt im üblichen Motorabgas bei den Werten < 0,1, wobei NO die weniger toxische Komponente der NO_x darstellt. Bei Verwendung von Edelmetallbeschichtungen auf Substraten mit hoher spezifischen Oberfläche kann das NO zu NO₂ oxidiert werden. Gemäss MAK-Grenzwerten ist NO₂ 6 Mal mehr toxisch, als NO.

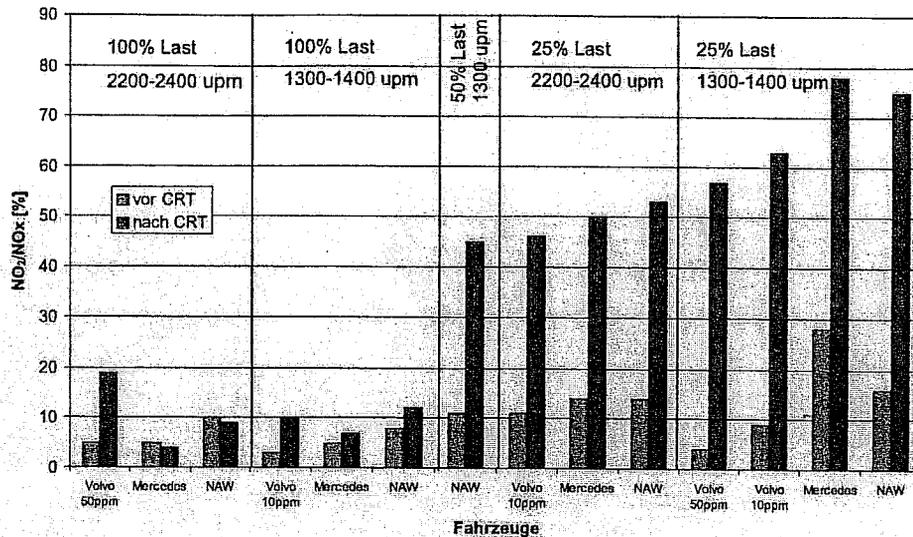


Fig. 7: NO₂/NO für 4 Stadtbuse mit Pt-beschichteten Katalysatoren in Kombination mit Partikelfiltern, [13]

In diesem Fall ist die Konvertierung von NO zu NO₂ absichtlich durchgeführt um die Russoxidation bei tieferen Temperaturen zu unterstützen. Diese Vorgänge können nicht sehr genau kontrolliert werden, was zu einem beträchtlichen NO₂-Schlupf führt. Dasselbe kann mit den Pt-haltigen Additiven passieren, [25].

5.4. Ergebnisse mit einem ähnlichen Filtermaterial

Die Untersuchungen mit dem Partikelfilter ähnlicher Bauweise, [26], zeigten die Abscheidegrade der festen Nanopartikel im SMPS-Messbereich von 85 %.

Die Maximalwerte des opazimetrischen Rauchstosses bei Freibeschleunigung lagen bei ca. 15%.

Im gebrauchten Zustand emittierte der Filter (Silikondichtung der Flansche) keine Substanzen, die zu Spon-tankondensaten führen könnten.

Der Filter lag nahe an den Anforderungen von VERT Filter Test, doch erfüllte sie nicht.

6. Beteiligte Labors und verantwortliche Personen

Folgende Institutionen nahmen an den Messungen teil:

- Abgasprüfstelle der Fachhochschule Biel (Messungen am Motorprüfstand, Federführung Versuchsablauf); Prof. Dr. Jan Czerwinski, Dipl. Ing. J.-L. Pétermann
- Matter Engineering AG, Wohlen, Dr. U. Matter, Dr. M. Kasper, Dipl. Ing. Th. Mosimann (Aerosol Messungen)
- TTM Technik Thermische Maschinen, Niederrohrdorf (Koordination des Eignungstests, Empfehlungsliste); Dipl. Ing. A. Mayer

7. Versuchsträger, Treibstoff, Schmieröl

7.1. Motor

Hersteller:	Liebherr Maschinen Bulle SA, Bulle/FR,
Typ:	914 T, Hubvolumen 6.11 l, Nenndrehzahl 2000 min ⁻¹ ,
Nennleistung:	105 kW, Bauart 4-Zylinder in Reihe,
Verbrennungsverfahren:	Direkteinspritzung,
Einspritzpumpe:	Bosch - Reihenpumpe
Aufladung:	Turbolader KKK ohne LLK
Entwicklungszeitraum:	1986
Einsatz im Feld:	seit ca. 1988

Dieser typische Baumaschinenmotor - verfügbar am Markt seit ca. 10 Jahren - hat recht tiefe Emissionswerte, insbesondere Partikelmasse, obwohl in der Zeit, als er entwickelt wurde, noch keine gesetzlichen Grenzwerte im Baumaschinensektor vorgeschrieben waren. Da dieser Motor als hauptsächlicher Versuchsträger im VERT-Projekt verwendet wurde, liegt nun eine umfangreiche Datenbasis mit verschiedenen Abgasnachbehandlungssystemen, verschiedenen Kraftstoffen und Additiven vor – diese ist eine wertvolle Vergleichsbasis.

7.2. Treibstoff

Kraftstoff Schwefelarm Shell Formula Diesel schweizer Marktqualität (25 ppm Schwefel)

Dichte (bei 40°C)	: 0.820 - 0.845 g/ml
Viskosität (bei 40°C)	: 2.0 - 3.2 mm ² /s
Flammpunkt: pm min	: 62°C
Trübungspunkt: max.	: -10°C
Filterbarkeitsgrenze	: CFPP max. -20°C
Koksrückstand	: max. 0.02 mg/kg
(Conradson auf 10% Test.Rückstand)	:
Asche	: Spuren
Schwefel	: max. 0.0025 g/100 g
Cetanzahl (bestimmt)	: min. 52 - 54
Siedeanalyse (bei 1013 mbar, 340 °C)	: min. 98 Vol.%
Heizwert (unterer)	: min. 42.5 MJ/kg

7.3. Schmieröl

Standard Schweizer Marktöl MOTOREX UNIVERSAL 15W/40

Eigenschaft	a)	b)	
kin. Viskosität 40°C	108.9		mm ² /s
kin. Viskosität 100°C	14.4	13.9	mm ² /s
Viskositätsindex	135		(--)
Dichte bei 20°C	885		kg/m ³
Stockpunkt	- 27		°C
Flammpunkt	227		°C
Total Base Number TBN	11.1	11.0	mg KOH/g
Schwefel		7300	mg/kg
Mo		116	mg/kg
Mg		422	mg/kg
Zn		1572	mg/kg
Ca		3655	mg/kg
P		1433	mg/kg

a) Daten des Ölherstellers, b) Analysedaten des neuen Öls

8. Prüfstandsaufbau und Messtechnik

8.1. Motorprüfstand und Standard-Messtechnik

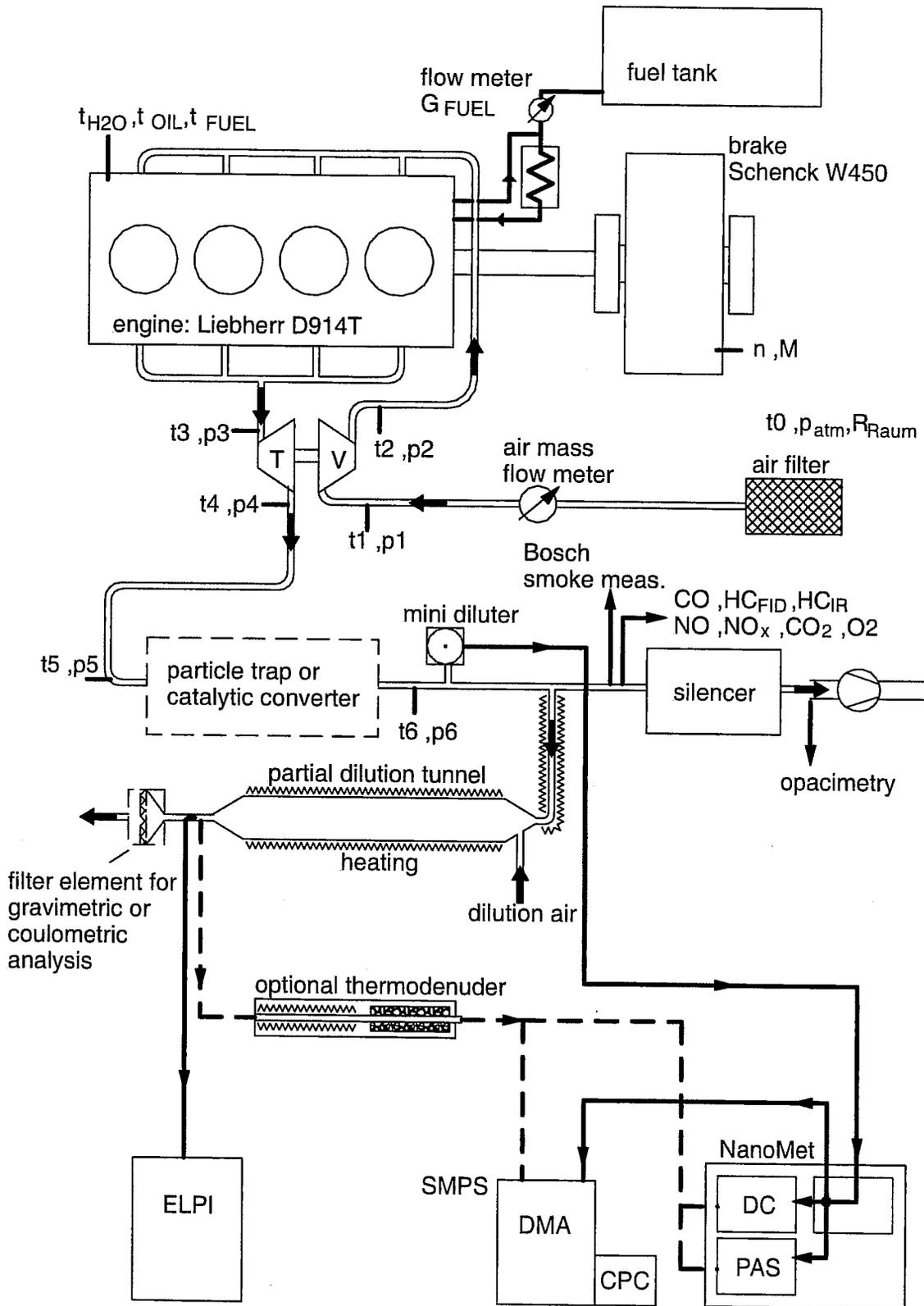


Fig. 8: Motorprüfstand und Standardmesstechnik

Folgende Laboreinrichtungen werden verwendet:

- Wirbelstrom Schenk W 450 mit Kraftmessdose HWM U2,
Verbrauchsmessung AIC 2022 mit Durchflussmesser FS-4/2400,
Luftmassenmesser DEGUSSA Deguflow 8740-20600
Bosch-Rauchmessung AVL Smoke Meter 409
Drucksensoren Keller PAA-2/8235, PD-4/8236,
Mantelthermoelemente Typ J, K
Luffilter Durulator P77-1558 (Duramont)
Ansaugluft Konditionierung: keine
Schalldämpfer: Mercedes, Spezialausführung

Prüfstand und Messkabine sind räumlich getrennt.

Verschiedene Messgrößen werden on-line via PC oder Linienschreiber erfasst. Eine kontinuierliche Aufzeichnung aller Größen ist möglich.

8.2. Standard-Emissionsmesstechnik

Entsprechend der schweizerischen Verordnung über die Abgasemission schwerer Motorwagen (FAV2 vom 22.10.1986), mit entsprechenden Updates gemäss der technischen Entwicklung.

- gasförmige Schadstoffe:
 - HORIBA für CO₂, CO, HC_{IR}, O₂: VIA-510; NO, NO₂: CLA-510
 - AMLUK FID, Typ FID 2010 für Gesamtkohlenwasserstoffe
- Partikelmessung:
 - Teilstrom-Verdünnungstunnel (Beilage 3) AVL Smart Sampler II, Modell 472
Tunneldurchmesser 70 mm
Tunnellänge 700 mm
Massenfluss konstant 2 g/s
Verdünnungsluft, oelfreie Pressluft, in der Regel 1.6 g/s (Verdünnung 1:5)
Verdünnungsverhältnis DF ist variabel, wird aus der CO₂-Analyse ermittelt
 - Gravimetrie:
Filtermaterial PALFLEX TX 40 HI 20-WW
Filterwirkungsgrad: 95%, 300 nm bis 99% (10 nm) (siehe SAE 950373, eigene Messungen),
Filtertemperatur: 52°C
Gesamtpartikelmasse in der Regel um 1 mg
Wägegenauigkeit ± 1 µg
Konditionierung: 8 ... 24 h (20°C, rel. Feuchte 50 %)
 - Opazimetrie:
AVL Dismoke 435 (1993)

Beim VFTa wird auf die Gravimetrie verzichtet, das wichtigste Beurteilungskriterium des Abscheideverhaltens ist der Partikelzahl-Abscheidegrad PZAG.

Die Berechnungen erfolgen mit dem Normalprogramm MS Excel 8.0. Alle Messreihen werden abgespeichert und stehen für mögliche zusätzliche weitere Auswertung zur Verfügung.

Die Berechnung der korrigierten Abgasemissionen erfolgt nach den gesetzlichen Vorschriften gemäss der schweizerischen Verordnung über die Abgasemissionen schwerer Motorwagen FAV 2.

Die Formeln für die Berechnungsgrößen sind im Anhang 1, die Nomenklatur im Anhang 2 aufgeführt.

8.3. Feinpartikel-Messverfahren und -Geräte

8.3.1. Überblick

Die angewendeten Feinpartikel-Messverfahren analysieren die emittierten Feinpartikel im Grössenbereich ab 6 nm bis einigen μm nach verschiedenen in Fig. 9 dargestellten Kriterien.

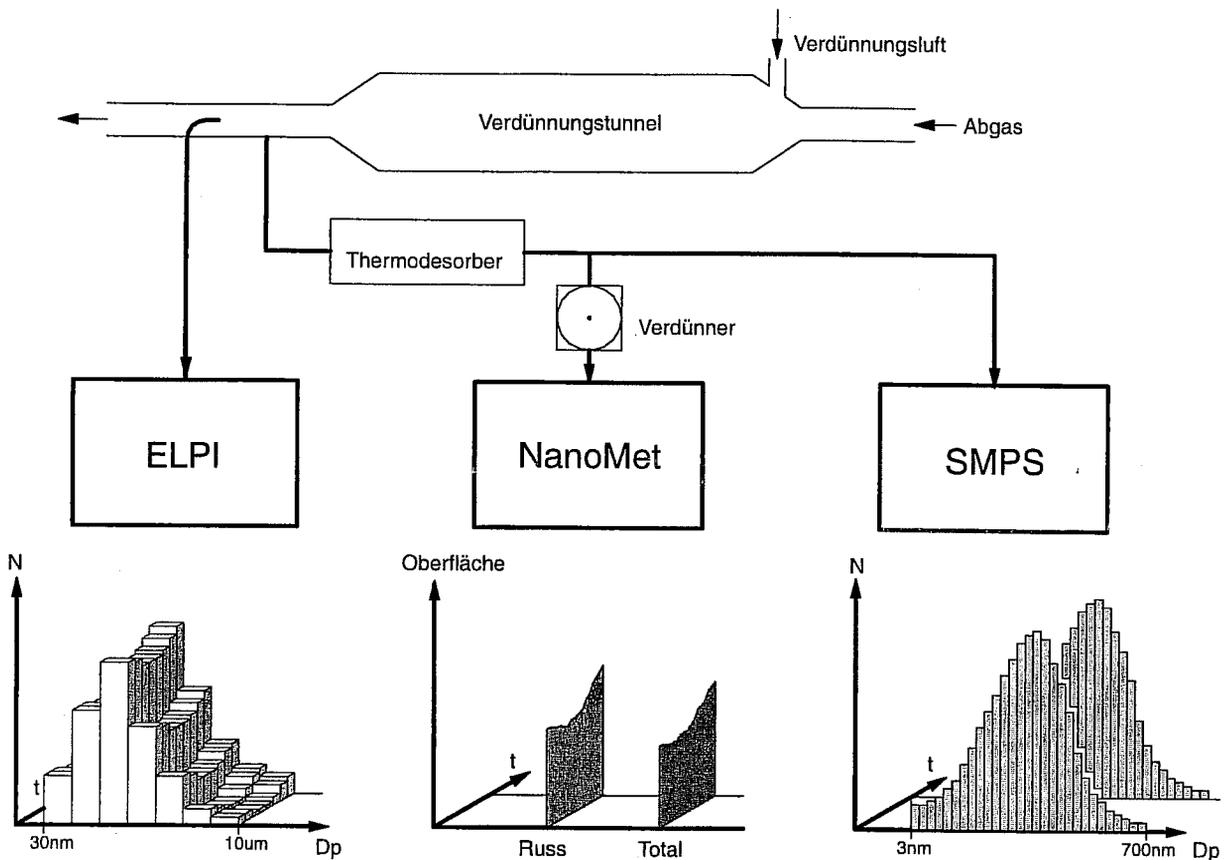


Fig. 9 Messverfahren, Partikel-Charakterisierung und Zeitauflösung

Die Feinpartikel-Messverfahren sind durch folgende Haupt-Eigenschaften gekennzeichnet:

- **ELPI, Electric Low Pressure Impactor.** Partikel-Grössenklassierung nach aerodynamischen Durchmesser. Niedrige Auflösung für Grösse, hohe Auflösung für Zeit bis 1 sek.
- **SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer.** Partikel-Grössenklassierung nach Mobilitätsdurchmesser. Hohe Auflösung für Grösse, niedrige Auflösung für Zeit, typische Scanzeit 1-3 min.
- **Thermodesorber,** ein Element zur Unterscheidung der festen und der flüchtigen Partikeln. Die Verdampfungstemperatur der Kondensatpartikel kann mit einer regelbaren Heizung bis zu 330 °C gewählt werden.
- **DC, Diffusion Charging Sensor (NanoMet).** Integrales Signal für aktive Oberfläche mit Zeitauflösung bis 0,5 sek.
- **PAS, Photoelektrischer Aerosol Sensor (NanoMet).** Integrales Signal für Russ-Oberfläche mit Zeitauflösung bis 0,5 sek.
- **MD19, einstellbare Miniverdünnungseinheit (NanoMet).** Probenahme und direkte starke Verdünnung des Rohgases.

Tabelle 1 zeigt die ausgesuchten Eigenschaften der in den Tests gebrauchten Messausrüstung. Genauere Beschreibungen befinden sich im Kap. 8.3.2.

Gerät System	Typ, Serie-Nr.	Messgrösse	Grössenbereich Klassierung	Grössen-Auflösung	Zeit-Auflösung
ELPI (DEKATI)	Model 97 2E S/N 24150	Anzahl-Konzentration	30 nm ... 10 µm aerodyn. Durchm.	12 Stufen	>= 1 sek.
SMPS ETH	DMA 3071 + CPC 3025A S/N 253 S/N 1092	Anzahl-Konzentration	16 nm ... 660 nm Mobilitäts-Durchmesser	105 Kanäle	1 – 3 min
SMPS FH Biel (TSI)	DMA 3081 + CPC 3010 S/N 8008 S/N 2230				
Nanomet DC (Matter Eng.)	LQ 1-DC S/N 100282	aktive Oberfläche	1 nm ... 1 µm	integraler Wert	>= 0.5 sek.
NanoMet PAS (EcoChem)	PAS 2000 S/N 143	Russ-Oberfläche	1 nm ... 1 µm	integraler Wert	>= 0.5 sek.
Thermo-desorber	Eigenkonstruktion	Unterscheidung fest / flüchtig	Geregelte Heiztemperatur 330°C Aktivkohleenteil mit Wasserkühlung		
Rotations-verdünner (Matter Eng.)	MD19-2E	Aerosol-Verdünner	Einstellbare Verdünnung von 1:20 bis 1:2000 Unverdünnter Bereich beheizbar 80 bis 150°C		

Tabelle 1: Typen und Haupteigenschaften der eingesetzten Messgeräte und -Systeme

8.3.2. Detailbeschreibung der Messgeräte und-Systeme

ELPI

Das ELPI (**E**lectrical **L**ow **P**ressure **I**mpactor), dargestellt im Blockdiagramm Fig. 10, ist ein 12-stufiger Kaskaden-Impaktor, der die Partikel-Anzahlkonzentration in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmesser misst.

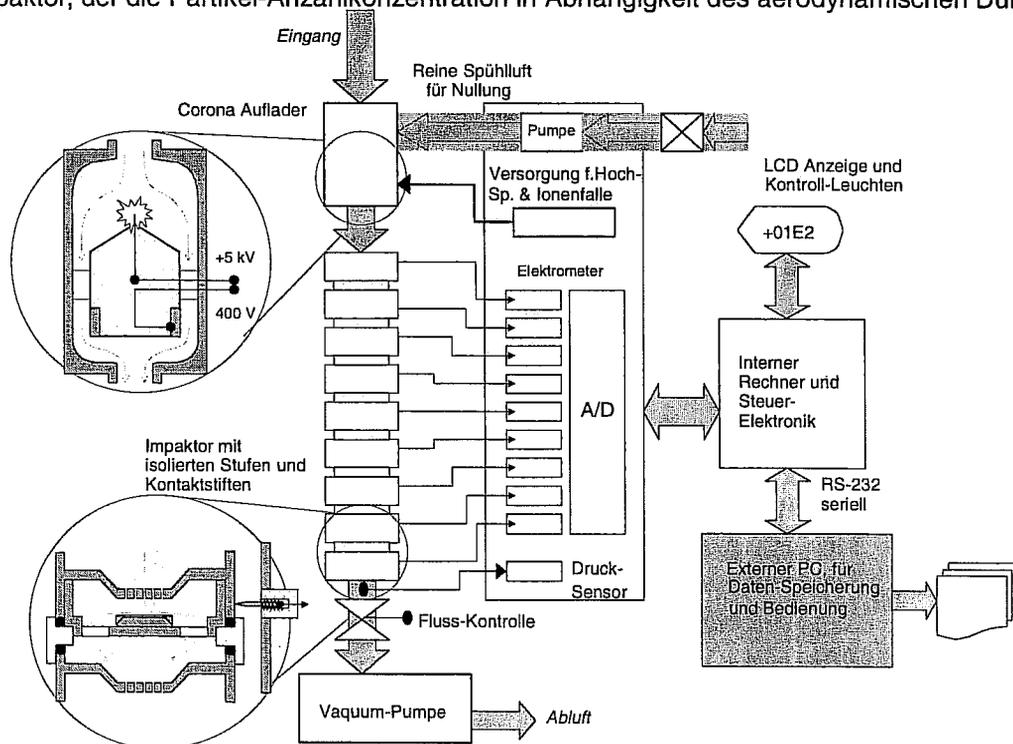


Fig. 10: ELPI Block-Diagramm

Der Impaktor ist ein grössenselektives Element, in welchem das Aerosol durch eine Düse geführt wird, hinter welcher eine Platte dem Gasstrom Aerosol eine abrupte Richtungsänderung aufzwingt. Wegen ihrer Trägheit können die Partikel die Richtungsänderung im Trägergas nicht stromlinienförmig mitvollziehen sondern werden in Richtung Platte abgedrängt. Die Richtungsänderung der Partikel ist bestimmt durch ihre Wechselwirkung mit dem Gas. In Abhängigkeit des Grösse zu Masse Verhältnisses resp. ihrer Grösse und Dichte wird ein Teil der Partikel an der Platte abgeschieden, d.h. geht im Aerosol verloren. Der Durchmesser, welcher durch diesen Trennprozess definiert wird, wird mit aerodynamischem Durchmesser bezeichnet. Die Grösse-Grenze zwischen abgeschiedenen und an der Platte vorbeiströmenden Partikeln - der Cutoff-Durchmesser - hängt von der Geschwindigkeit in und dem Druckabfall über der Düse, der Impaktor-Geometrie und der Dichte ab. Durch Aenderung dieser Parameter, üblicherweise durch Druckänderung hinter der Düse, wird der Cutoff-Durchmesser auf den gewünschten Wert eingestellt.

Das ELPI setzt sich aus 12 hintereinander geschalteten Impaktorstufen mit abnehmendem Cutoff-Durchmesser zusammen. Die Partikel, die in einer Stufe abgeschieden werden gehören zur Grössenklasse, die durch den eigenen Cutoff-Durchmesser und jenem der darüberliegenden Stufe begrenzt ist.

Nach dieser Klassierung wird die Menge der in jeder Stufe abgeschiedenen Partikel quantifiziert. Im klassischen Impaktor geschieht dies durch gravimetrische Bestimmung der Partikelmasse in jeder Stufe. Diese Methode hat zwei wesentliche Nachteile. Sie ist unempfindlich, da hohe Partikelkonzentrationen oder lange Sammelzeiten für eine hinreichende Genauigkeit notwendig sind und sie erlaubt keine kontinuierliche Messung. Die folgenden Massnahmen erweitern das ELPI zu einem sowohl kontinuierlich wie über grössenklassierte gravimetrische Filteranalysen arbeitenden System: Die Partikel werden nach dem Eintritt vor den Impaktorstufen über eine Diffusionsaufladung elektrisch unipolar aufgeladen. Jede isoliert montierte Impaktorstufe ist mit dem Eingang eines Elektrometer-Verstärkers verbunden. Die einzelnen Impaktorstufen nehmen die Ladung der abgeschiedenen Partikel auf, welche im dazugehörigen Elektrometerverstärker mit einer Zeitaufösung im Sekundenbereich verstärkt und weiterverarbeitet wird. Aus der bekannten mittleren Ladung pro Partikel in Abhängigkeit der Partikelgrösse lassen sich die 12 elektrischen Signale in eine Anzahl-Konzentration-Grössenverteilung in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers von 30 nm bis 10 μm umrechnen (Fig. 11).

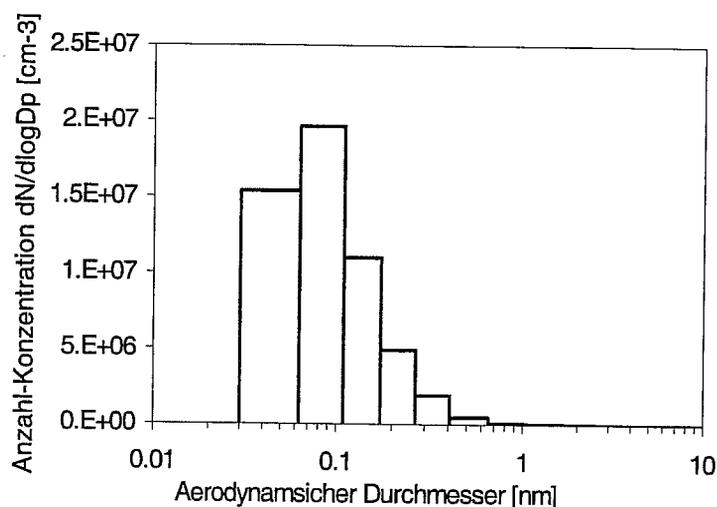


Fig. 11: Typische ELPI-Grössenverteilung. Die Verteilung wurde im Abgas eines Diesel PKW mit Common Rail-Motor bei 70 km/h auf dem Rollenprüfstand gemessen

SMPS

SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) dargestellt im Blockdiagramm Fig. 12, ist ein Mess-System zur Bestimmung von Partikel-Größenverteilungen in Abhängigkeit des Mobilitäts-Durchmessers [19]. Es setzt sich zusammen aus einem bipolaren Auflader, einem differentiellen Mobilitäts Analysator (DMA), einem Kondensationskern Partikelzähler (CPC) und einer PC-Software für die Steuerung des Systems.

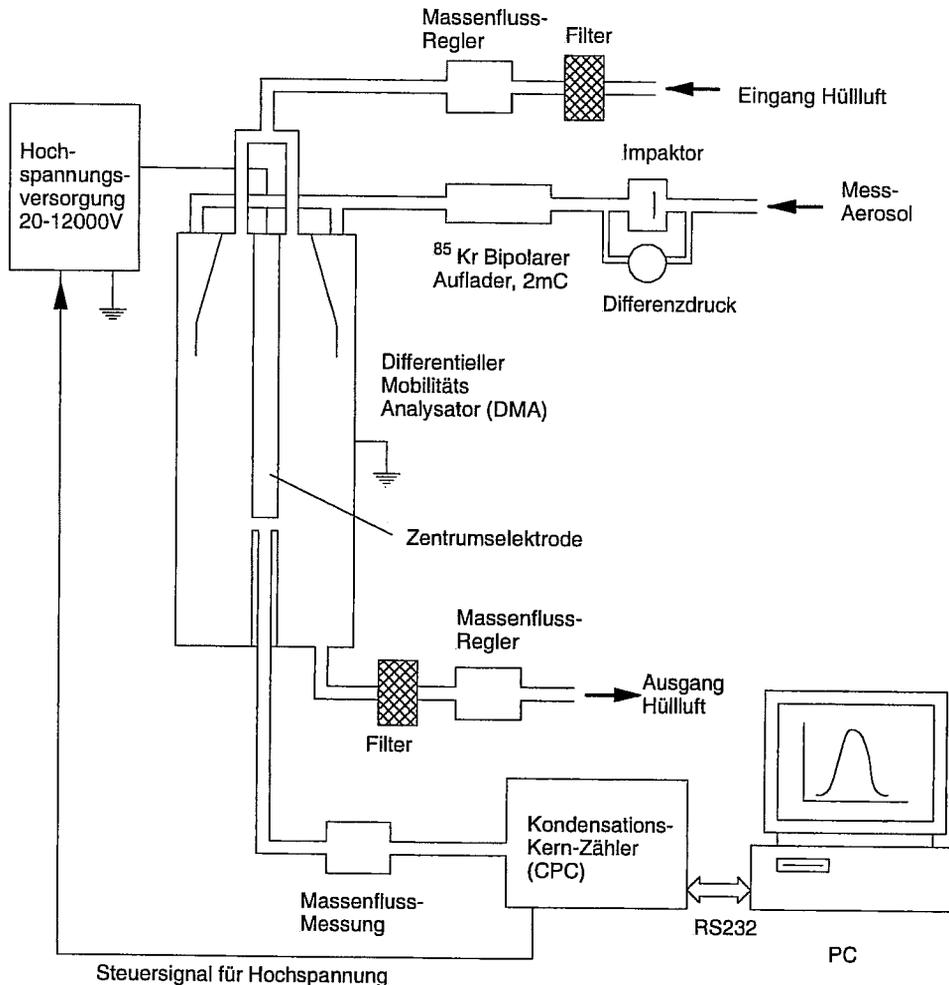


Fig. 12: Blockdiagramm von SMPS

Das Aerosol durchströmt zuerst den Neutralisator, in welchem die Gasionen von der weichen Bestrahlung einer ^{85}Kr -Quelle bipolar aufgeladen werden. Die positiven und negativen Gasionen diffundieren auf die Oberfläche der Partikel bis sich ein Ladungs-Gleichgewicht einstellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein 100 nm-Partikel dabei eine positive Ladung aufnimmt, ist etwa 1 %, für eine negative Ladung ist sie etwa 2 %. Der Rest der Partikel wird nicht geladen - daher die Bezeichnung Neutralisator.

Die geladenen Partikel werden anschliessend im differentiellen Mobilitäts-Analysator (DMA) nach ihrer Mobilität klassiert. Der DMA ist ein langer Kondensator, der laminar von einer partikelfreien Hüllluft durchströmt wird. Seine Geometrie ist aus praktischen Gründen zylinderförmig. Das polydispense Aerosol gelangt durch eine enge Eintrittsöffnung in den oberen Teil des DMA. Die vertikal zur Strömungsrichtung angelegte Hochspannung verschiebt die im Trägergas nach unten strömenden geladenen Partikel in Richtung Zentrum. Die Geschwindigkeit dieser Bewegung nach innen ist bestimmt durch das Gleichgewicht der elektrischen Feldkraft und der Reibung im Trägergas. Kleine Partikel bewegen sich schneller und grosse langsamer, d.h. auf ihrer Bahn nach unten nähern sich die kleinen Partikel dem Zentrum schneller als die grossen. Am unteren Ende der Zentrums- und Peripherielektrode befindet sich ein enger Austrittsschlitz, durch welchen nur Teilchen einer be-

stimmten Grösse austreten. Diese Grösse kann durch die Einstellung der Hochspannung variiert werden. Partikel die kleiner als die dem Austritt entsprechende Grösse sind, bleiben an der Zentrumselektrode hängen, die grösseren werden mit der Hüllluft abgepumpt.

Ein CPC misst die aus dem DMA austretenden monodispersen Partikel über eine optische Streulicht-Messung als Anzahl-Konzentration. Die submikronen Partikel, die für eine direkte optische Zählung zu klein wären, werden dabei auf folgende Weise vergrössert. Das Trägergas wird mit Butanoldampf gesättigt und anschliessend gekühlt. Die Partikel wirken für den Lösungsmitteldampf als Kondensationskerne und um jedes Partikel bildet sich ein mehrerer μm grosser Tropfen. Diese Partikelgrösse lässt sich über die optische Streulicht-Detektion zuverlässig und relativ einfach im Zählmodus messen.

SMPS beinhaltet eine PC-Steuersoftware, die in wählbaren Scan-Zeiten die Hochspannung des DMA variiert und die im CPC gemessene Anzahlkonzentration dem entsprechenden Mobilitäts-durchmesser zuordnet. Unter Berücksichtigung aller Parameter wie DMA-Geometrie, Gasflüsse, Ladungsverteilung nach dem Neutralisator und Scan-Zeiten wird über die Software eine Grössenverteilung berechnet, die als Anzahl-, geometrische Oberflächen- oder Volumen-Konzentration darstellbar ist. Fig. 13 zeigt eine solche Verteilung als Anzahl-Konzentration.

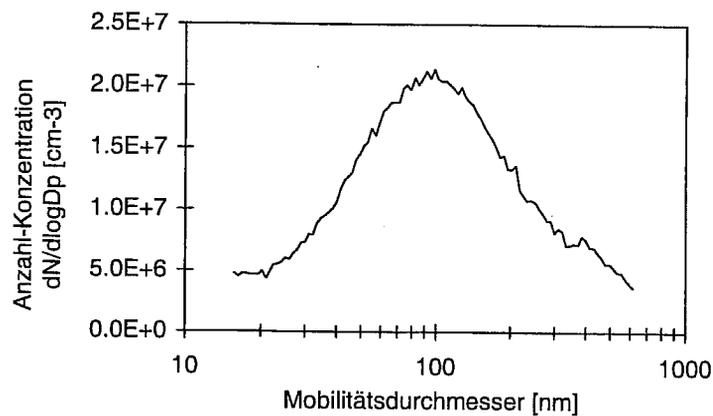


Fig. 13: Typisches SMPS-Grössenspektrum für Russpartikel aus einem Dieselmotor bei niedriger Drehzahl und hoher Last

NanoMet

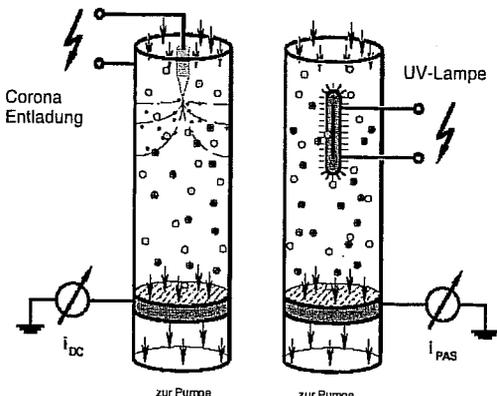
NanoMet ist ein modulares Messsystem für die online Charakterisierung von Aerosolen, bestehend aus einem Miniverdünner, zwei Sensoren und verschiedenem Zubehör für den Einsatz im Feld, in Prüfeinrichtungen wie auch im Labor.

Im vorliegenden Messprogramm kamen folgende NanoMet-Komponenten zum Einsatz:

- Zwei online messende Sensoren, der Diffusions-Aufladungs-Sensor (DC) für die aktive Partikel-Oberfläche und der photoelektrische Aerosol-Sensor (PAS) für die Russ-Oberfläche
- Ein Miniverdünner, der direkt an das Auspuffsystem angeschlossen, die Partikelkonzentration auf ein Niveau innerhalb der Sensor-Nennbereiche verdünnt.

PAS- und DC-Sensor

Die beiden Partikelsensoren laden die Partikel elektrisch auf, bevor sie in einem hoch isolierten Partikelfilter aufgefangen werden. Das Funktionsprinzip ist in Fig. 14 dargestellt.



- i_{DC}, i_{DC}, i_{PAS} Strom ab Filter in DC/PAS-Sensor
- S_{aktive} aktive Oberfläche eines Partikels
- ϕ Materialkonstante des Aerosols
- Σ Summe über alle Partikel

Fig. 14: Prinzipschema von PAS- und DC-Sensor

$$i_{DC} \propto \sum S_{aktive} \quad i_{PAS} \propto \sum S_{aktive} \cdot \phi$$

Ein Elektrometer-Verstärker erzeugt aus der integrierten Partikel-Ladung ein Gleichspannungs-Signal mit einer Ansprechzeit, die bis 0.5 Sek. optimiert werden kann. Der gemessene Strom ist proportional zur Wahrscheinlichkeit, mit der die Partikel aufgeladen werden. Für die Charakterisierung der Partikel werden zwei verschiedene Aufladungsmethoden angewendet. Im DC-Sensor erhalten die Partikel ihre Ladung über eine Diffusions-Aufladung von unipolaren, in einer Corona-Entladung erzeugten Gasionen. Die Ladungs-Effizienz ist abhängig von der nach der Mobilität definierten Grösse und weitgehend unabhängig von der chemischen Zusammensetzung [20]. Das mit der Diffusions-Aufladung gemessene Signal aus dem Elektrometer-Verstärker ist ein Mass für die aktive Oberfläche [21] und wird auch als Fuchs Oberfläche bezeichnet. Für kleine Partikel-Durchmesser unterhalb der freien Weglänge λ des Trärgases ($\lambda = 66 \text{ nm}$), d.h. im Bereich der freien molekularen Bewegung des Partikels entspricht die aktive Oberfläche der geometrischen Oberfläche $\pi (D_p)^2$. Für grosse Partikel, die sich im laminaren Trärgas nach dem Stokes Gesetz bewegen, ist die aktive Oberfläche proportional zu D_p . Der Zwischenbereich wird interpoliert durch eine Exponentialfunktion, dessen Exponent sich kontinuierlich von 2 im molekularen auf 1 im Stokes Bereich ändert. Die Berechnung der aktiven Oberfläche beruht auf der in Keller et. al. [21] hergeleiteten Beziehung, wonach das Produkt aus Mobilität und Massentransfer-Koeffizient für Gasionen eine von der Partikelgrösse unabhängige Konstante ist. Diese grössenunabhängige Relation ermöglicht eine Kalibrierung des DC-Sensors mit Standard Partikel-Messgeräten. Der Kalibrationsfaktor berechnet sich aus dem Vergleich des DC-Signals mit der Anzahlkonzentration, wenn DC-Sensor und CPC parallel die monodispersen Partikel einer bekannten Mobilität resp. Grösse aus einem DMA messen.

Im photoelektrischen Aerosolsensor (PAS) erfolgt die Aufladung der Partikel durch monochromatisches 222 nm UV-Licht aus einer Excimer-Lampe. Die Abhängigkeit des PAS-Signals von der Partikelgrösse ist ähnlich jener des DC-Sensors. Zusätzlich geht aber in die Kalibration ein Faktor ein, der von der chemischen Zusammensetzung der Partikel abhängt. Viele Untersuchungen haben bestätigt, dass sich im angewendeten UV-Wellenlängenbereich um 200 nm submikrone Russpartikel aus der Verbrennung fossiler Treibstoffe besonders gut photoelektrisch aufladen lassen.

Für verschiedene Verbrennungsaerosole findet man eine gute Korrelation des PAS-Signals zur Konzentration der an die Partikel gebundenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PPAH) [22]. Bei Russpartikel von Dieselmotoren in Emissionen wie auch quellennahen Immissionen korreliert das PAS-Signal zudem mit der coulometrisch gemessenen Konzentration des elementaren Kohlenstoffs (EC) [23].

Andere in Verbrennungsabgasen auftretende Partikel, z.B. im Verdünnungsprozess entstehende flüchtige Nanopartikel oder mineralische Nanopartikel aus Treibstoff-Zusätzen sowie auch Gase lassen sich vom UV-Licht nicht aufladen. Mit dieser selektiven, chemieabhängigen Aufladungseffizienz wird PAS zum idealen selektiven Russdetektor mit geringer Querempfindlichkeit zu andern Stoffen.

Die simultane Messung eines Aerosols mit PAS und DC kann zwei wichtige Informationen liefern:

- Das PAS/DC-Signal-Verhältnis hat charakteristische, sich von einander deutlich unterscheidende Werte für die Partikel aus verschiedenen Verbrennungsquellen (siehe Fig. 15). Bei Kenntnis möglicher Verbrennungsquellen erlaubt dies in beschränktem Umfang eine Quellenzuordnung.
- Bei der Messung von Dieselmotor-Emissionen erkennt man aus dem PAS/DC-Signal-Verhältnis, ob das Abgas sich ausschliesslich aus Russpartikeln oder weiteren Partikeln wie flüchtigen oder mineralischen Nanopartikeln zusammensetzt.

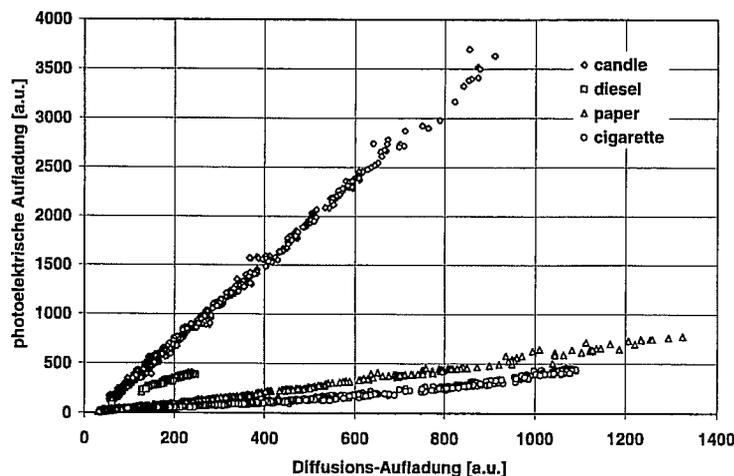


Fig. 15: PAS/DC-Signal-Verhältnis für verschiedene Verbrennungsaerosole

MD19-Miniverdünner

Der Miniverdünner [24], Fig. 16, ist eine Komponente des beschriebenen NanoMet Feinpartikel-Messsystems. Als Typ MD19-2E ist er ein eigenständiges kompaktes Gerät für die Probenahme aus dem Rohgas und dessen Verdünnung. Im Rahmen des maximal verfügbaren Messgasflusses von 5 l/min können ihm auch andere Messgeräte für Feinpartikel oder Gase nachgeschaltet werden.

Die herausragenden Vorteile dieses Verdünners sind seine kompakte Konstruktion und einfache Bedienung, die kontinuierliche Einstellung des Verdünnungsverhältnisses über 2 Dekaden und der schnelle Anschluss des Probenahmekopfes an geschlossene Systeme (Auspuff, Kamin).

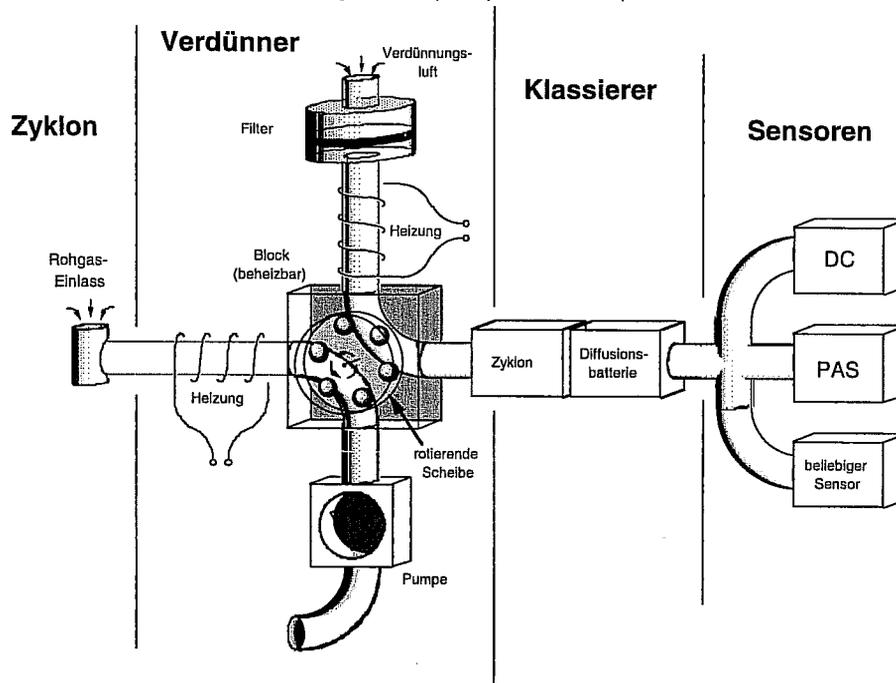


Fig. 16: Prinzipschema des MD19-Miniverdünners mit Anschluss von Feinpartikel-Sensoren

Die Verdünnung findet in einem beheizten Stahlblock mit zwei getrennten Gaskanälen statt. Durch den einen Kanal wird das unverdünnte Rohgas, durch den anderen die Verdünnungsluft geführt. Diesem wird das Rohgas auf folgende Weise beigemischt: Mittels einer drehenden Scheibe wird das Rohgas in Kavitäten in der auf dem Verdünnungsblock aufliegenden Scheibenseite in den Verdünnungsluft-Kanal transportiert. Das Verdünnungsverhältnis ist von der Scheibendrehzahl, dem Gasfluss im Verdünnungsluft-Kanal, dem Volumen und der Anzahl Kavitäten auf der Scheibe abhängig.

Er ist kontinuierlich im Bereich 1:30 bis 1:3000 durch Variation der Drehzahl und Wahl einer Scheibe mit 2 oder 10 Kavitäten einstellbar. Die Einstellung erfolgt wahlweise an einem 10-Gang-Potentiometer mit Einstellskala oder über ein analoges Steuersignal. Da der Fluss der Verdünnungsluft resp. des Messgases durch die angeschlossenen Sensoren bestimmt ist, wird dieser Fluss gemessen und dessen Einfluss auf die Verdünnung elektronisch kompensiert. Wichtig für die einwandfreie Funktion dieses Verdünnungsprinzips sind die absolute Dichtheit zwischen Scheibe und Verdünnungsblock sowie gute Gleiteigenschaften der beiden zueinander rotierenden Flächen. Dies wird mit geläppten Oberflächen realisiert, die über eine wenige μm dicke Spezialbeschichtung gute Gleiteigenschaften erhalten. Der Verdünnungsblock und die Verdünnungsluft sind auf geregelte und einstellbare Temperaturen von 80, 120 oder 150 °C beheizt. Mit dieser Beheizung und den hohen einstellbaren Verdünnungsfaktoren wird die spontane Nukleation von Gasen zu flüchtigen Nanopartikeln vermieden, die oft bei niedrigen Verdünnungen in standardisierten Verdünnungstunnels mit nicht beheizter Verdünnungsluft beobachtet werden.

Thermodesorber

Die Funktion des Thermodesorbers ist die Unterscheidung von flüchtigen und nichtflüchtigen Partikeln in einem Aerosolgemisch. Diese Flüchtigkeit bezieht sich auf eine Verdampfungs-temperatur der Partikel, die in der Heizzone des Thermodesorbers bis 330 °C eingestellt werden kann. Der in Fig. 17 schematisch dargestellte, in den Messprogrammen eingesetzte Thermodesorber ist ein Eigenbau des Lab. für Festkörperphysik der ETH-Zürich.

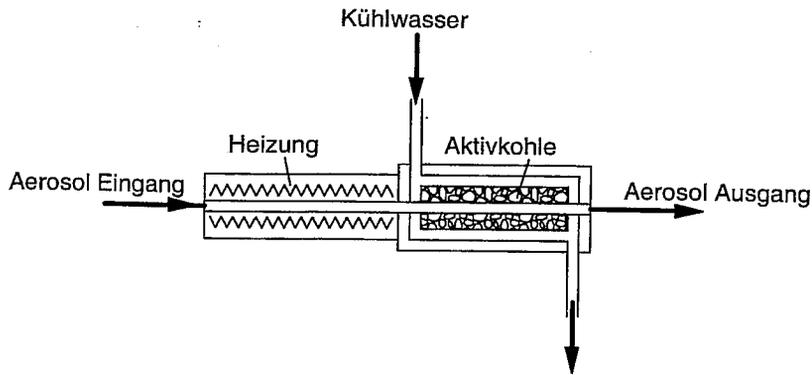


Fig. 17: Blockschema des Thermodesorbers

Das Aerosol strömt zuerst in die Heizzone wo flüchtige Partikel mit Verdampfungstemperaturen unterhalb der eingestellten Temperatur verdampft werden. Nach dem abrupten Uebergang in die gekühlte Aktivkohlenzone diffundieren die Gase des verdampften Aerosols wegen ihrer hohen Mobilität durch die perforierte Gasleitung in die Aktivkohle und werden von dieser eingefangen. Im Gegensatz dazu ist die Diffusion der Partikel im Trägergas an und durch die perforierte Gasleitung je nach Konstruktion vernachlässigbar oder kann als Korrektur quantifiziert werden. Im Trägergasstrom hinter dem Thermodesorber bleiben deshalb die Festpartikel, resp. jene die bei der eingestellten Heiztemperatur nicht verdampft werden, übrig.

Eine wertvolle Aussage über die Zusammensetzung des Aerosols ergibt sich über die Messung der Partikel bei verschiedenen Heiztemperaturen. Bei den Verdampfungstemperaturen von flüchtigen Partikeln ändern sich die Messergebnisse sprunghaft und lassen so Rückschlüsse auf die Art des Aerosols zu.

Fig. 18 zeigt eine SMPS-Grössenverteilungs-Mess-Serie am Dieselpfprüfstand hinter einem Sintermetall-Partikelfilter der einen Wirkungsgrad von etwa 99 % für die Abscheidung von Feinpartikel hat. Beim Start der SMPS-Messungen wird die auf etwa 330 °C eingestellte Heizung des Thermodesorbers abgeschaltet. Während der Abkühlphase werden mit einer Scan-Zeit von 2.5 Min entsprechend einem Temperaturraster von 20-30 °C laufend Grössenspektren gemessen. In diesem Thermogramm sieht man in der Verteilung oberhalb 204 °C nur die für nichtflüchtige Dieselpartikel typische monomodale Verteilung mit dem Maximum bei etwa 100 nm. Unterhalb 200 °C treten Nanopartikel im Grössenbereich von etwa 20 nm auf, deren Anzahlkonzentration um mehr als 2 Dekaden höher als jene der Dieselpartikel liegt. Die Anzahlkonzentration steigt durch dieses Phänomen auf höhere Werte als die totale Anzahlkonzentration ohne Partikelfilter. Es ist inzwischen bekannt, dass, vor allem beeinflusst durch katalytisch wirkende Abgas-Nachbehandlungselemente, Gase im Verdünnungsprozess spontan zu solchen Nanopartikeln nuklieren können. Ein häufig beobachteter Prozess nach solchen katalytischen Elementen ist die Aufoxidierung von SO_2 in SO_3 , was im Verdünnungs- und Abkühlprozess zur Bildung von wässrigen Schwefelsäuretröpfchen im Grössenbereich von wenigen 10 nm führt.

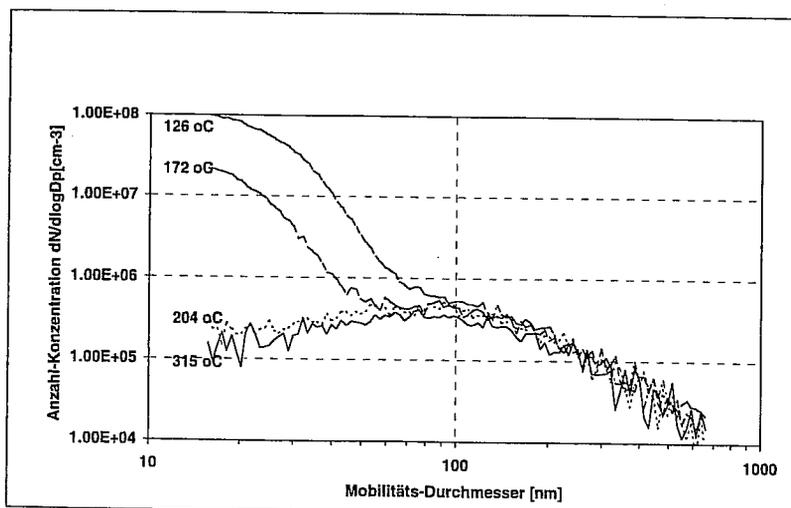


Fig. 18: Thermogramm mit SMPS-Grössenverteilungen von Dieselpartikel-Emissionen hinter einem Sintermetall-Partikelfilter

8.4. Coulometrische Analyse des PM-Filtrerrückstandes (EC + OC)

- Kohlenstoff: Untersuchung des Filtrerrückstandes im Bezug auf Elementarkohlenstoff EC und organischen Kohlenstoff OC ist in Deutschland eine offizielle Referenzmethode zur Bestimmung der Russmengen in Immissionen und am Arbeitsplatz (Richtlinie VDI 2465). In der Schweiz überwacht die SUVA die Diesel-Immissionen am Arbeitsplatz mit Hilfe derselben Methode (gemäss ZH 1/120.44, Oktober 1990: anerkannte Analyseverfahren für Dieselmotoren-Immissionen des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften) und führte auch die entsprechenden Analysen mit den Proben der vorliegenden Arbeit aus.
- Messprinzip: Der im Filtrerrückstand enthaltene Kohlenstoff und seine Verbindungen werden in einem zweistufigen Verfahren verbrannt und das freiwerdende Kohlendioxid coulometrisch bestimmt.
- Die am Russ adsorbierten Kohlenwasserstoffe werden in Stickstoffstrom ausgetrieben und an CuO oxidiert.
- Der elementare Russ wird im Sauerstoffstrom verbrannt.
- Das in jedem Teilschritt entstandene Kohlendioxid haltige Reaktionsgas wird in die thermostatisierte, mit stark alkalischer Bariumperchlorat gefüllte Messzelle des Coulomaten geleitet, adsorbiert und als Bariumcarbonat ausgefällt. Dies bewirkt eine Abnahme der Alkalität. Die resultierende pH-Veränderung wird potentiometrisch mit Hilfe einer Glaselektrode verfolgt. Anschliessend wird coulometrisch auf den ursprünglichen pH-Wert der Adsorptionslösung zurück „titriert“. Die hierzu erforderliche Ladungsmenge ist zu der adsorbierten CO₂-Menge und damit zum Kohlenstoffgehalt der Probe proportional.

Mit dem angewendeten coulometrischen Verfahren wird sowohl die Menge an Elementarkohlenstoff (EC) wie auch an organischem Kohlenstoff (OC), d.h. als Summe der beiden Mengen der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) bestimmt.

Beim VFTa wird auf die Coulometrie verzichtet, das wichtigste Beurteilungskriterium des Abscheideverhaltens ist der Partikelzahl-Abscheidegrad PZAG.

8.5. Analyse von SOF/INSOF und Sulfaten durch Extraktionsmethoden

Dies ist eine 3-stufige Vorgangsweise

- Um den HC-Gehalt der Probe zu bestimmen (PM-Probe am PALLFLEX Glassfaserfilter) wird diese mit Dichlormethan extrahiert und das Gewicht des extrahierten Materials (Summe der HC) wird durch den Vergleich der verbliebenen Masse der Probe (nach Verdampfung des Lösungsmittels) mit der ursprünglichen Totalmasse bestimmt.
- Um den Sulfat-Gehalt zu bestimmen wird ähnliche Extraktion mit Wasser-Isopropanol-Lösung (9:1) durchgeführt.
- Die nach den zwei Extraktionen verbleibende Masse ist das unlösliche Material, üblicherweise als Russ bezeichnet, doch auch vermischt mit anderen INSOF-Substanzen, wie Metallabrieb, Minerale und Metalloxide aus den Additiven.

Standardabweichung dieser Methode pro gemessenen Filter ist: ca. 20 – 30 µg für HC und 40 µg für Russ, [15].

9. Versuchsdurchführung

Testzyklus siehe Kap. 4.1. und Fig. 1

Messablauf

- Motorkonditionierung: mit Partikelfilter 60 Min.; ohne Partikelfilter 40 Min.
- Konditionierungsprogramm: 5 Lastpunkte, gleicher Dauer, aufsteigende Last von Leerlauf bis Vollast

- Start der Messung: Grössenverteilung 30 s nach Einstellen des Betriebspunktes; Messgrössen 5 Min. nach Einstellen
- Zeit für kompletten Messablauf: 10 Min. pro Betriebspunkt
- Zeit für Wiederholungsmessungen: 10 Min.
- Reihenfolge der Betriebspunkte in der ersten Testphase: Punkt 9 und 10
- Reihenfolge der Betriebspunkte in der zweiten Testphase: Punkt 9 – 6 – 13
- Reihenfolge der Betriebspunkte in der dritten Testphase: Punkt 9 – 6
- Reihenfolge der Betriebspunkte in der vierten Testphase: Wiederholungen der Messungen bei Punkt 6
- Partikelgravimetrie und Coulometrie: wird bei VFTa nicht durchgeführt
- Freibeschleunigung mit Opacimetrie

Kontrolle der Versuchsbedingungen

- Umgebungstemperatur: eine Messung pro Testsequenz (Testsequenz, d.i. die erwähnten 4 Betriebspunkte mit Wiederholung Punkt 2)
- Barometerstand: eine Messung pro Testsequenz
- Umgebungsfeuchte: eine Messung pro Testsequenz
- CO₂-Inhalt der Umgebungsluft: eine Messung pro Testsequenz
- Temperatur in der Testzelle: nicht geregelt
- Lufteintrittstemperatur nach Filter: 20°C - 25°C (bis 30°C im Sommer), manuell geregelt durch Aussenluftzufuhr (ausser bei sehr hohen Umgebungstemperaturen)
- Öldruck und Öltemperatur: laufende Überwachung durch Prüfstandssteuerung
- Motorkühlwassertemperatur: laufende Überwachung, gemäss Herstellerangabe

10. Probanden

10.1. Partikelfilter

- Hersteller: EHC Teknik AB, SE-43330 Partille, Sweden
- Filtertyp: Aufsteckfilter Typ HT Nr. 804, s. Anhang A3
- zulässige Temperatur: 350 °C
- zulässiger Ist-Volumendurchsatz: 16 m³/min.

Der Aufbau des EHC Steckfilters nach dem Schalldämpfer des Versuchsmotors ist im Anhang A4 dargestellt.

Für den Aufsteck-Partikelfilter wird generell kein Regenerationsadditiv gebraucht. Der Filtereinsatz wird extern gereinigt.

11. Ergebnisse

Die zusammenfassenden Diagramme der Messresultate der letzten Messserie befinden sich in den Beilagen siehe Beilagenliste, Kap. 15. Die Ergebnisse der Motormessungen und der berechneten Parameter befinden sich in Tabellenform im Anhang A5, A6, siehe Kap. 16.

Einige Messserien wurden als Vorversuche durchgeführt, A7, A8, A9. Es zeigte sich, dass das Filtermaterial des neuen Filters zur Quelle der Nanopartikel wird, welche bezüglich Zusammensetzung und Schädlichkeit schwer zu definieren sind. Erst nach einer längeren Konditionierungsphase bei Temperatur über 300°C hört diese Eigenemission des Partikelfilters auf.

Im Folgenden sind einige Ergebnisse der letzten Messserie dargestellt, die den genannten Effekt belegen. Diese Messserie wurde nur bei einem Betriebspunkt (pt. 6), doch mit mehreren Messungen in verschiedenen Zeitabständen durchgeführt.

Fig. 19 – der untersuchte EHC-HT Wechselfilter reduziert deutlich die Schwärzungszahl SZ und hat prinzipiell keinen Einfluss auf die flüchtigen Abgaskomponenten.

Fig. 20 – der Partikelfilter eliminiert auch deutlich den Schwarzrauch während der freien Beschleunigung, doch die Spitzenwerte der Opazität reichen bis 5.5 % Trübung.

In der folgenden Figur 21 sind die SMPS-Grössenverteilungsspektren der Nanopartikel ohne und mit Partikelfilter nach verschiedenen Laufzeiten dargestellt. Das verbesserte Abscheideverhalten nach etwa 1h Laufzeit ist deutlich.

Fig. 22 - die integrierten Partikelzahlen im Grössenbereich 20 – 300 nm zeigen für den untersuchten DPF nach der Laufzeit von 1h Werte, welche um bis zu 1.5 Grössenordnung tiefer liegen als ohne DPF. Die Partikelzahl – Abscheidegrade PZAG stabilisieren sich dann auf Werte grösser 95 %, was den Minimalanforderungen von VFT entspricht.

Fig. 23 - zeigt die Resultate mit den on-line-Sensoren (NanoMet) bei allen Messpunkten.

Die PAS- und DC-Signale wurden zu den Werten umgewandelt, welche dem unverdünnten Abgas entsprechen.

PAS (photoelectric aerosol sensor) gibt ein Signal ab, welches von der Partikeloberfläche und von der chemischen Zusammensetzung der an der Oberfläche angelagerten Substanzen abhängt.

DC (diffusion charging sensor) generiert dagegen ein Signal, welches hauptsächlich zu der summarischen Partikeloberfläche proportional ist.

Weitere Informationen über PAS und DC siehe Kap. 8.3.2.

Mit DPF sind die Werte der beiden Signale um etwa 1 Grössenordnung reduziert.

Penetration ist ein Parameter, welcher den Anteil der durch den Filter durchgegangenen Partikel darstellt, dies ist das Verhältnis der Anzahlkonzentrationen nach/vor Partikelfilter.

$$\text{Penetration} = 1 - \text{Abscheidegrad}$$

Die dargestellten Penetrationen für die totale Partikeloberfläche (DC, einschliesslich Kondensate) und die Penetrationen für feste Partikel (PAS) bestätigen die vorhin erwähnten Ergebnisse, wonach die Penetration von Festpartikel nach längerer Betriebszeit des DPF's bis auf 5 % herabsinkt.

Es ist ersichtlich, dass der zuerst gemessene Betriebspunkt die schwächste Abscheidung aufweist. Im Laufe der Messungen belegt sich der DPF mit Russ und erhöht den Abscheidewirkungsgrad. Dies ist anhand der monoton steigenden Werte von PZAG in Fig. 22 ersichtlich. Gleichzeitig hört mit der Laufzeit die Eigenemission des Filtermaterials auf.

Der untersuchte EHC-HT Aufsteckfilter erfüllt die VERT-Anforderungen bezüglich der Filtrationsqualität, wenn der Konditionierungsprozess als integraler Bestandteil der Produktion integriert wird. Diese Konditionierung ist vom Hersteller im Anhang, A10, beschrieben.

12. Schlussfolgerungen

Die Resultate können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Im Neuzustand ist die Abscheidung des EHC-HT-Wechselfilters nicht befriedigend, vorwiegend wegen der Eigenemission der Nanopartikel durch das Filtermaterial
- Die Abscheideeffizienz des belegten und konditionierten Filters ist sehr gut (PZAG = 95 %)
- Die Reduzierung des opazimetrischen Rauchstosses bei Freibeschleunigung ist mit dem Spitzenwert bis zu 5,5 % befriedigend.

Der untersuchte EHC-HT-Wechsel-Partikelfilter erfüllt die Anforderungen des VERT-Filtertests (VFTa) mit Vorbehalt, dass die Filterkonditionierung als Bestandteil des Produktionsprozesses beim Hersteller durchgeführt sein wird.

13. Dokumentation

Die Originaldaten sind bei der Abgasprüfstelle der Ingenieurschule Biel sowohl auf Papier als auch auf Diskette archiviert und stellen vertrauliches Material dar.

14. Literatur

- [1] VERT Verminderung der Emissionen von Real-Dieselmotoren im Tunnelbau
Ein Verbundprojekt von Suva, AUVA, TBG und BUWAL, Abschlussbericht
TTM, A. Mayer, 29.2.2000
- [2] VERT CDs 1-4
CD 1: Labor Test
CD 2: Tagebücher Feldtest
CD 3: Messungen Feldtest
CD 4: Abschlussbericht
- [3] Filter list
Verified particulate trap systems for Diesel engines
suvaPro, 1. August 1999
- [4] Influence of particulate trap systems on the composition of Diesel engine exhaust gas emissions
N.V. Heeb, EMPA-Bericht 167985
- [5] Filter-Obligatorium
Information zur Einführung des Partikelfilter-Obligatoriums
suvaPro Luzern, 24.1.2000
- [6] Schweizerische Luftreinhalte-Verordnung (LRV)
Stand 3. Februar 1998, SR 814.318.142.1
- [7] Verordnung zur Nachrüstung von Fahrzeugen mit Partikelfiltern
Eidg. Justiz- und Polizeidepartement, 7. August 1990, V. 7.621.3/V. 7.683.4/V. 7.703
- [8] Grenzwerte am Arbeitsplatz 1994
Suva Luzern, 1903.d - Ausgabe 1994
- [9] Bundesgesetz über die Sicherheit von technischen Einrichtungen und Geräten (STEG)
18. Juni 1993
- [10] Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung, StoV)
9. Juni 1986/1. Januar 1994
- [11] Ammann Diesel-Partikel-Filter ARF 10 Typ K und Typ B
VFT-Eignungstest Phase
Ingenieurschule Biel, Abgasprüfstelle
J. Czerwinski, S. Napoli, Mai 2000

- [12] Analysis of the Particulate Emissions on Liebherr - engine with the fuel additives
DPX9 & CDL PP 3100-C / Report 15
Ingenieurschule Biel, Abgasprüfstelle
J. Czerwinski, T. Mosimann, February 1998
- [13] Emissionsmessungen an mit CRT ausgerüsteten Stadtbussen auf dem Rollenprüfstand
der LARAG AG in Wil, März 2000
EMPA-Bericht, 411'289
- [14] Partikelfilter für schwere Nutzfahrzeuge, Technische Grundlagen zur Nachrüstung grosser Fahr-
zeugflotten, Oktober 2000
- [15] Untersuchungen am Caterpillar-Motor mit Verbesserungsmassnahmen und Trenngradanalyse
VERT-Bericht 5
Ingenieurschule Biel, Abgasprüfstelle
J. Czerwinski, D. Gehrig, Juni 1995
- [16] Gestrickte Strukturen aus Endlosfasern für die Abgasreinigung
A. Mayer et al., MTZ 56 (1995) 2
- [17] Particulate Traps for Retro-Fitting Construction Site Engines VERT:
Final Measurements and Implementation
A. Mayer et al.,
SAE 1999-01-0116
- [18] Nachmessung der Partikelfilter aus dem Baumaschinenfeldtest mit eingehender Analyse der Parti-
kelemissionen.
VERT-Bericht 16
Ingenieurschule Biel, Abgasprüfstelle Nidau
J. Czerwinski, Th. Mosimann, Mai 1998
- [19] Scanning Electrical Mobility Spectrometer
S.C. Wang, and R.C. Flagan
Aerosol Science and Technology 13 (1990) p. 230-240
- [20] Unipolar and Bipolar Diffusion Charging of Ultrafine Aerosol Particles
M. Adachi, Y. Kousaka, and K. Okuyama
J. Aerosol Sci. 16 (1985) p. 109-123
- [21] Evaluation of the Surface Properties of Nanoparticles
A. Keller, M. Fierz, K. Siegmann, and A. Filippov
J. Aerosol Sci. (2000) in print
- [22] Monitoring PAH-Emissions from Combustion Processes by Photoelectric Charging
H. Burtscher, and H.C. Siegmann
Combust. Sci. and Tech. 101, (1994) p. 327-332
- [23] Dynamic Field Measurement of Submicron Particles from Diesel Engines
U. Matter, H.C. Siegmann, and H. Burtscher
Environ. Sci. Techn. 33 (1999) p. 1946-1952
- [24] An Accurate, Continuously Adjustable Dilution System (1:10 to 1:104) for Submicron Aerosols
Ch. Hueglin, L. Scherrer, and H. Burtscher
J. Aerosol Sci. 28/6 (1997) p. 1049-1055
- [25] Czerwinski, J.; Napoli, S.: Kalte und beheizte NOx-Messung am Liebherr 914T Baumaschinenmotor
mit verschiedenen Partikelfiltern. Abgasprüfstelle FH Biel (AFHB), B085, November 2000.
- [26] Czerwinski, J.; Napoli, S.: Überprüfung des verstärkten EHC-Aufsteckfilters HT am Dieselmotor-
prüfstand. Abgasprüfstelle der FH Biel, CH, B077, Juli 2000.

15. Beilagenliste

Fig. 19 Vergleich der Emissionswerte bei Pkt. 6 (1400 rpm / 297 Nm)

Fig. 20 Abgastrübung bei Freibeschleunigung

Fig. 21 Grössenverteilungen 1400 Upm / 297 Nm

Fig. 22 Integrierte Partikelzahlen im Grössenspektrum 20 – 300 nm

Fig. 23 NanoMet-Ergebnisse bei Stationärmesspunkten

16. Anhang

- A 1 Berechnungen
- A 2 Messgrössen und Berechnungsgrössen
- A 3 Skizze des EHC HT Wechsel-Partikelfilters
- A 4 Aufbau des EHC HT Aufsteckfilters am Motorprüfstand
- A 5 Tabellen Mess- und Berechnungsgrössen ohne Filter, LSD (25 ppm)
- A 6 Tabellen Mess- und Berechnungsgrössen mit Filter regeneriert, LSD (25 ppm)

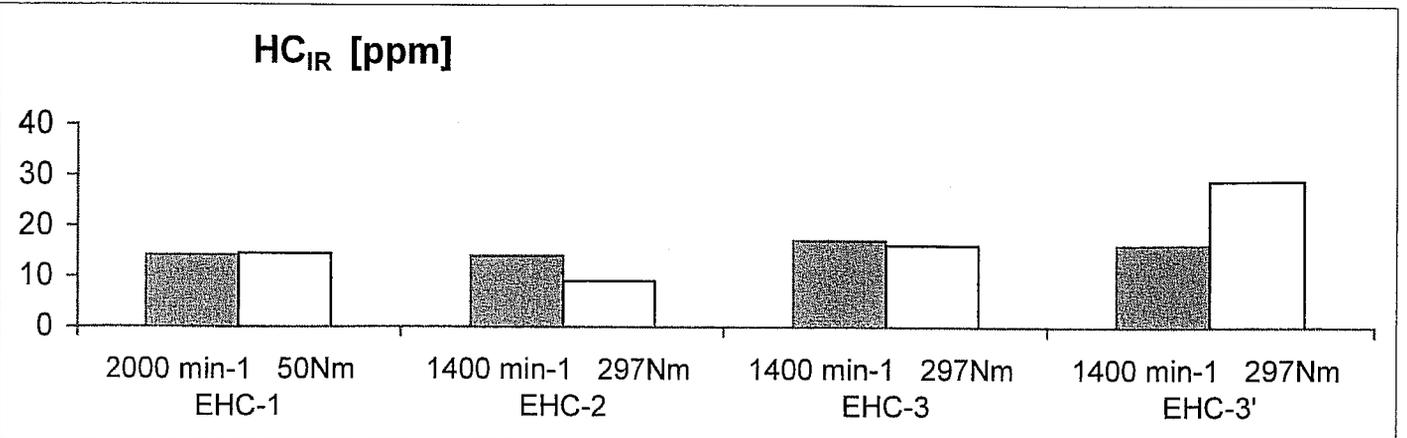
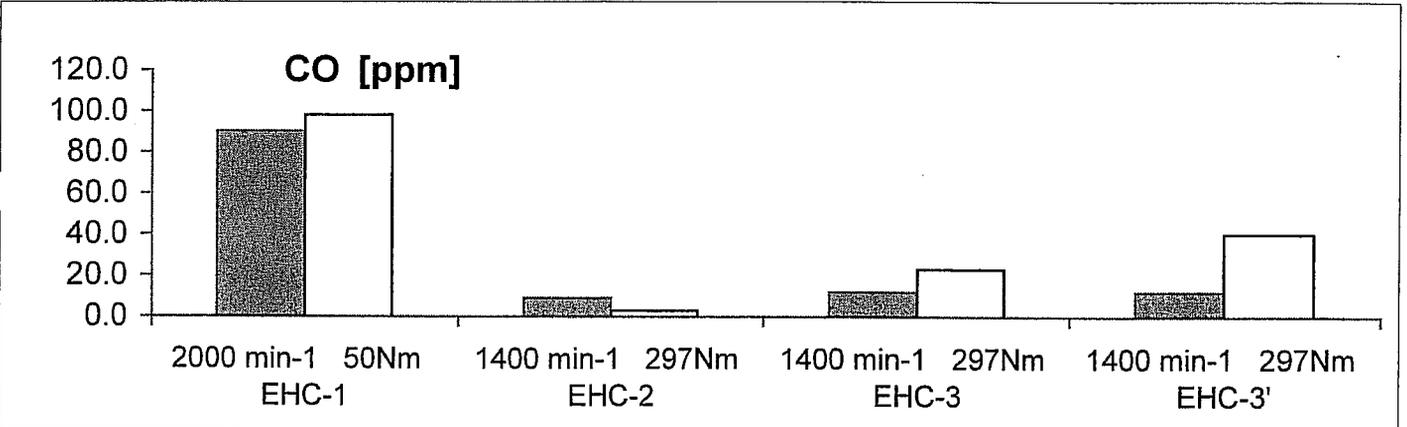
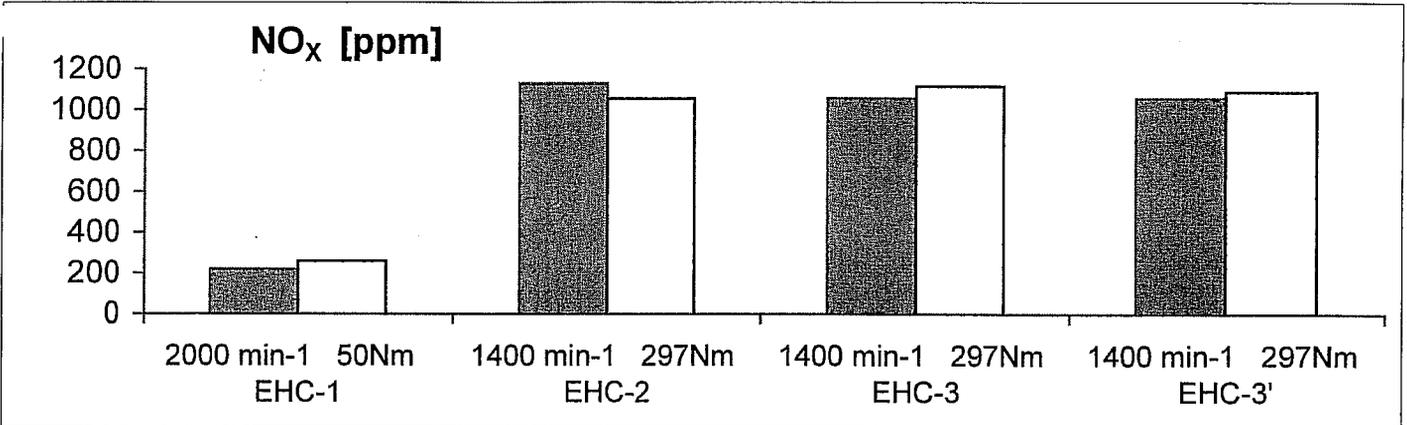
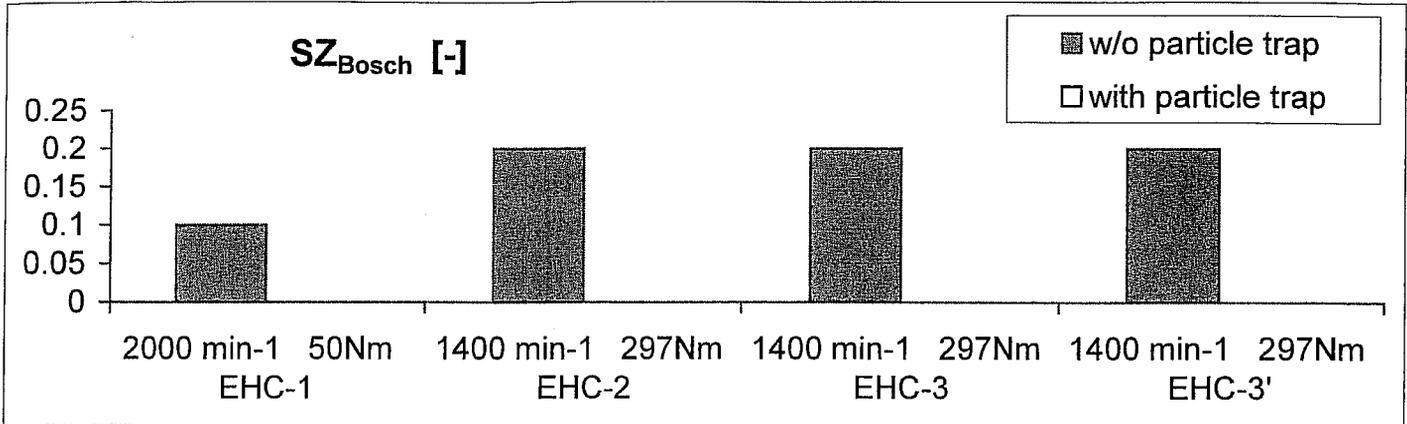
Voruntersuchungen

- A 7 1. Voruntersuchung vom Februar 2003
- A 8 2. Voruntersuchung vom März 2003
- A 9 3. Voruntersuchung vom Juni 2003

- A 10 Information des Herstellers über Konditionierung des DPFs

Figures

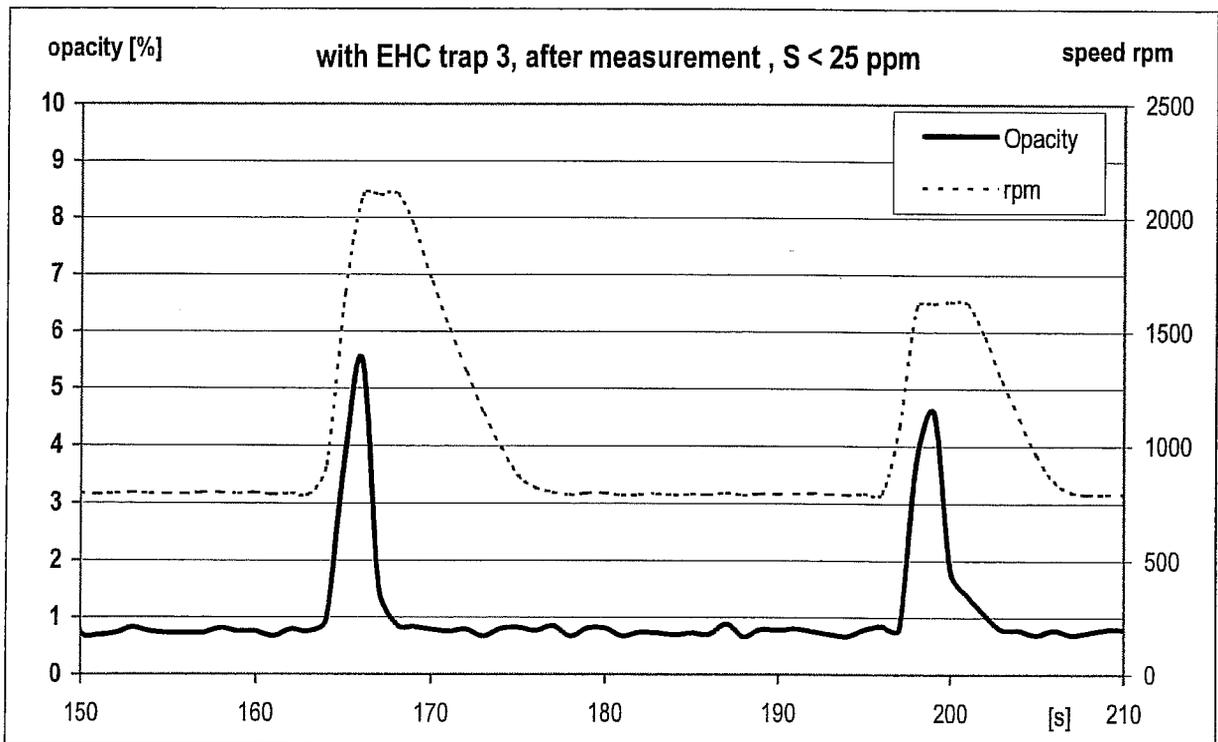
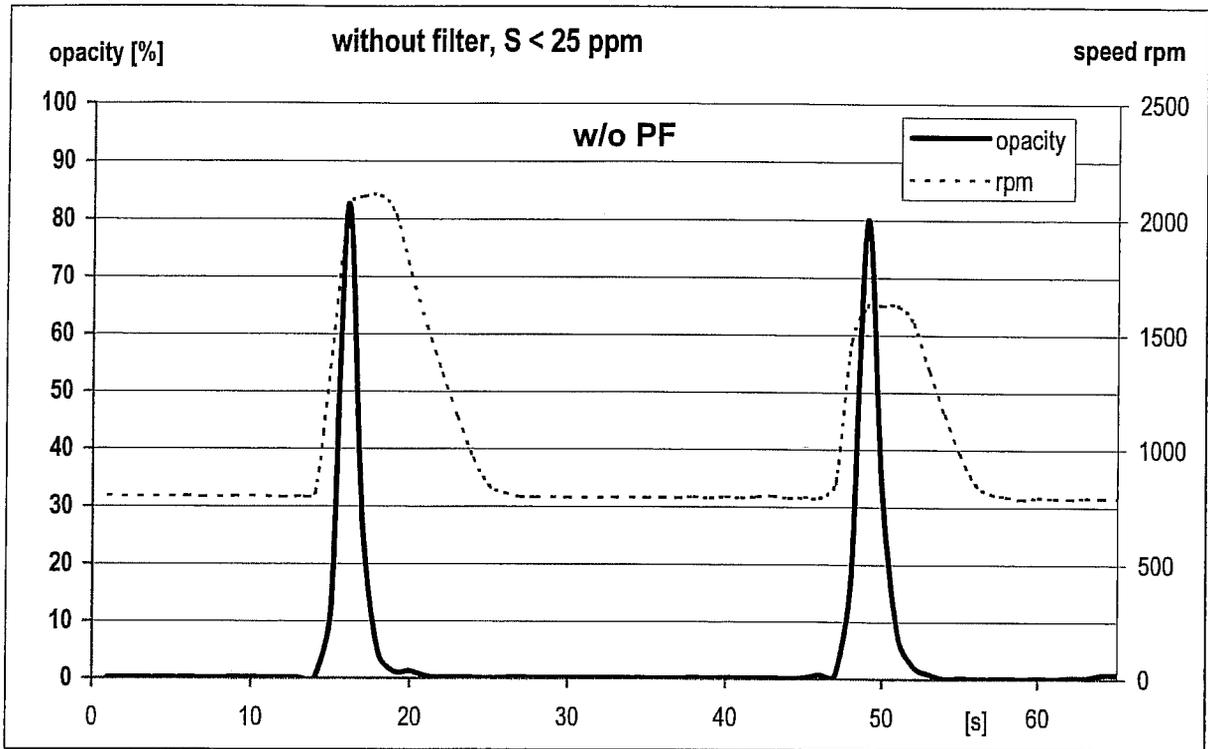
comparison of emissions
with/without EHC HT particle trap (conditioned)
from all measuring series (Diesel fuel S < 25 ppm)



Opacity at free acceleration

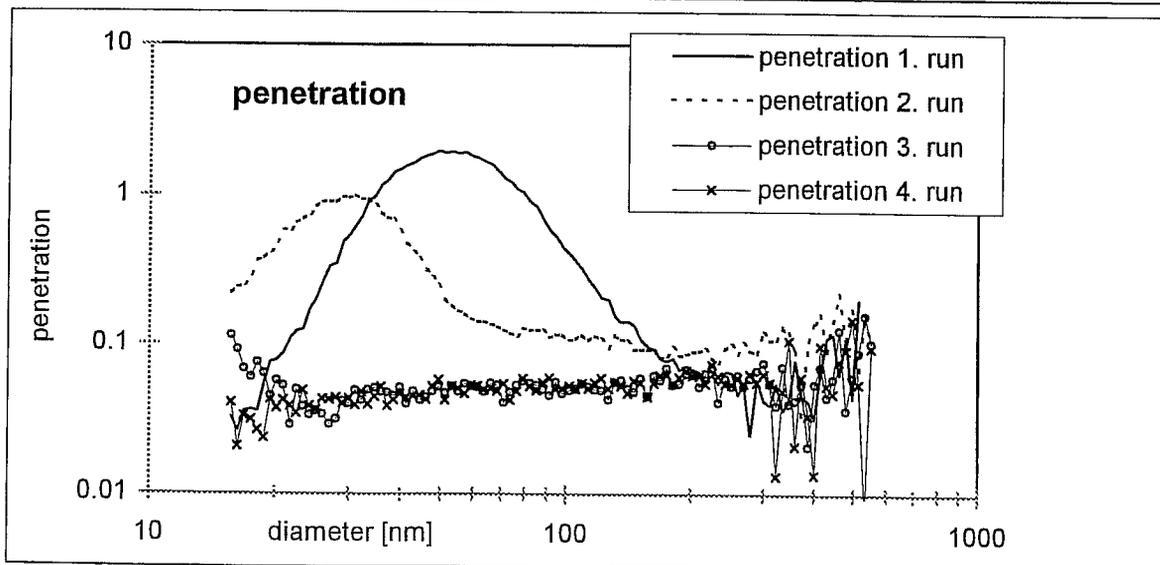
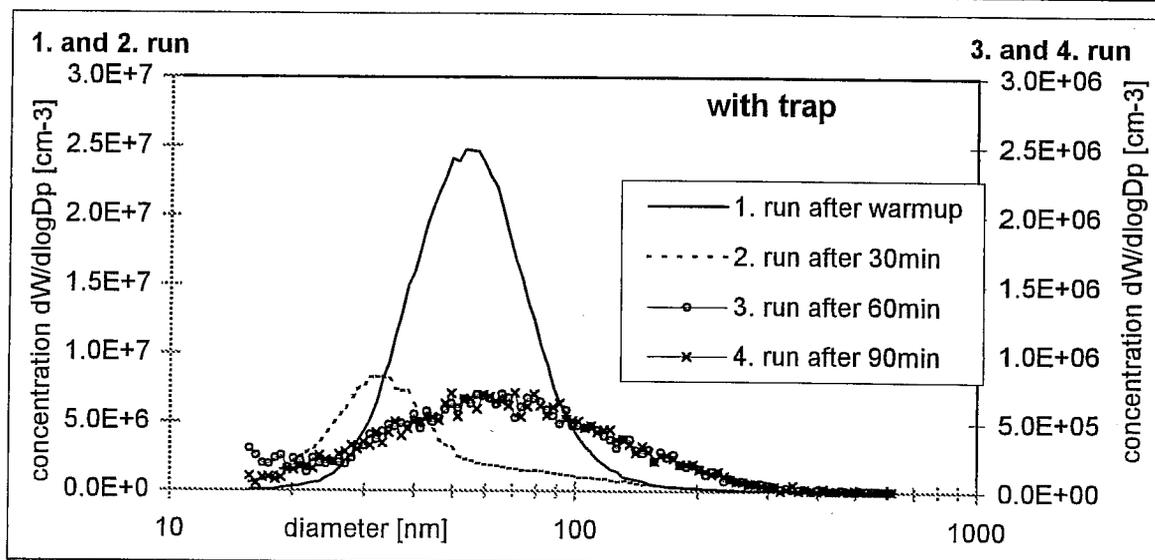
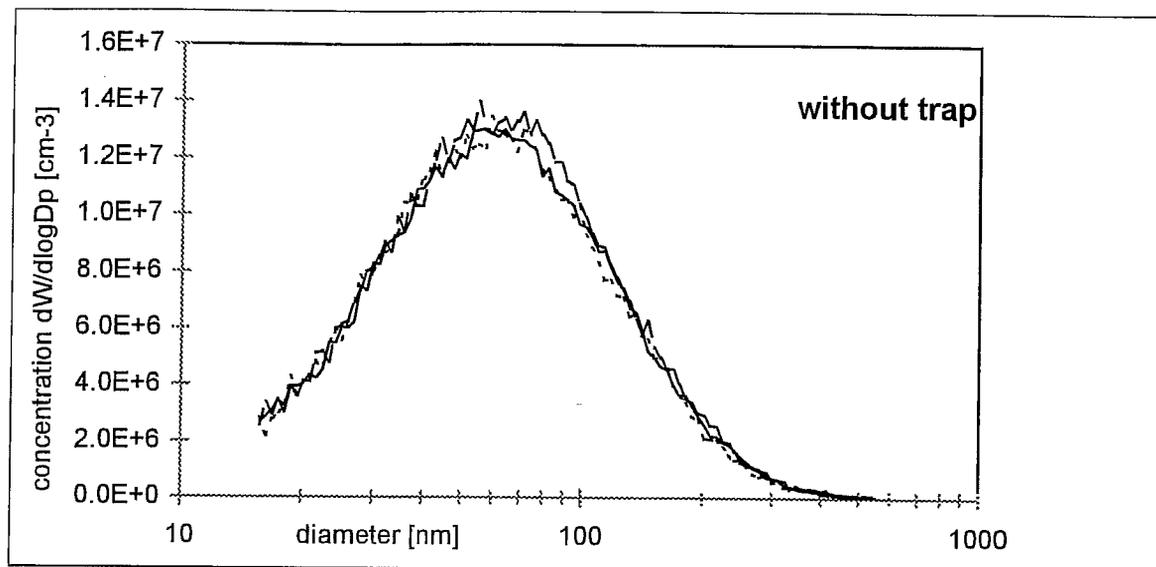
with/without particle trap EHC-3

engine: Liebherr D914T



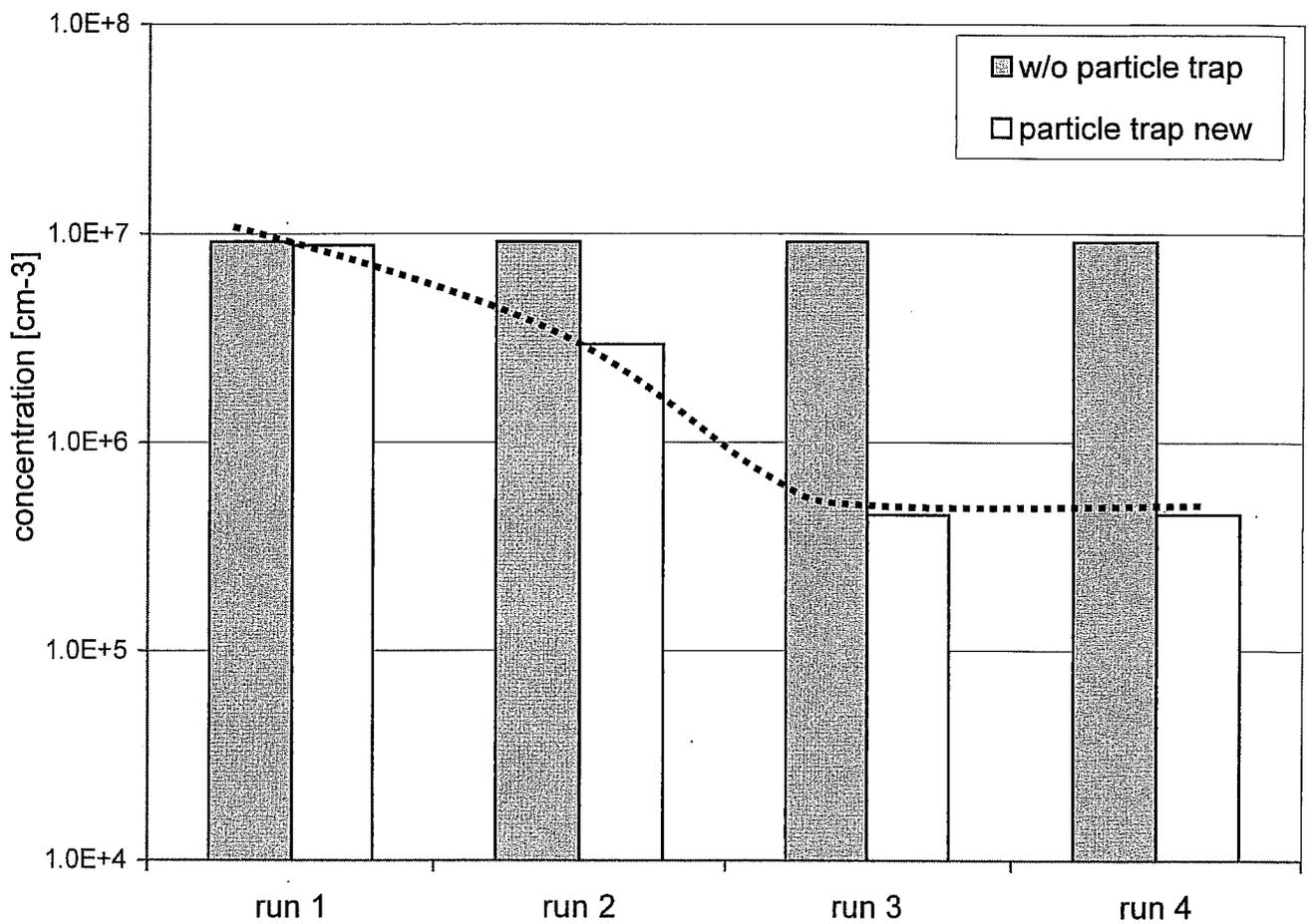
SMPS-size spectra, EHC-trap 3'
Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹ / 297Nm
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 6



Integrated numbers of particles in the size spectrum 20-300 nm with/without EHC-3' particle trap, Diesel fuel (S<25ppm)

1/cm ³	run 1	run 2	run 3	run 4
w/o particle trap	9.15E+06	9.15E+06	9.15E+06	9.15E+06
particle trap new	8.80E+06	2.96E+06	4.49E+05	4.53E+05

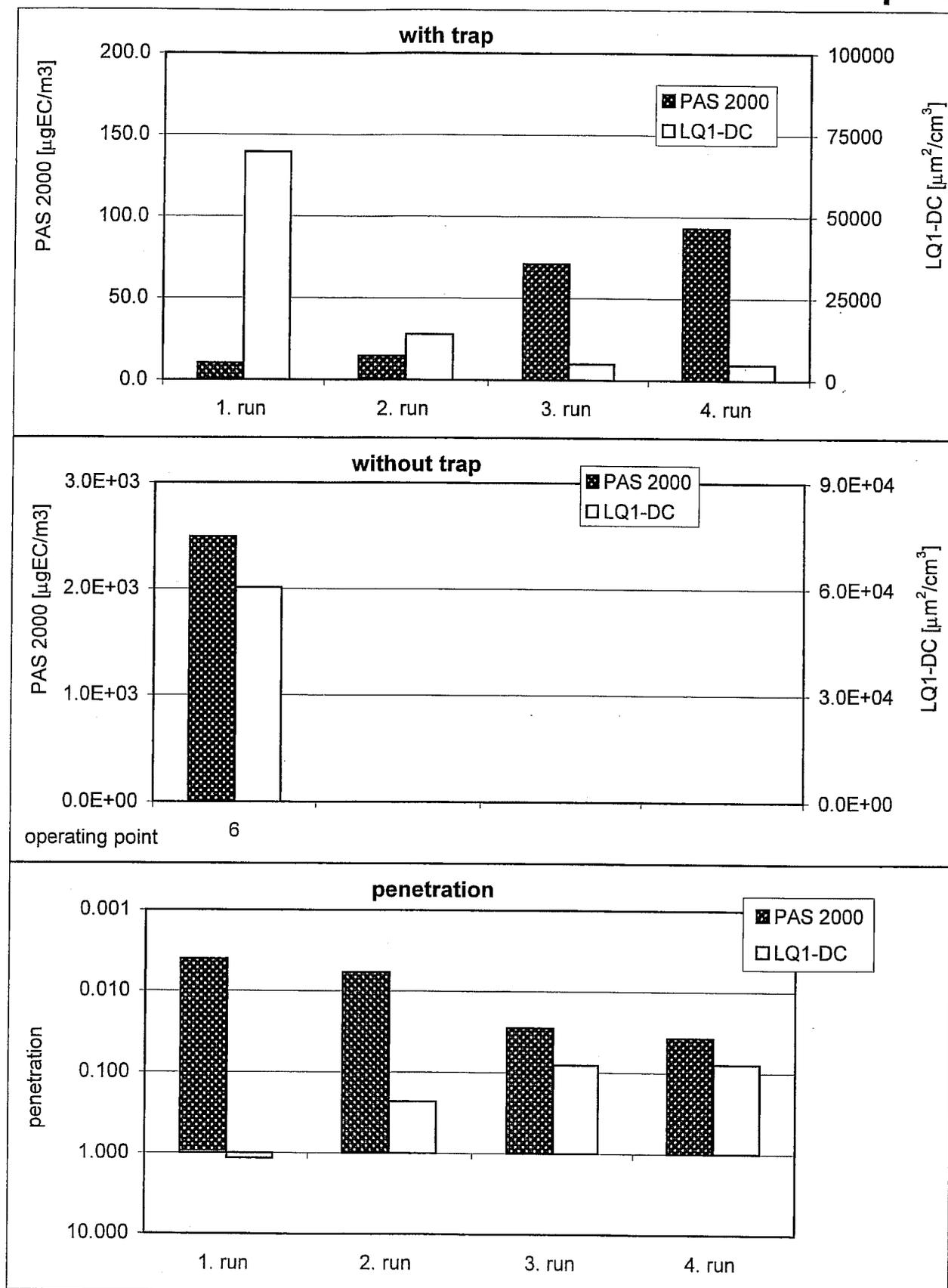


PZAG [%]	3,81	67.71	95.10	95.05
-----------------	-------------	--------------	--------------	--------------

EHC particle trap 3' at 1400min⁻¹ / 297Nm

NanoMet sensors with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 6



Annexes

calculation

$$Pe = \frac{n \cdot M \cdot \pi}{30000}$$

$$pme = \frac{4 \cdot \pi \cdot M \cdot 10^{-5}}{V_H}$$

$$PM_{Motor} = \frac{PM_{Filter} \cdot 3.6 \cdot L}{t_{ss}}$$

$$L = \frac{G_{Exh}}{3.6 \cdot G_{Probe}}$$

$$PM_{Motor} = \frac{PM_1 + PM_2}{2}$$

$$PM = \frac{PM_{Motor}}{Pe}$$

$$CO = \frac{0.000966 \cdot CO \cdot k \cdot G_{Exh}}{Pe} \quad [g/kWh], [g/h]$$

$$HC = \frac{0.000478 \cdot HC3_{fid} \cdot 3 \cdot G_{Exh}}{Pe} \quad [g/kWh], [g/h]$$

$$NO_x = \frac{0.001587 \cdot NO_x \cdot f \cdot G_{Exh}}{Pe} \quad [g/kWh], [g/h]$$

$$k = 1 - \frac{1.85 \cdot G_{Fuel}}{G_{Air}}$$

$$f = \frac{1}{1 + A \cdot (7 \cdot m - 75) + B \cdot 1.8 \cdot (T - 302)}$$

$$A = 0.044 \cdot \frac{G_{Fuel}}{G_{Air}} - 0.0038$$

$$B = -0.116 \cdot \frac{G_{Fuel}}{G_{Air}} + 0.0053$$

$$m = \frac{6.211 \cdot R_{Raum} \cdot pd}{p_0 \cdot 0.1 - R_{Raum} \cdot pd \cdot 0.01}$$

pd = 2.7366 kPa partial pressure of the water vap or (average value)

$$T = t_0 + 273.15$$

$$G_{Exh} = G_{Air} + G_{Fuel}$$

$$G_{Probe} = G_{Sample} - G_{Dilution}$$

$$G_{Sample} = 2.0 \text{ (rated value smart sampler)}$$

$$G_{Probe} = 1.6 \text{ (rated value smart sampler)}$$

only for PM measuring filter !

$$be = \frac{G_{Fuel}}{Pe \cdot 1000}$$

$$\beta = \frac{V_{Fuel} \cdot 1000 \cdot 60}{3.6 \cdot n \cdot 6}$$

$$\lambda = \frac{G_{Air}}{G_{Fuel} \cdot 14.34}$$

$$G_{Fuel} = V_{Fuel} \cdot \rho$$

ρ : interpolated versus temperature

$$DF = \frac{CO_2H - CO_2 \text{ amb}}{CO_2L - CO_2 \text{ amb}}$$

$$DF = \frac{DF_1 + DF_2}{2}$$

for the particulate trap:

$$PMAG = \frac{PM_{Ref.} - PM}{PM_{Ref.}} \cdot 100\% \quad \dots \text{particulate mass filtration efficiency}$$

$$PZAG = \frac{PZ_{Ref.} - PZ_{(i)}}{PZ_{Ref.}} \cdot 100\% \quad \dots \text{particulate number filtration efficiency}$$

PZ ...integrated particles numbers in the size range 20 - 200 nm

Measured values (see scheme figure 5)

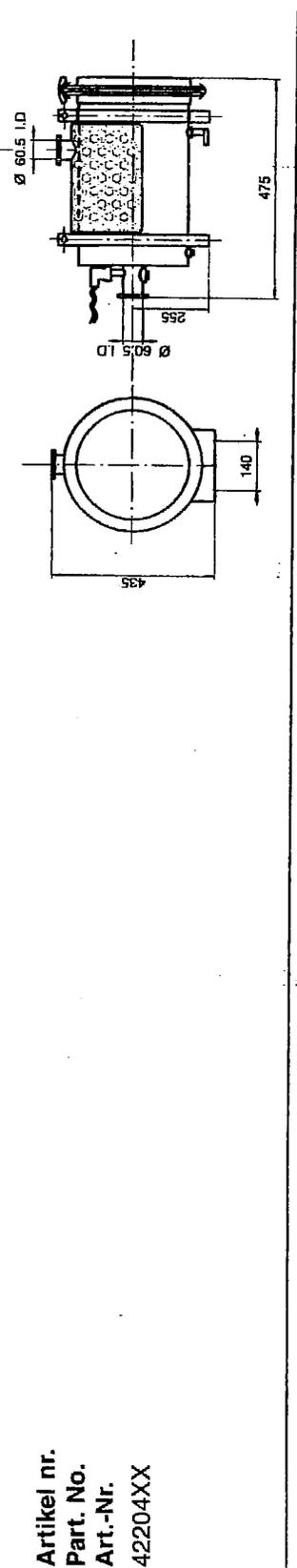
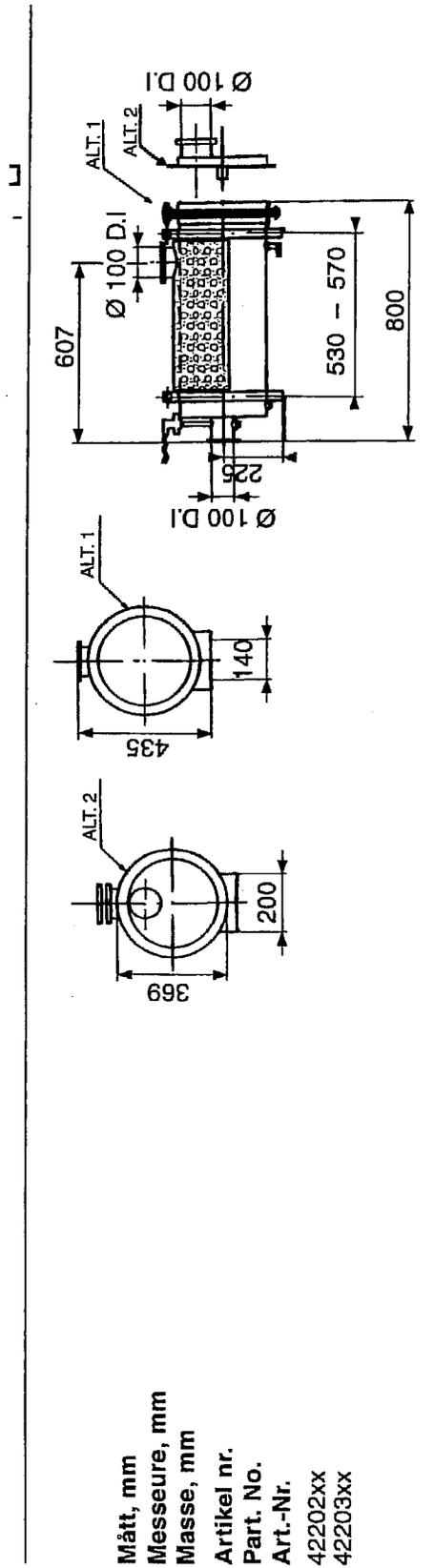
n	1/min	engine speed
M	Nm	torque
G _{Air}	kg/h	air mass flow
V _{Fuel}	l/h	fuel flow
t _{SS}	s	time of particulates sampling
PM _{Filter}	mg	particle mass on the filter
t _{H2O}	°C	cooling water temperature
t _{Oil}	°C	oil temperature
t _{Fuel}	°C	fuel temperature
t ₁	°C	ambient temperature
t ₂	°C	temperature before compressor
t ₃	°C	temperature after compressor
t ₄	°C	temperature after blower & after intercooler
t ₅	°C	temperature before turbine
t ₆	°C	temperature before particle trap
t ₇	°C	temperature after particle trap
t ₈	°C	temperature before gas sampling
Δp ₂	mbar	rel. pressure before compressor
Δp ₃	mbar	rel. pressure after compressor
Δp ₄	mbar	rel. pressure after blower and after intercooler
Δp ₅	mbar	rel. pressure before turbine
Δp ₆	mbar	rel. pressure before particle trap
Δp ₇	mbar	rel. pressure after particle trap
Δp ₈	mbar	rel. pressure before gas sampling
CO	ppm	} volumetric concentration of the emissions
HC _{3FID}	ppm	
HC _{6IR}	ppm	
NO	ppm	
NO ₂	ppm	
NO _X	ppm	
CO ₂ H	%	
CO ₂ L	%	L: diluted sample
O ₂	%	
SZ _{Bosch}	-	Bosch smoke number, Bosch smoke unit (see BSU)
p ₀	mbar	atmospheric pressure in the testing room
R _{Raum}	%	rel. humidity in the testing room

calculated values

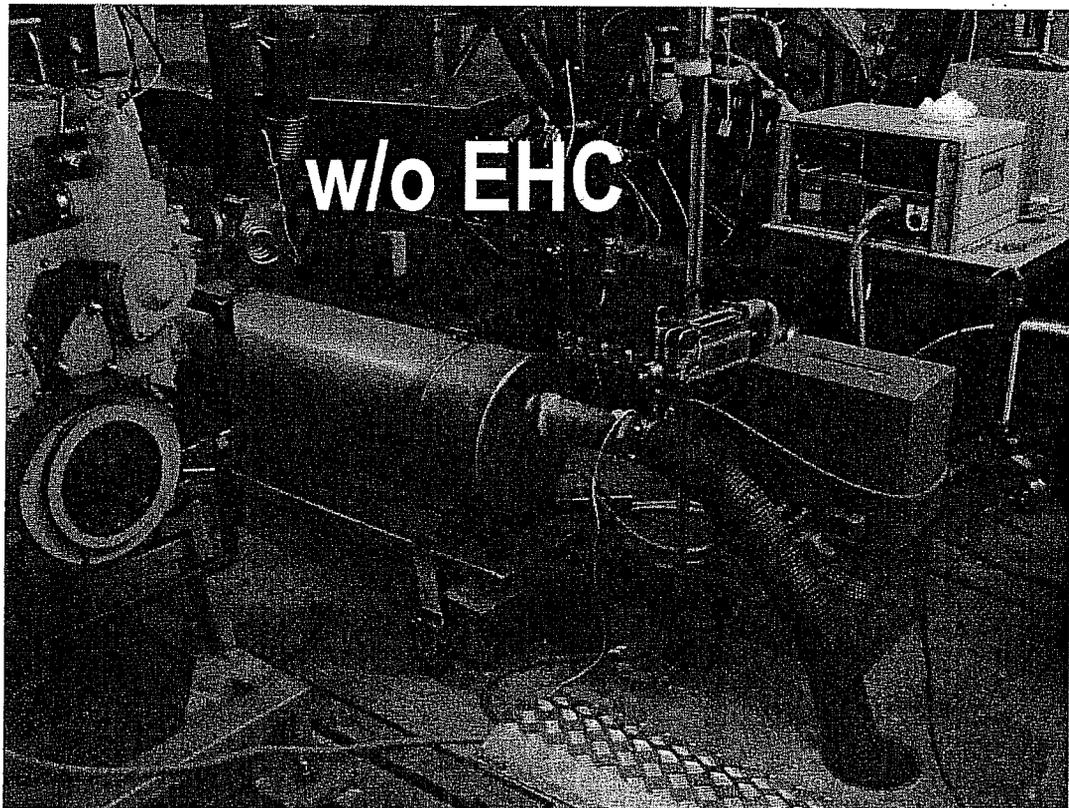
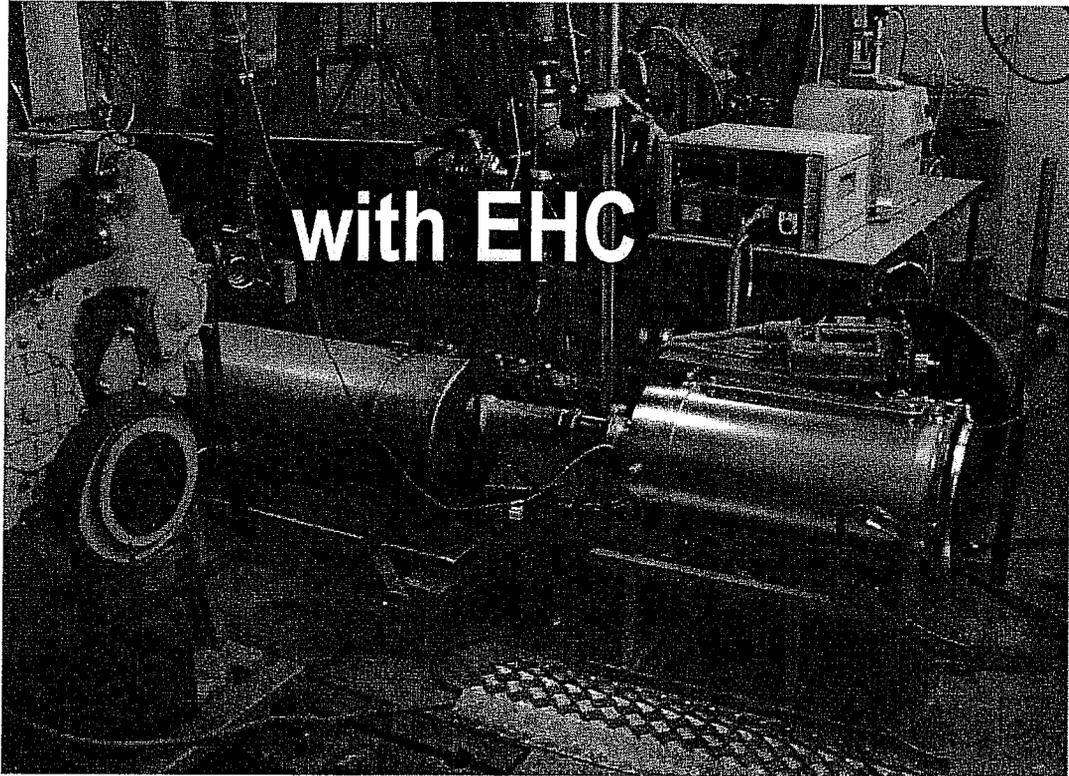
Pe	kW	power
pme	bar	mean effective pressure
G _{Fuel}	kg/h	fuel mass flow
be	g/kWh	specific fuel consumption
β	mm ³ /Hub	injection quantity (per stroke)
λ	-	global equivalence ratio
G _{Exh}	kg/h	exhaust mass flow
PM _{Motor}	g/h	particle mass emission
PM	g/kWh	} specific emissions
CO	g/kWh	
HC	g/kWh	
NO _x	g/kWh	
DF	-	dilution factor (dilution tunnel)

abbreviations

BSU	Bosch Smoke Unit
CPC	condensation particle counter
DC	diffusion charging sensor
DD	Detroit Diesel
DMA	differential mobility analyser
DPF	Diesel Particle Filter
DPH	diaphragm
EC	elemental carbon
ECAG	elemental carbon filtration efficiency
FBC	fuel borne catalyst
INSOF	insoluble fraction
MD19	heated minidiluter
NanoMet	nanoparticle summary surface analyser (PAS + DC + MD19)
NP	nanoparticulates
OC	organic carbon
PAK, PAH	polycyclic aromatic hydrocarbons
PAS	photoelectrical aerosol sensor
PM	particulate matter, particle mass
PMAG	particulate mass filtration efficiency
PN	particle number
PZ	particle number
PZAG	particulate counts filtration efficiency (20 – 200 nm)
SOF	soluble organic fraction
SMPS	scanning mobility particles sizer (DMA + CPC)
TC	turbocharger



EHC particle trap at test bench engine Liebherr D914T



VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	w/o (EHC-3')
date:	24.06.2003	measurement:	4 th
equipment:	std-Oel(15W40) , LSD fuel (S<25ppm)		

R _{Raum} [%]:	42.7
P _{atm} [mbar]:	972
T _{Raum} [°C]:	26

Pkt.	n [1/min]	M [Nm]	G _{Air} [kg/h]	V _{Fuel} [l/h]	SZ [-]	CO [ppm]	HC _{6IR} [ppm]	NO [ppm]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	CO _{2High} [%]	t _{-H2O} [°C]	t _{oil} [°C]	t _{Fuel} [°C]
6	1400	297	335	11.70	0.2	12	16.1	1036	1056	12.59	8.05	81	89	18

Pkt.	t0 [°C]	t1 [°C]	t2 [°C]	t3 [°C]	t4 [°C]	t5 [°C]	t6 [°C]	t7 [°C]	Δp1 [mbar]	Δp2 [mbar]	Δp3 [mbar]	Δp4 [mbar]	Δp5 [mbar]	Δp6 [mbar]
6	24	25	57	381	336	313	288	270	-3.7	360	280	0	0	0

Pkt.	Pe [kW]	pme [bar]	G _{Fuel} [kg/h]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	G _{Exh} [kg/h]	be [g/kWh]	β [mm³/H]	λ	CO [g/h]	NO _x [g/h]
6	43.5	6.11	9.96	0.09	12.78	345.0	228.7	69.6	2.35	3.8	556

VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	EHC-3'
date:	31.07.2003	measurement:	4 th
equipment:	std-Oel(15W40), LSD fuel (S<25ppm)		
		CO ₂ Air Amb:	0.040%

R _{Raum} [%]:	57
P _{atm} [mbar]:	972
T _{Raum} [°C]:	23

Pkt.	time [min]	n [1/min]	M [Nm]	G _{Air} [kg/h]	V _{Fuel} [l/h]	SZ [-]	CO [ppm]	HC6 _{IR} [ppm]	NO [ppm]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	CO ₂ ^{high} [%]
6	0	1400	297	340	11.5	0	47	26.7	1073	1088	12.54	6.45
6	90	1400	297	334	11.4	0	40	28.7	1073	1088	12.54	6.45

we stop continuous measurements after 90min because of the good stabilisation of SMPS

t _{H2O} [°C]	t _{Oil} [°C]	t _{Fuel} [°C]
72	91	27
72	91	27

Pkt.	t0 [°C]	t1 [°C]	t2 [°C]	t3 [°C]	t4 [°C]	t5 [°C]	t6 [°C]	t7 _{vor PF} [°C]	t8 _{nach PF} [°C]
6	20	21	45	372	317	300	270	245	240
6	20	21	56	383	333	316	289	272	250

T_{vor PF max} < 300°C

Δp1 [mbar]	Δp2 [mbar]	Δp3 [mbar]	Δp4 [mbar]	Δp5 [mbar]	Δp6 _{vor PF} [mbar]
-1	350	290	0	0	12
-1	350	290	0	0	21
					increase of back-pressure level

Pkt.	Pe [kW]	pme [bar]	G _{Fuel} [kg/h]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	G _{Exh} [kg/h]	be [g/kWh]	β [mm ³ /H]	λ [-]	CO [g/h]	NO _x [g/h]
6	43.5	6.11	9.81	0.35	14.17	349.8	225.4	68.6	2.42	15.0	617
6	43.5	6.11	9.69	0.29	13.91	343.7	222.4	67.7	2.40	12.6	606

1. Voruntersuchung, Februar 2003

Es wurde mit Betriebspunkt 9 (2000 min⁻¹/50 Nm) begonnen, A 7-2. Die Temperatur am Eingang in den Filter war ca. 175 °C und wie man sieht, entstehen nach Filter mit der Zeit zunehmend Feinpartikel bei ca. 20 nm.

Diese Feinpartikelbildung verstärkte sich dann noch dramatisch, als man das Drehmoment und damit die Abgas-Temperatur erhöhte. Der DC Sensor war in kurzer Zeit im Overrange.

Anschliessend wurde es mit einem tieferen Betriebspunkt versucht, (1400 min⁻¹/50 Nm) die Temperatur am Eingang war ca. 145 °C, A 7-3. Leider stellte sich erst anschliessend bei der Referenzmessung heraus, dass die aufgetretenen Feinpartikel bereits im Rohgas vorkommen. Das ist ein Effekt, den wir schon öfters bei sehr tiefen Lastpunkten feststellten. Wenn man die Feinpartikel unter 40 nm nicht berücksichtigt, erreicht der Filter aber da auch nur einen Wirkungsgrad von Rund 80 %.

Es handelt sich bei dem Testobjekt um einen Partikelgenerator, welcher ab 150 - 170 °C Unmengen von Feinpartikeln ausscheidet.

Nach Kontakt mit EHC stellte man fest, dass die Lösungsmittel aus dem Silikongummi nicht in Frage kommen, da sie tiefere Siedetemperaturen haben.

Wahrscheinlicher ist es, dass es die Schlichte von der Glasfaser ist, ein bei Raumtemperatur festes Material. Alle Glasfasern werden ja beim Ziehen mit einer Schlichte ummantelt, sonst würden sie brechen. Dabei handelt es sich auch um organische Substanzen (Stärke, Wachse, Öle), die aber bis zu recht hohen Temperaturen stabil sind. Gewöhnlich dampft diese Schlichte, die wir auch von andren Faserfiltern kennen in der ersten Stunde ab – je nach Temperatur schneller oder weiniger schnell. (3M gibt für NEXTEL an: 550 °C eine Stunde bei viel Sauerstoff)

Man glaubt (EHC, TTM), dass bei dem vorliegenden Filtereinsatz dieses Material nach ca. 1 Std.-Betrieb beseitigt werden sollte.

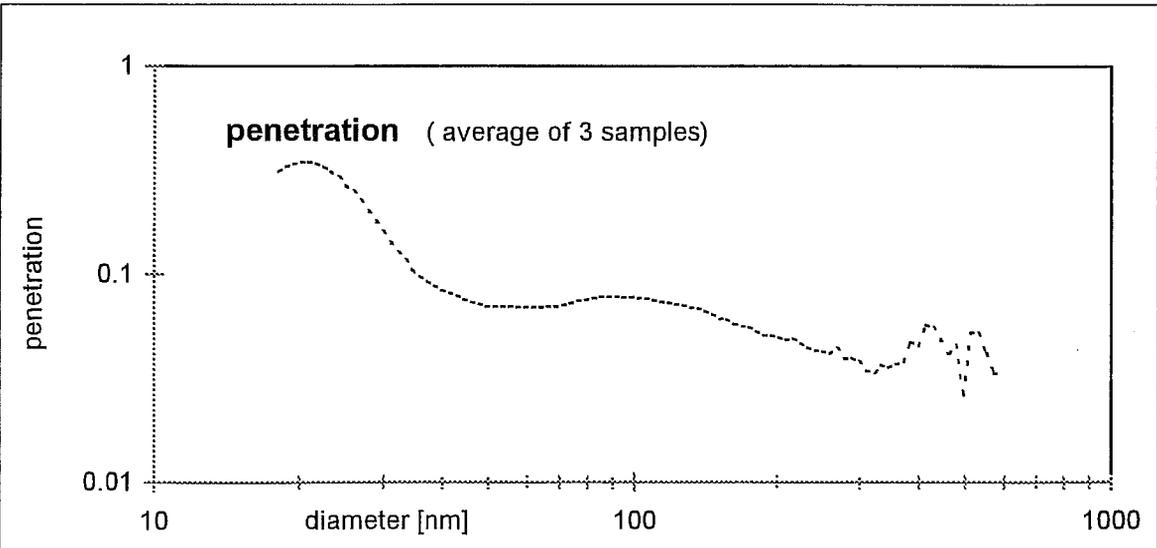
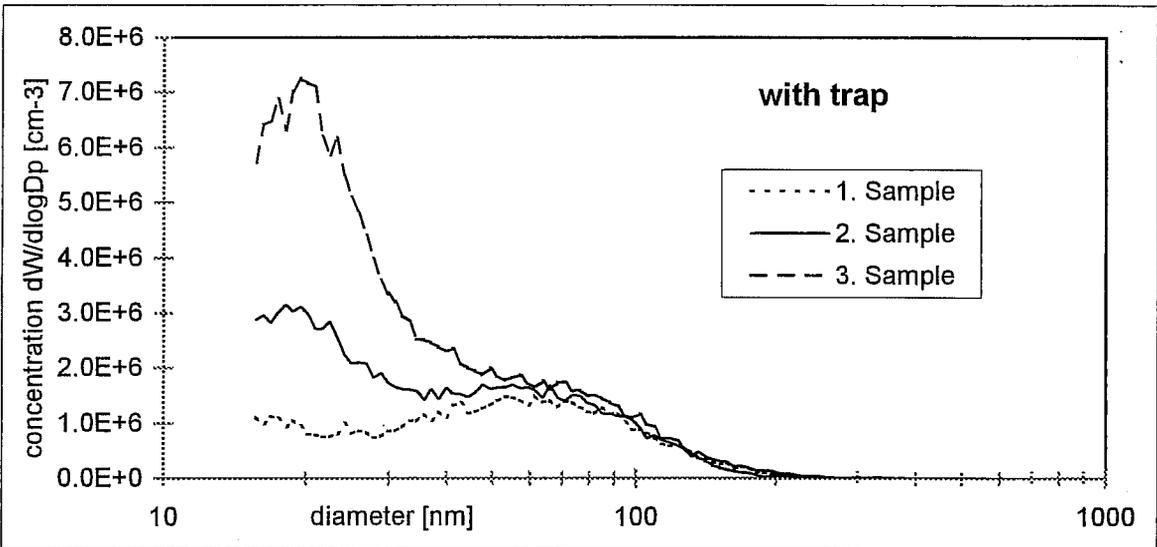
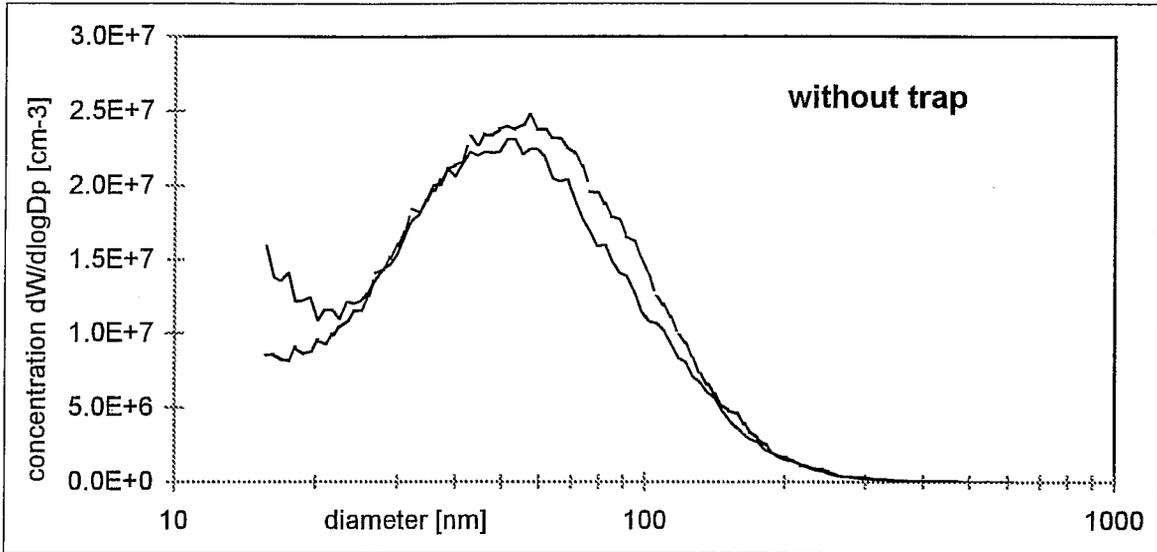
Der Test soll also nach dem vorherigen Ausheizen des Filters (90 min bei ca. 350 °C) wiederholt werden.

Die Tabellen der Mess- und Rechenwerte der 1. Voruntersuchung finden sich in A 7-4 und ein Beispiel des Rauchstosses bei Freibeschleunigung A 7-5, (Maximalwerte mit DPF neu bis ca. 2,5 %).

Die Filtrationsqualität dieses DPF's auch ohne Berücksichtigung der Spontankondensate im Nuclei-Mode erfüllte die VERT-Anforderungen nicht. Dies kann daran liegen, dass das Filtermaterial zu wenig Beladungszeit absolvierte.

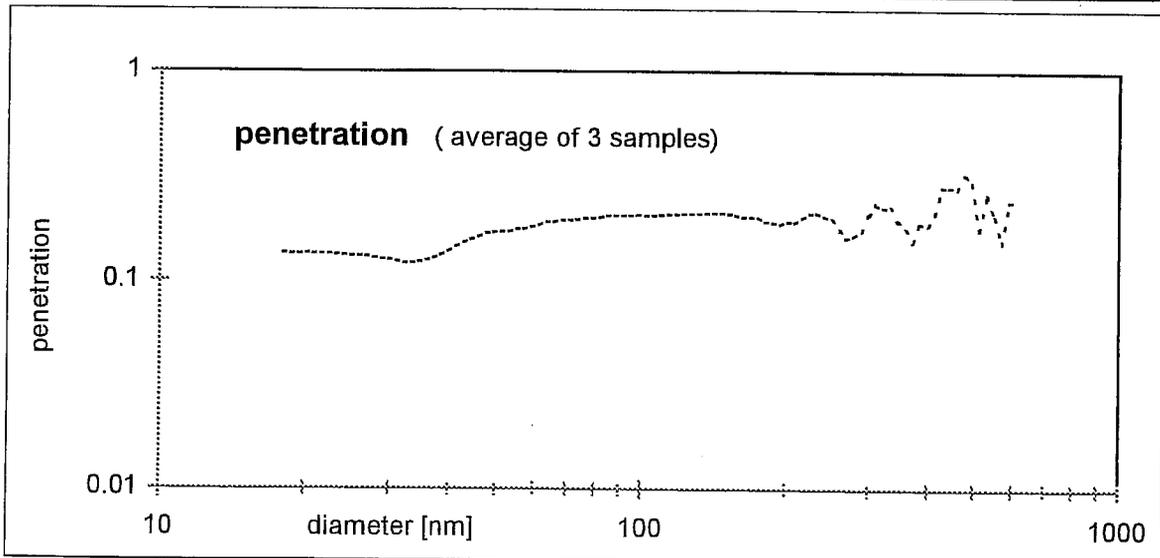
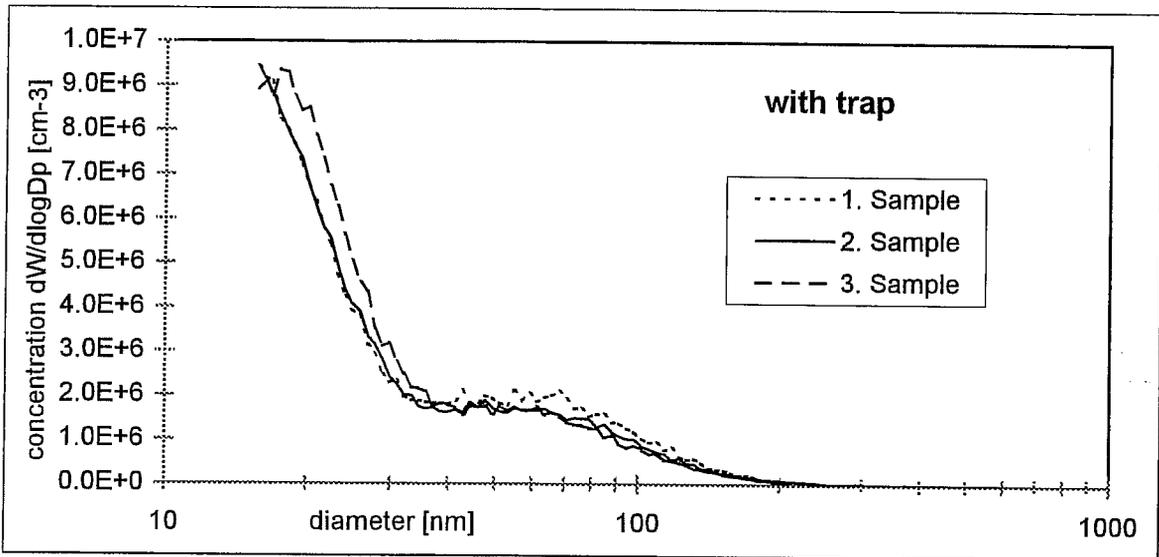
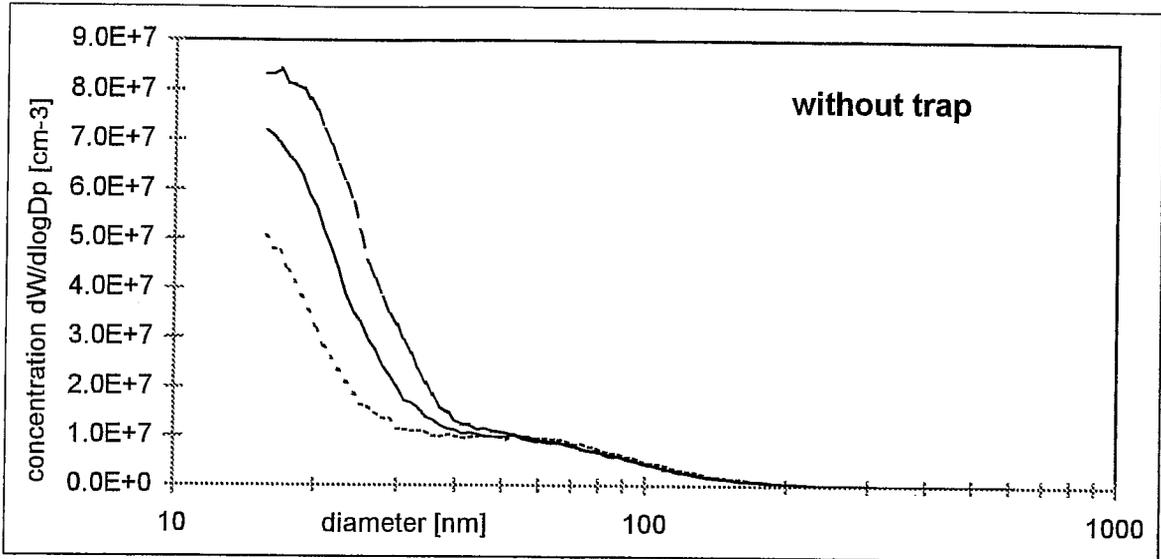
SMPS-size spectra, EHC-trap
Liebherr D914 T, 2000 min⁻¹ / 50Nm
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 9



SMPS-size spectra, EHC-trap
Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹/ 50Nm
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 10



VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	w/o
date:	17.02.2003	measurement:	1th
equipment:	std-Oel(15W40) , LSD fuel (S<25ppm)		

R _{Raum} [%]:	13
P _{atm} [mbar]:	979
T _{Raum} [°C]:	20

Pkt.	n	M	G _{Air}	V _{Fuel}	SZ	CO	HC _{6IR}	NO	NO _x	O ₂	CO _{2High}
	[1/min]	[Nm]	[kg/h]	[l/h]	[-]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[%]
2	2000	50	445	6.50	0.1	90	14.1	185	220	17.60	3.25
6	1400	50	288	3.65	0.0	102	14.6	231	281	18.00	2.83
5											
1											
2											

Pkt.	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t8	t _{H2O}	t _{Oil}	t _{Fuel}	Δp1	Δp2	Δp3	Δp4	Δp6
	[°C]	[°C]	[°C]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]								
2	21	20	47	203	202	191	177	-	81	88	22	-6.5	260	370	10	10
6	22	21	43	156	162	153	145	-	81	86	22	-2.7	100	150	0	0
5																
1																
2																

Pkt.	Pe	pme	G _{Fuel}	CO	NO _{x(not)}	G _{Exh}	be	β	λ	CO	NO _x
	[kW]	[bar]	[kg/h]	[g/kWh]	[g/kWh]	[kg/h]	[g/kWh]	[mm ³ /H]	[-]	[g/h]	[g/h]
2	10.5	1.03	5.53	3.65	13.20	450.5	528.3	27.1	5.61	38.3	138
6	7.3	1.03	3.11	3.83	15.44	291.1	423.8	21.7	6.47	28.1	113
5											
1											
2											

VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	EHC-1
date:	17.02.2003	measurement:	1th
equipment:	std-Oel(15W40), LSD fuel (S<25ppm)		
		CO ₂ Air :	0.045%

R _{Raum} [%]:	14
P _{atm} [mbar]:	980
T _{Raum} [°C]:	19

Pkt.	n [1/min]	M [Nm]	G _{Air} [kg/h]	V _{Fuel} [l/h]	SZ [-]	CO [ppm]	HC6 _{IR} [ppm]	NO [ppm]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	CO ₂ High [%]
2	2000	50	450	6.50	0	98	14.4	221	260	17.40	3.25
6	1400	50	284	3.70	0	160	14.5	237	281	17.90	2.88
5											
1											
2											

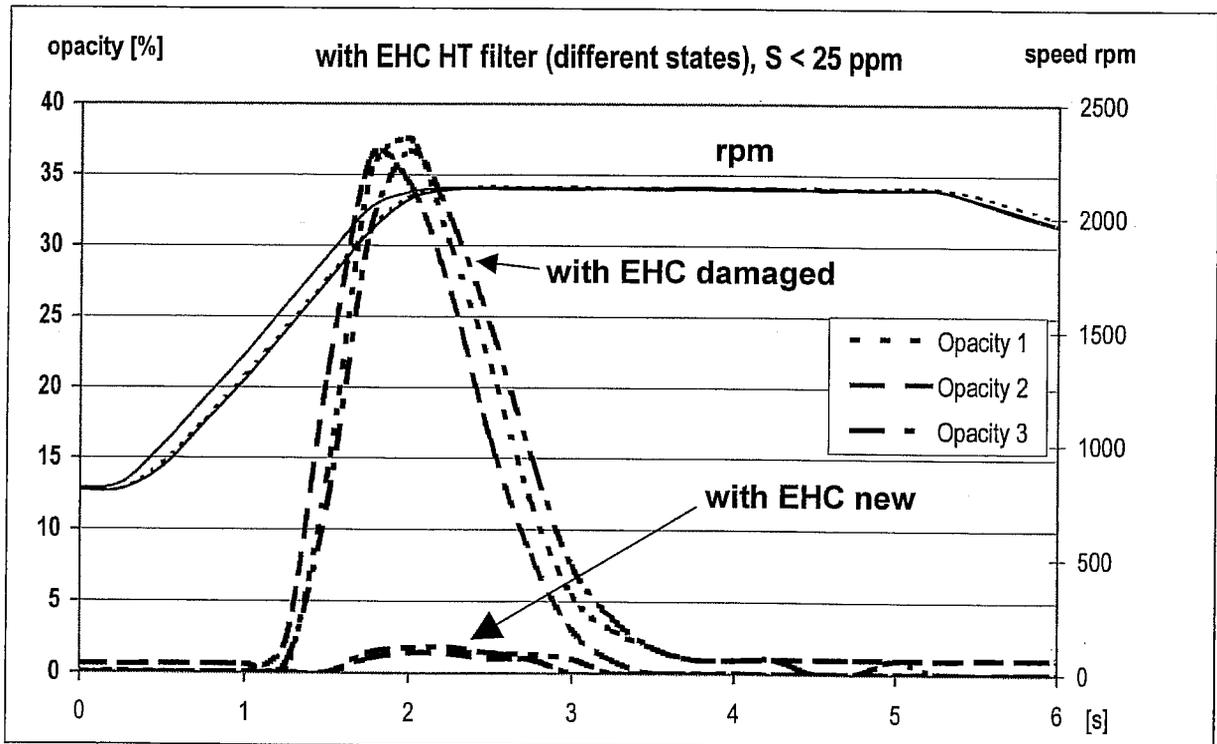
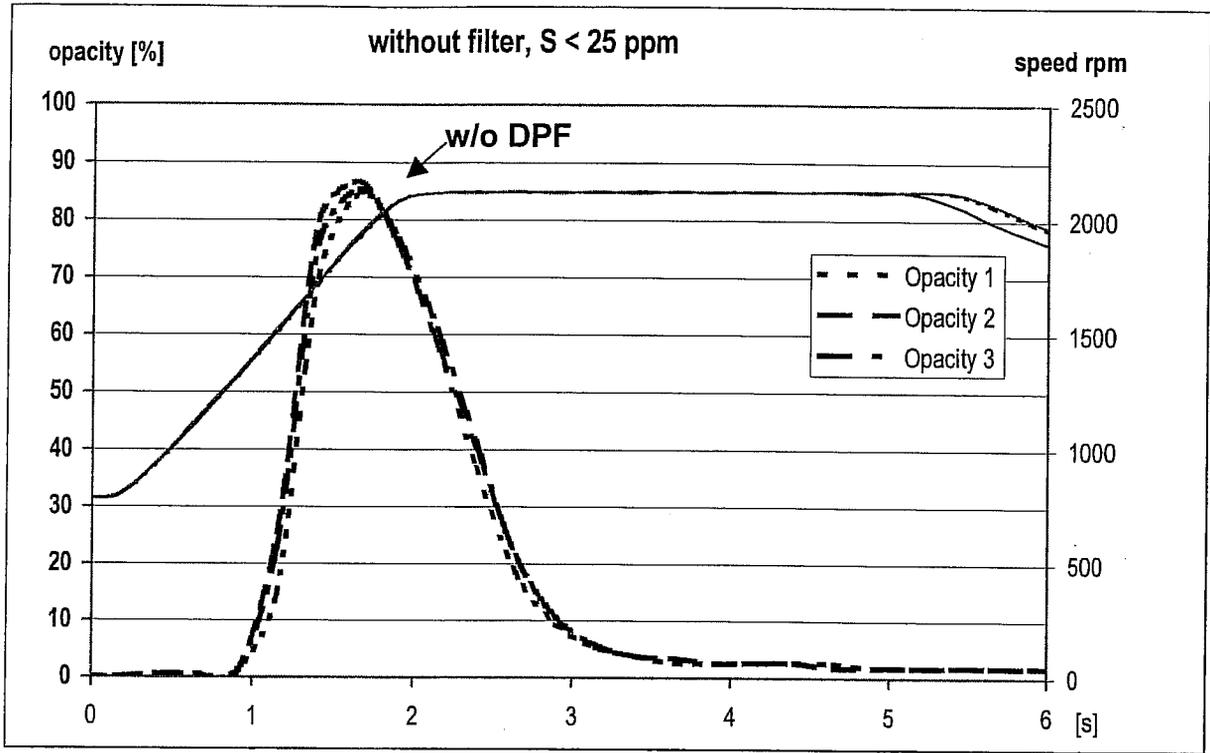
Pkt.	t0 [°C]	t1 [°C]	t2 [°C]	t3 [°C]	t4 [°C]	t5 [°C]	t6 [°C]	t7 [°C]	t8 [°C]	t _{H2O} [°C]	t _{Oil} [°C]	t _{Fuel} [°C]	Δp1 [mbar]	Δp2 [mbar]	Δp3 [mbar]	Δp4 [mbar]	Δp6 [mbar]
2	21	20	45	208	206	195	175	160	80	86	86	18	-6.8	270	390	10	0
6	24	23	45	155	163	154	143	136	80	86	86	21	-2.8	100	160	0	0
5																	
1																	
2																	

Pkt.	Pe [kW]	pme [bar]	G _{Fuel} [kg/h]	CO [g/kWh]	NO _x (hot) [g/kWh]	G _{Exh} [kg/h]	be [g/kWh]	β [mm ² /H]	λ [-]	CO [g/h]	NO _x [g/h]
2	10.5	1.03	5.53	4.02	15.83	455.5	528.3	27.1	5.67	42.1	166
6	7.3	1.03	3.15	5.93	15.10	287.1	429.6	22.0	6.29	43.5	111

Opacity at free acceleration

with/without particle trap EHC HT

engine: Liebherr D914T



2. Voruntersuchung, März 2003

Es wurden 2 Filtereinsätze geliefert. Der erste Einsatz schmolz nach dem Konditionieren ca. 1 Std. bei 350 °C.

Folgender Messvorgang wurde mit dem zweiten, identischen Filtereinsatz durchgeführt:

- Betriebspunkt 9, 2000 rpm / 50 Nm, A 8-2, $t_{\text{vorPF}} = 174$ °C, Messzeit 15 min – Anzahlkonzentrationen laufend abnehmend
- Betriebspunkt 6, 1400 rpm / 297 Nm, A 8-3, $t_{\text{vorPF}} = 255$ °C, Betriebszeit bis 50 min – Absenkung der Anzahlkonzentrationen nach DPF über der Zeit
- Betriebspunkt , 1400 rpm / 360 Nm, A 8-4, $t_{\text{vorPF}} = 300$ °C, Messzeit über 1 Std. – deutliche Verminderung der Kondensate, Vermutung, dass das Silikongummi thermisch zu leiden beginnt
- Betriebspunkt 6, 1400 rpm / 297 Nm, A 8-5, $t_{\text{vorPF}} = 255$ °C, Gesamtbetriebszeit bis 2,5 Std. – Eliminierung der Kondensate.

Weitere Informationen sind zusammengefasst in:

A 8-6 einige NanoMet-Resultate

A 8-7 zusammenfassende Tabelle des SMPS-Messungen

A 8-8 Tabellen der Mess- und Rechenwerte

Als Ergebnis kann erwähnt werden:

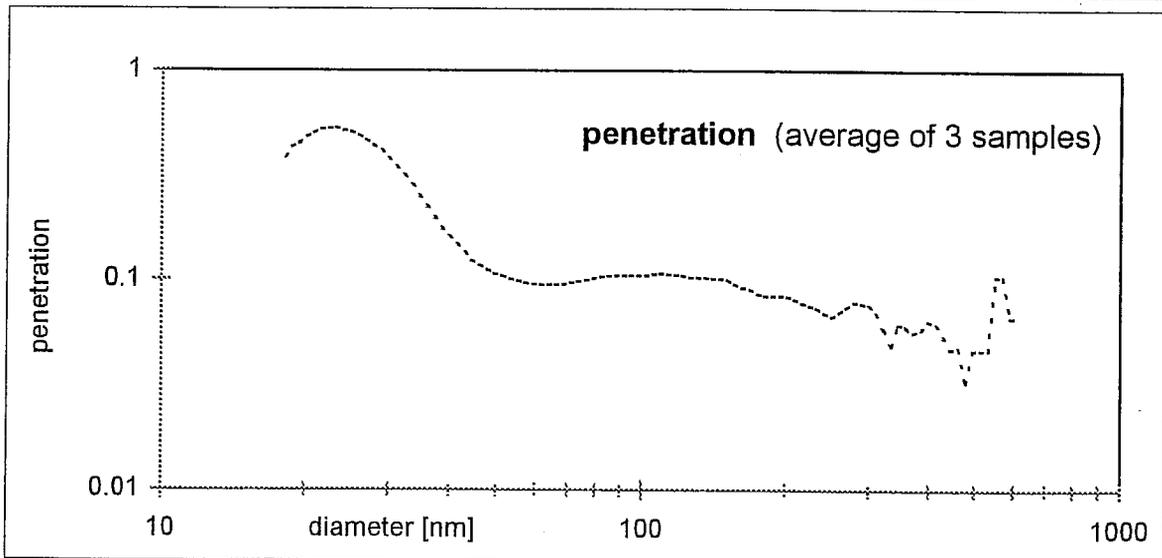
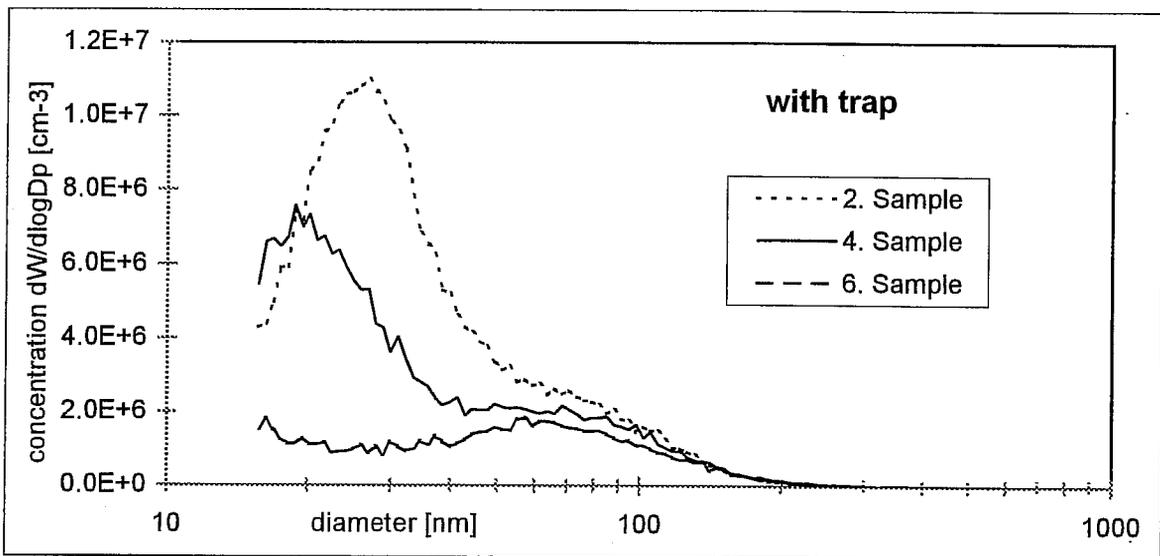
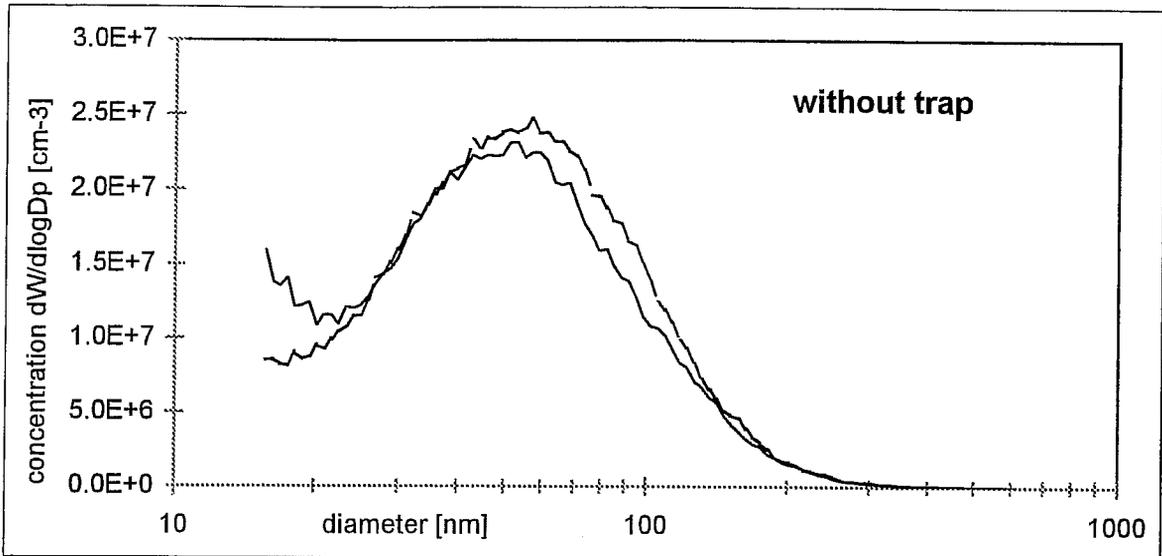
- der PF ist bei 350 °C nicht beständig
- die Kondensate, höchstwahrscheinlich das Material der Schliche, können nach einem längeren Konditionieren beseitigt werden, doch in dieser Konditionierungszeit liegen die Nanopartikelkonzentrationen oft um Vielfaches höher, als ohne PF
- ohne Berücksichtigung der Kondensate liegen die Partikelzahl-Abscheidegrade des untersuchten HT-Filters knapp unterhalb des VERT-Kriteriums (95 %).

Es resultierte aus diesen Untersuchungen der Bedarf nach weiteren Verbesserungen:

- Einbinden der Beseitigung der Glassfaserschliche in Produktionsprozess, d.h. Lieferung eines Filtereinsatzes, welcher keiner Konditionierung mehr bedarf
- Verbesserung des Partikelzahl-Abscheidegrades.

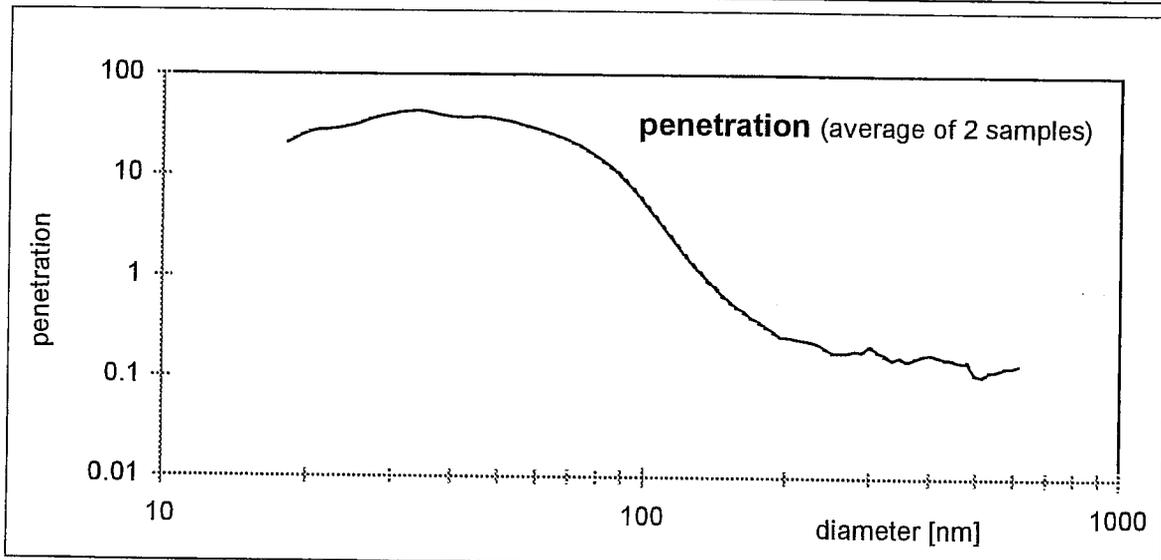
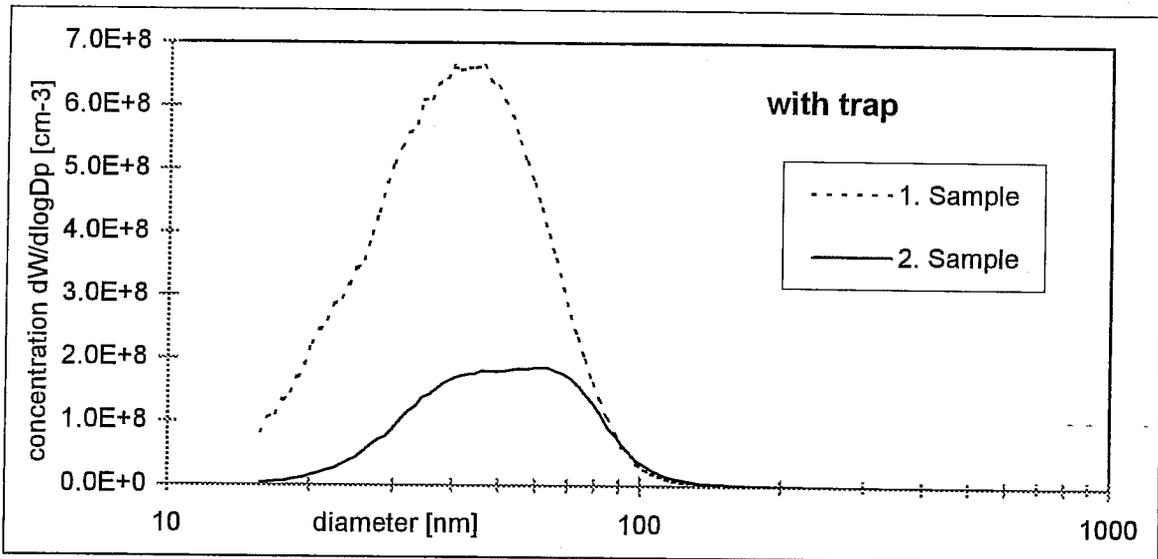
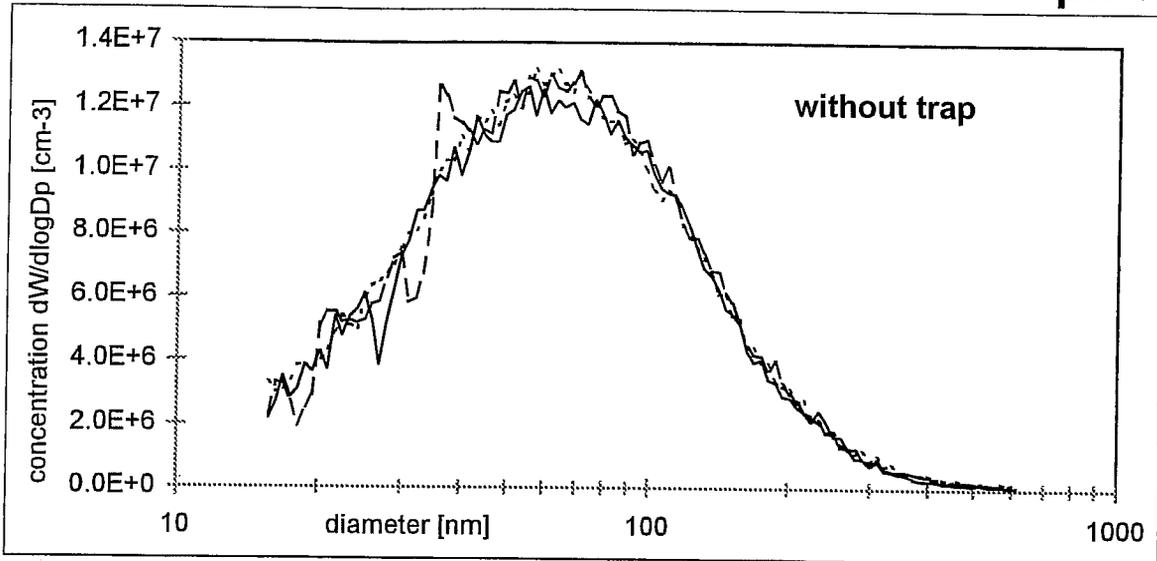
SMPS-size spectra, EHC-trap 2
Liebherr D914 T, 2000 min⁻¹ / 50Nm
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 9



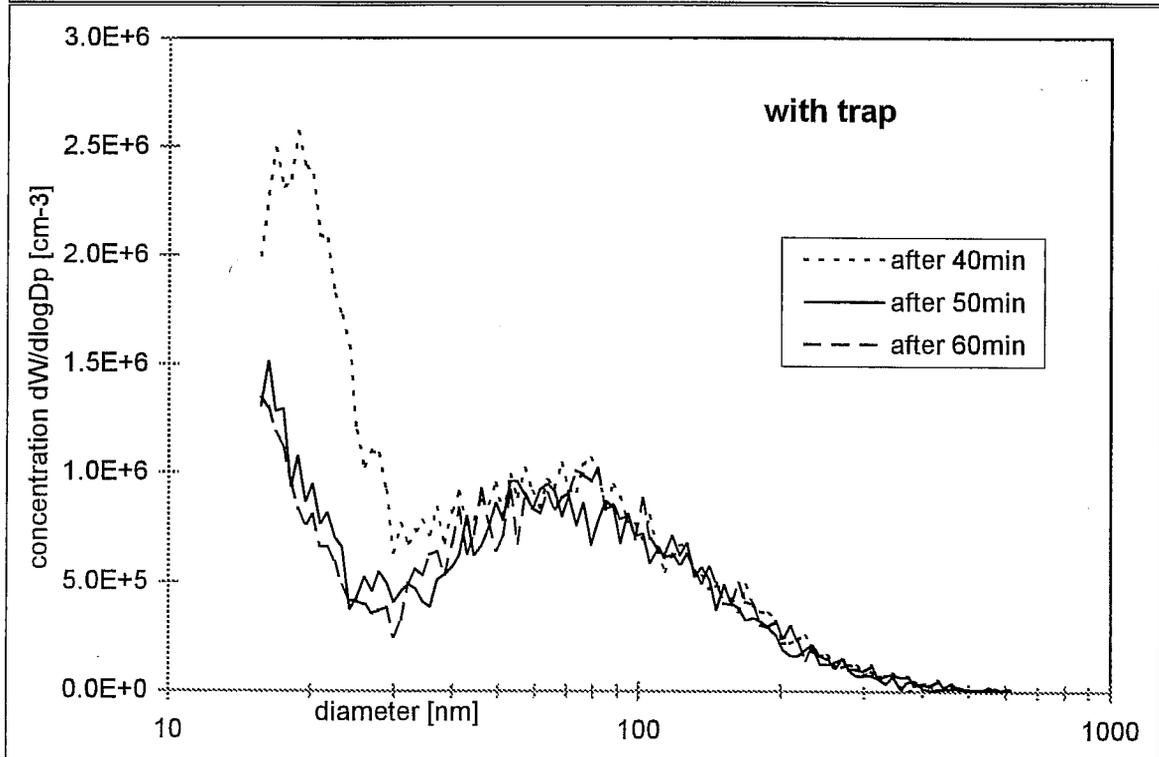
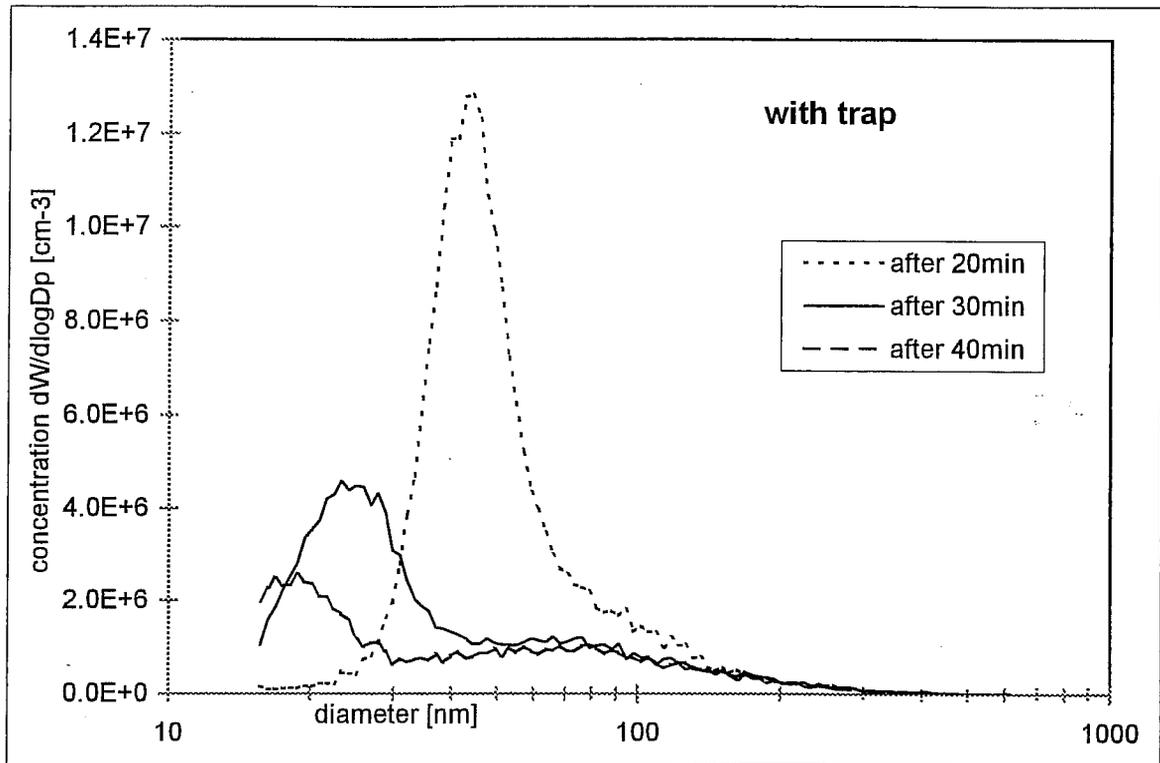
SMPS-size spectra, EHC-trap 2
Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹/ 297Nm, after 50min operating time
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 6



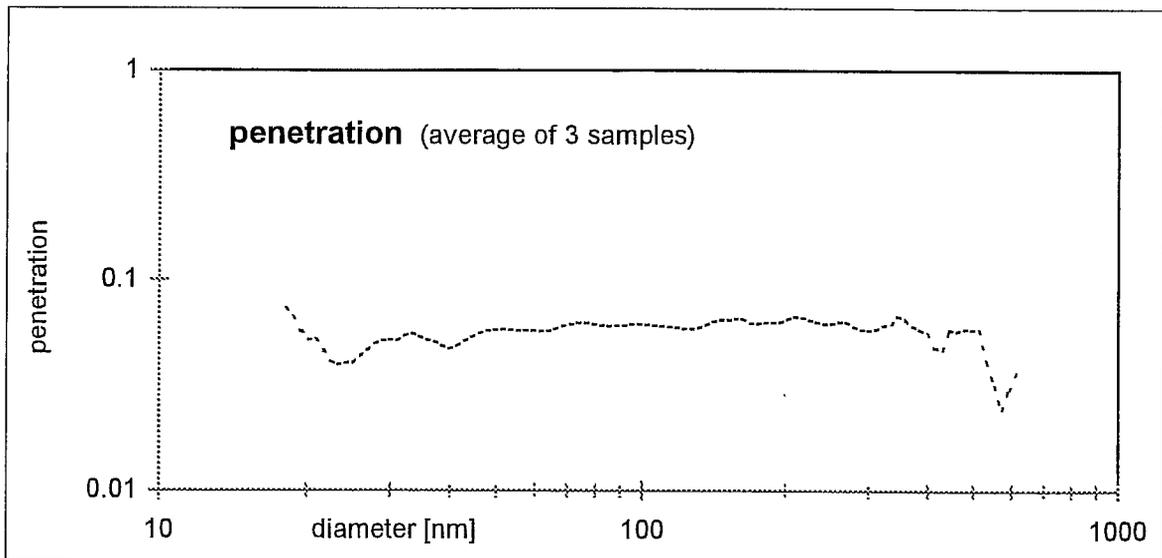
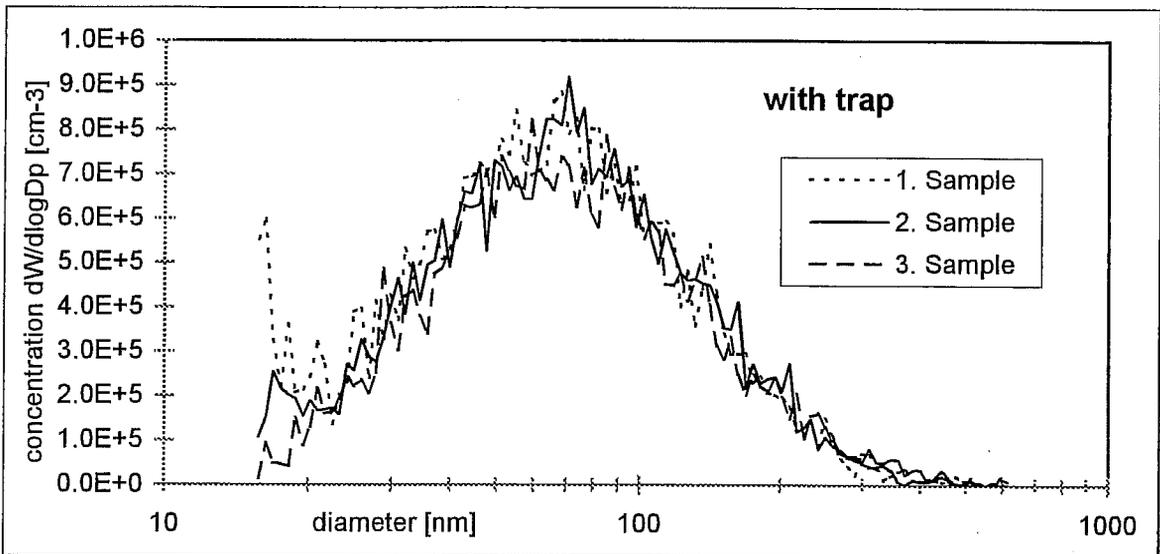
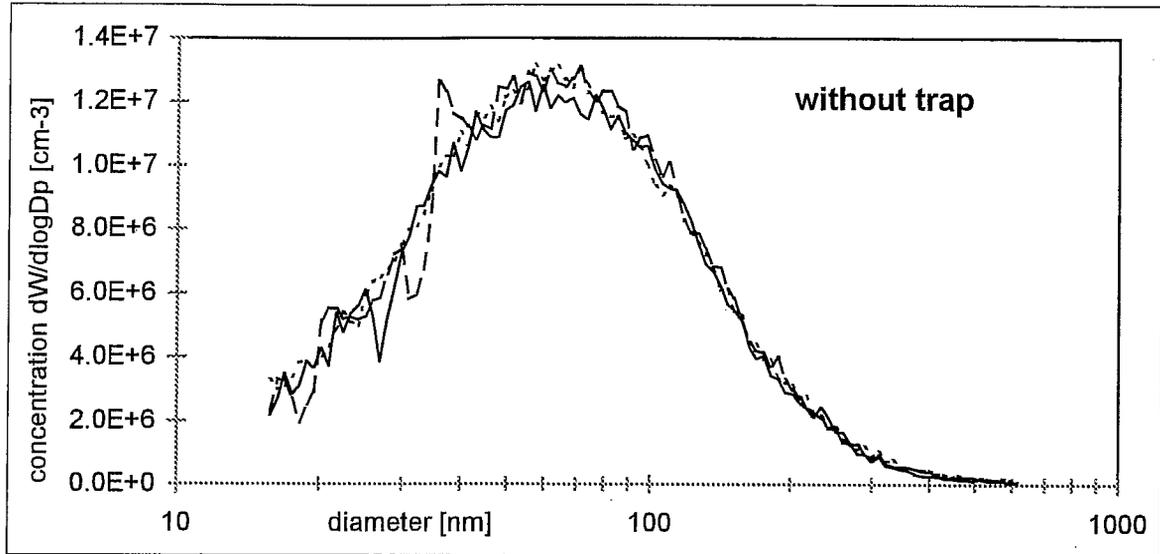
SMPS-size spectra, EHC-trap 2
Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹ / 350Nm, 300°C
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 13

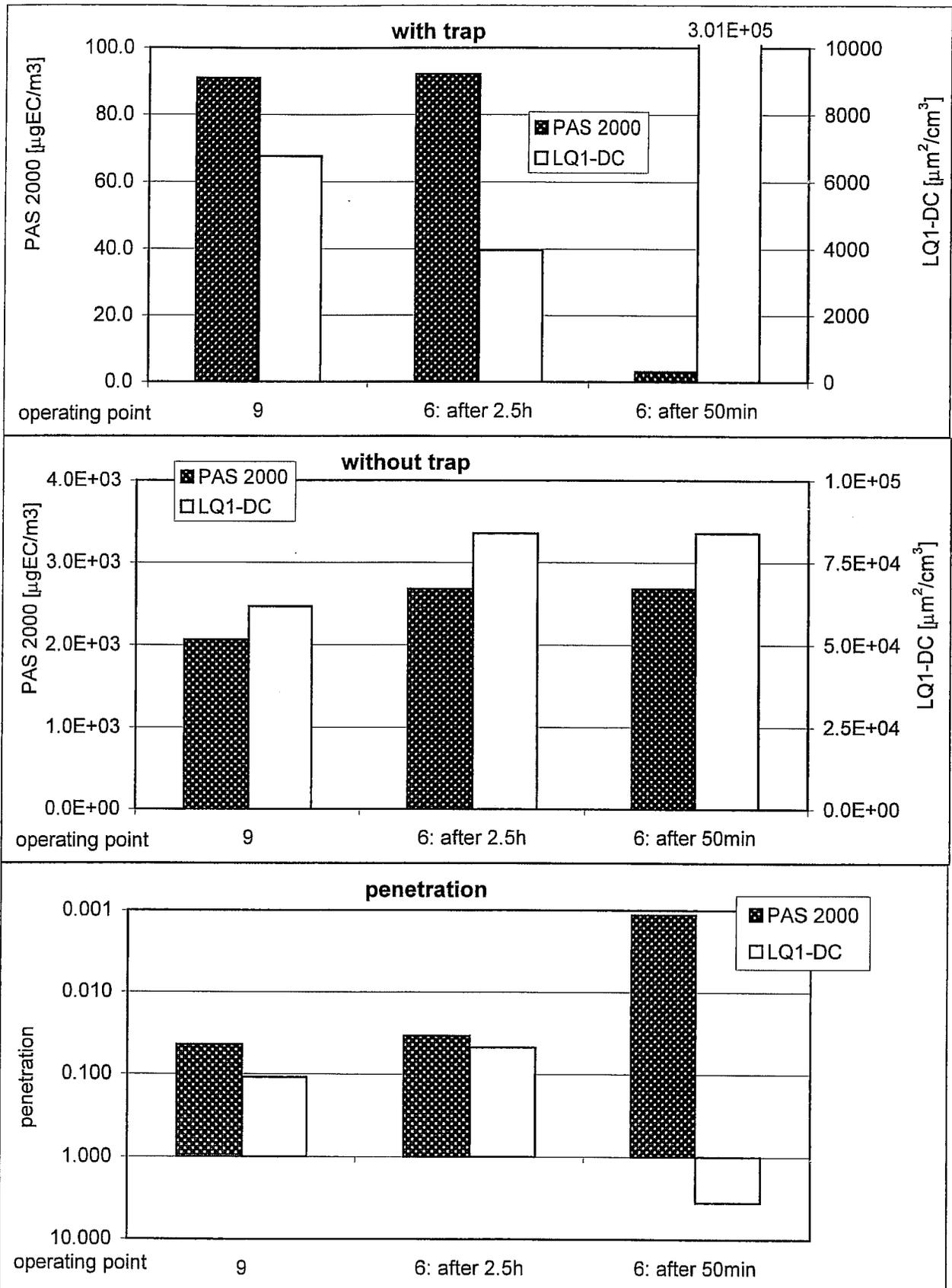


SMPS-size spectra, EHC-trap 2
Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹ / 297Nm, after 2.5h operating time
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 6



EHC particle trap 2, NanoMet sensors with NanoMet-diluter at exhaust pipe



SMPS measurement, EHC-trap (second)
Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹/ 297Nm
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

	total number concentration 20 - 300nm		Number reduction with trap [%]	Total operating time trap [min]	Temperature trap [°C]
	w/o trap [1/cm3]	with trap [1/cm3]			
Operating point 9, 2000min-1/50Nm 1. test point	1.47E+07	4.10E+06	72.10	30	174
		2.39E+06	83.76	35	174
		1.09E+06	92.60	40	174
Operating point 6, 1400min-1/297Nm 2. test point	9.11E+06	2.91E+08	-3089.13	50	255
		8.72E+07	-857.62	53	255
Operating point 13, 1400min-1/350Nm conditioning phase		>3e8		60	300
		3.37E+06		90	300
		1.61E+06		100	300
		9.10E+05		110	300
		6.61E+05		120	300
Operating point 6, 1400min-1/297Nm 2. test point, repetition after conditioning	9.11E+06	5.47E+05	94.00	140	255
		5.31E+05	94.17	143	255
		4.96E+05	94.56	146	255

VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	w/o
date:	-	measurement:	2 th
equipment:	std-Oel(15W40) , LSD fuel (S<25ppm)		

R _{Raum} [%]:	26
P _{atm} [mbar]:	978
T _{Raum} [°C]:	20

Pkt.	n [1/min]	M [Nm]	G _{Air} [kg/h]	V _{Fuel} [l/h]	SZ [-]	CO [ppm]	HC _{6IR} [ppm]	NO [ppm]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	CO _{2High} [%]
9	2000	50	445	6.50	0.1	90	14.1	185	220	17.60	3.25
6	1400	297	337	11.45	0.2	9	14.0	1080	1130	13.24	6.90
x	1400	360									
6	1400	297	337	11.45	0.2	9	14	1080	1130	13.24	6.90

Pkt.	t0 [°C]	t1 [°C]	t2 [°C]	t3 [°C]	t4 [°C]	t5 [°C]	t6 [°C]	t _{in20} [°C]	t _{oil} [°C]	t _{fuel} [°C]	Δp1 [mbar]	Δp2 [mbar]	Δp3 [mbar]	Δp4 [mbar]	Δp5 [mbar]	Δp6 [mbar]
9	21	20	47	203	202	191	177	81	88	22	-6.5	260	370	10	10	10
6	19	20	53	324	336	307	284	81	89	18	-4	350	260	0	10	0
x																
6	19	20	53	324	336	307	284	81	89	18	-4	350	260	0	10	0

Pkt.	Pe [kW]	pme [bar]	G _{Fuel} [kg/h]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	G _{Exh} [kg/h]	be [g/kWh]	β [mm ² /H]	λ	CO [g/h]	NO _x [g/h]
9	10.5	1.03	5.53	3.65	13.83	450.5	528.3	27.1	5.61	38.3	145
6	43.5	6.11	9.75	0.07	13.29	346.7	223.8	68.2	2.41	2.9	579
x											
6	43.5	6.11	9.75	0.07	13.29	346.7	223.8	68.2	2.41	2.9	579

VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	EHC-2
date:	07.03.2003	measurement:	2th
equipment:	std-Oel(15W40) , LSD fuel (S<25ppm)		
		CO ₂ Air-Amb	:0.044%

R _{Fraum} [%]:	26
P _{atm} [mbar]:	978
T _{Fraum} [°C]:	17

Pkt.	n [1/min]	M [Nm]	G _{Air} [kg/h]	V _{Fuel} [l/h]	SZ [-]	CO [ppm]	HC6IR [ppm]	NO [ppm]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	CO ₂ High [%]
9	2000	50	459	7.0	0	71	6.7		229	18.70	1.96
6	1400	297	336	12.0	0	3	8.9		1055	16.30	4.35
x	1400	360	346	14.0	0	0	9.2		1187	15.90	4.76
6	1400	297	326	12.0	0	10	8		1001	16.50	4.23

t _{H2O} [°C]	t _{Oil} [°C]	t _{Fuel} [°C]
74	80	17
81	90	20
82	90	21
82	91	21

Pkt.	t0 [°C]	t1 [°C]	t2 [°C]	t3 [°C]	t4 [°C]	t5 [°C]	t6 [°C]	t7 [°C]
9	15	15	37	203	200	191	182	168
6	20	19	57	331	342	315	289	266
x	20	21	57	366	388	355	326	300
6	22	23	54	338	353	324	299	280

Δp1 [mbar]	Δp2 [mbar]	Δp3 [mbar]	Δp4 [mbar]	Δp5 [mbar]	Δp6 [mbar]
-6	270	400	0	10	0
-4	340	270	10	10	0
-4	420	320	20	30	30
-4	320	290	40	40	40

Pkt.	Pe [kW]	pme [bar]	G _{Fuel} [kg/h]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	G _{Exh} [kg/h]	be [g/kWh]	β [mm ² /H]	λ [-]	CO [g/h]	NO _x [g/h]
9	10.5	1.03	5.96	2.97	15.46	465.0	568.9	29.2	5.37	31.1	162
6	43.5	6.11	10.21	0.02	12.35	346.2	234.6	71.4	2.29	0.9	538
x	52.8	7.40	11.92	0.00	11.85	357.9	225.8	83.3	2.02	0.0	625
6	43.5	6.11	10.21	0.07	11.32	336.2	234.6	71.4	2.23	3.1	493

3. Voruntersuchung, Juni 2003

Der EHC Aufsteckfilter HT20 wurde zum 3. Mal gemessen; ein konditionierter (bei Hersteller: EHC Technik AB) Filtereinsatz wurde geliefert. Die zwei gleichen Betriebspunkte wie in früheren Untersuchungen (EHC-2) wurden genommen:

- Betriebspunkt 9, 2000 rpm / 50 Nm ($T_{\text{vorPF}} = 188^{\circ}\text{C}$)
- Betriebspunkt 6, 1400 rpm / 297Nm ($T_{\text{vorPF}} = 270^{\circ}\text{C}$)

Die Referenz ohne PF EHC wurde für diese zwei Punkte auch wiedergemessen.

Als Ergebnis kann gesagt werden:

- Sieben statt der üblichen 3 Samples mit SMPS wurden gemessen. Bei den Auswertungen sind nun die ersten drei und die letzten drei jeweils zusammengefasst. Die ersten drei bedeuten daher zwischen 5 und 12min Betriebszeit des Betriebspunktes und die letzten drei zwischen 15 und 22min.

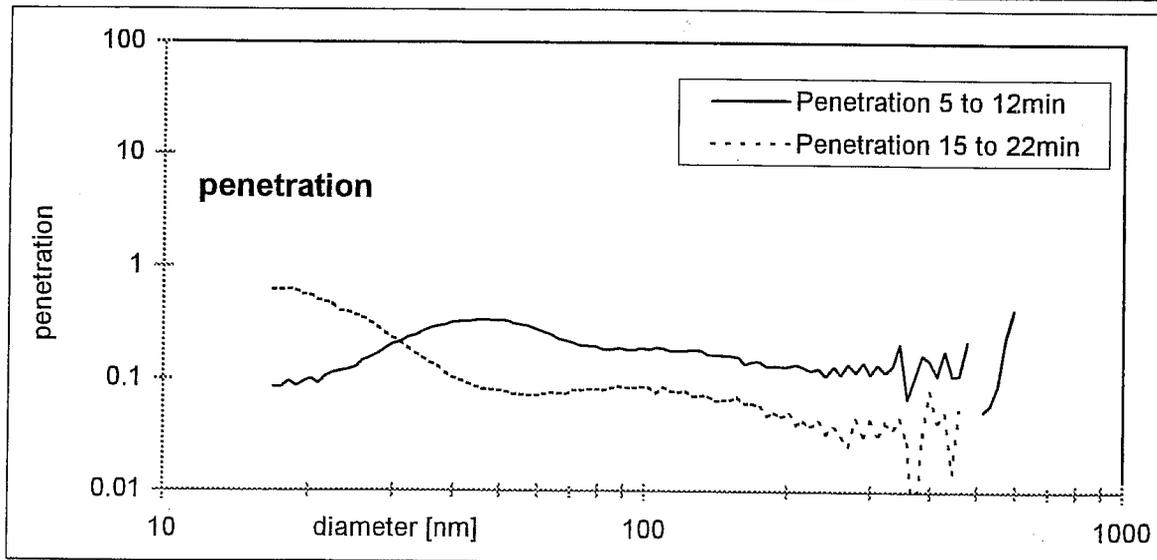
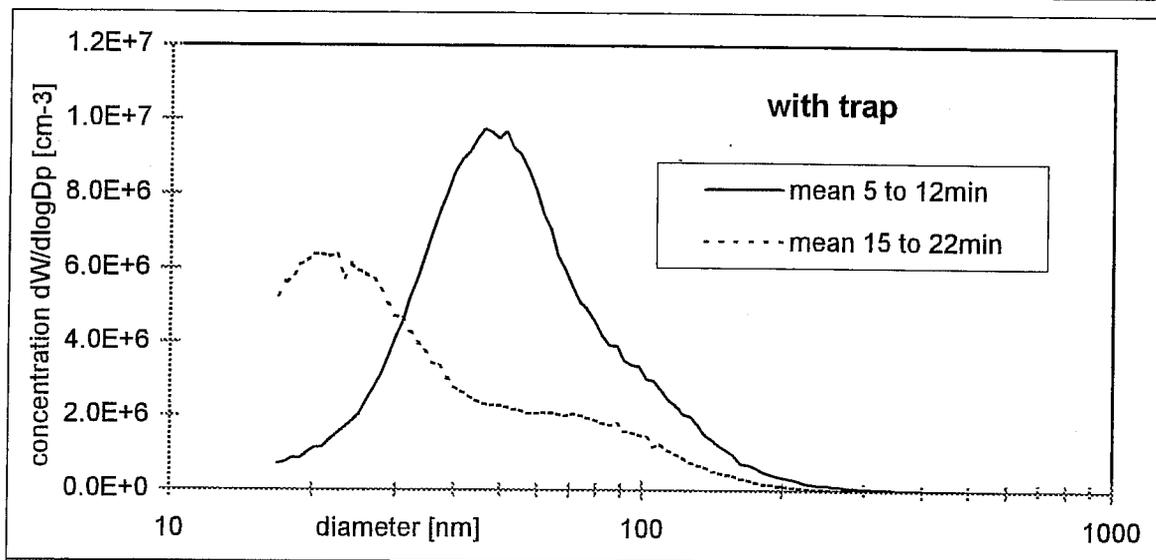
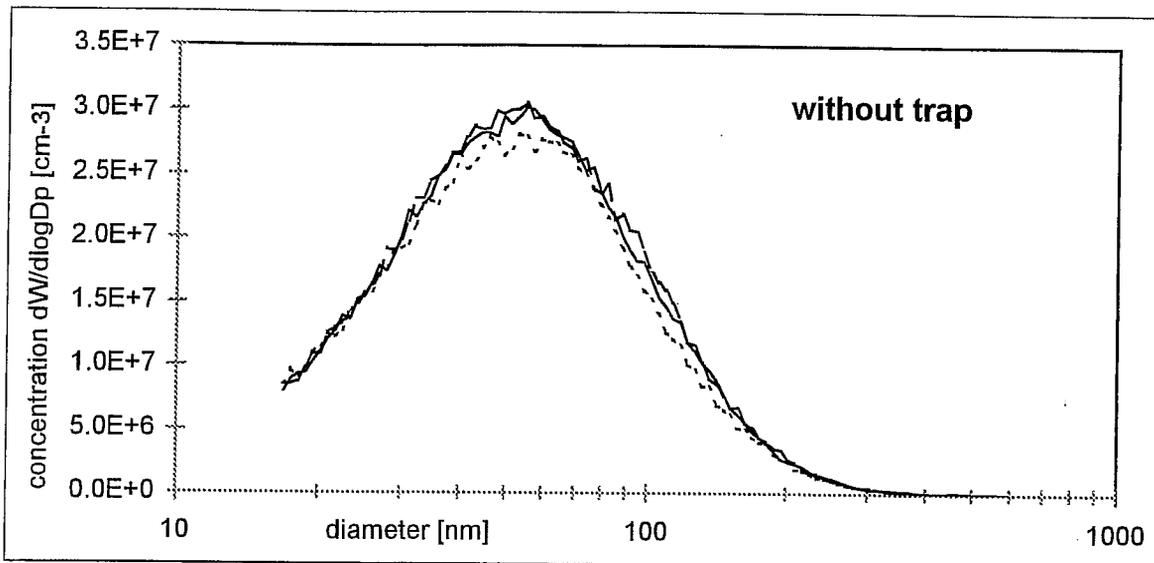
Beim Betriebspunkt 9 schafft der Filter erst nach ca. 15-22min einen Abscheidegrad von 86% und wie bei den Spektren zu sehen, handelt es sich dabei nicht um einen typischen Diesel-mode.

- Beim Betriebspunkt 6 und damit höherer Abgastemperatur (270°C) erzeugt der Filter auch nach über 20min nachwievor Partikel, so dass ein Wirkungsgrad von -55% resultiert. Eine klare Absenkung der Anzahlkonzentrationen über der Zeit findet statt, wie man es bereits, auch beim Betriebspunkt 6, mit dem EHC-2 vor der Konditionierung (90min mit 300°C) beobachtet hat (A 8-3).
- NanoMet zeigt ähnliches.

Es resultiert aus diesen Untersuchungen, daß das Produktion-Entschlichtungsverfahren des Herstellers, nicht die gewünschte Wirkung hatte, diese Glassfaserschliche abzuschaffen.

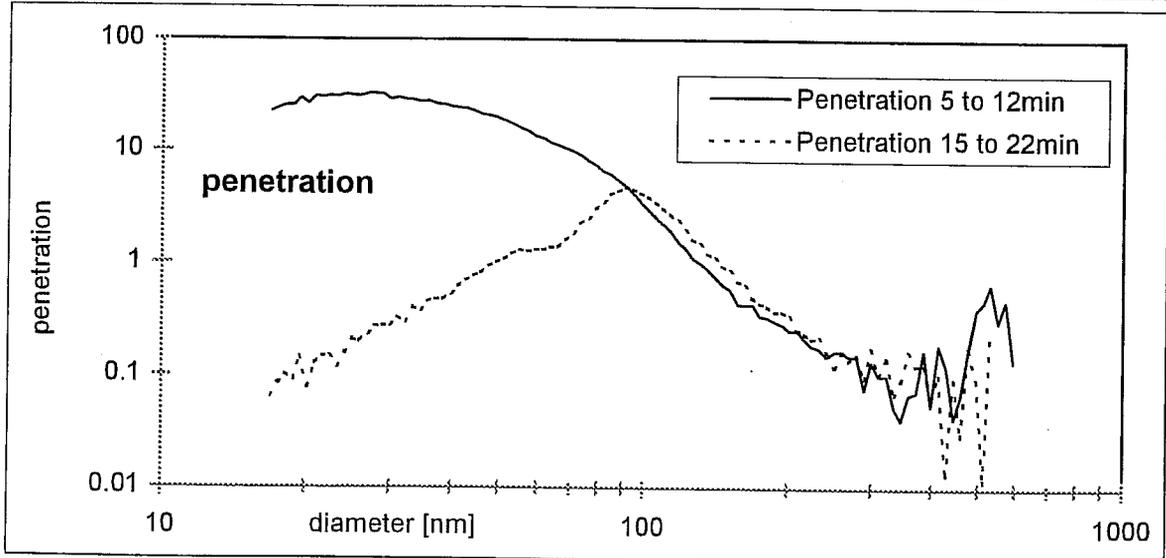
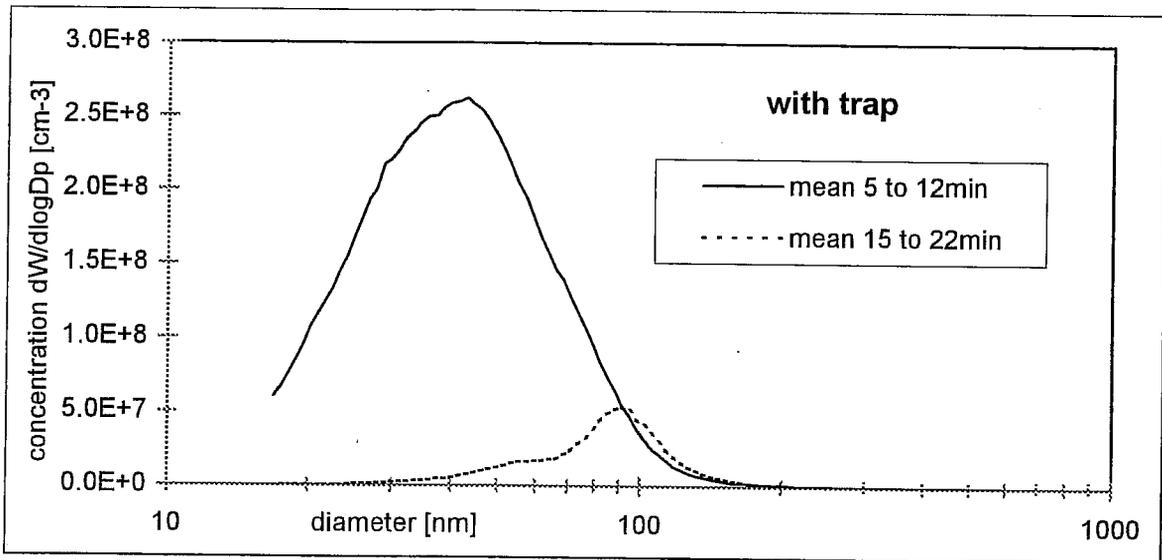
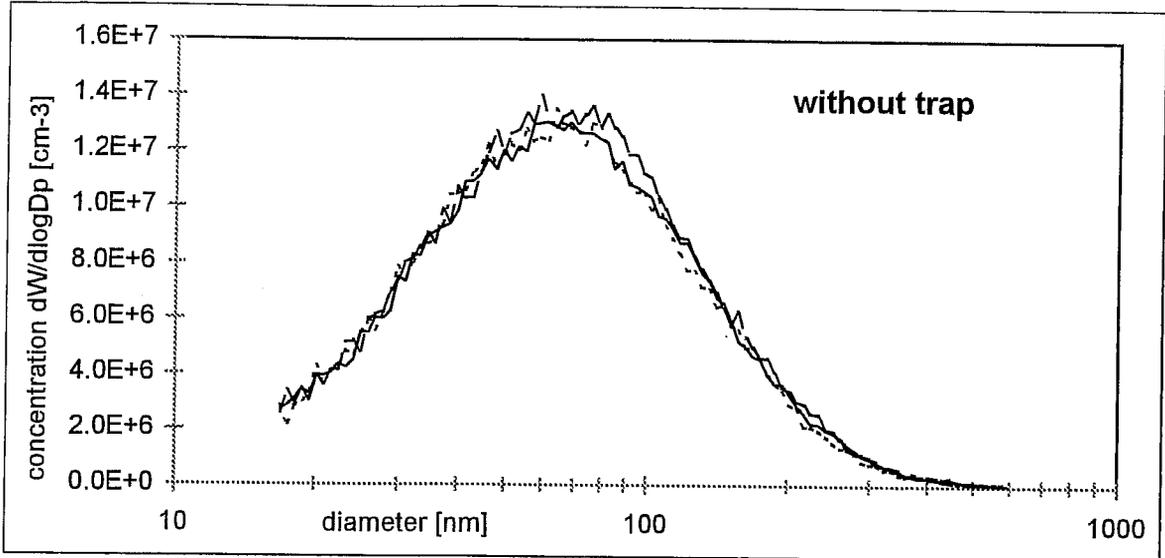
SMPS-size spectra, EHC-trap 3
Liebherr D914 T, 2000 min⁻¹ / 50Nm
with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 9

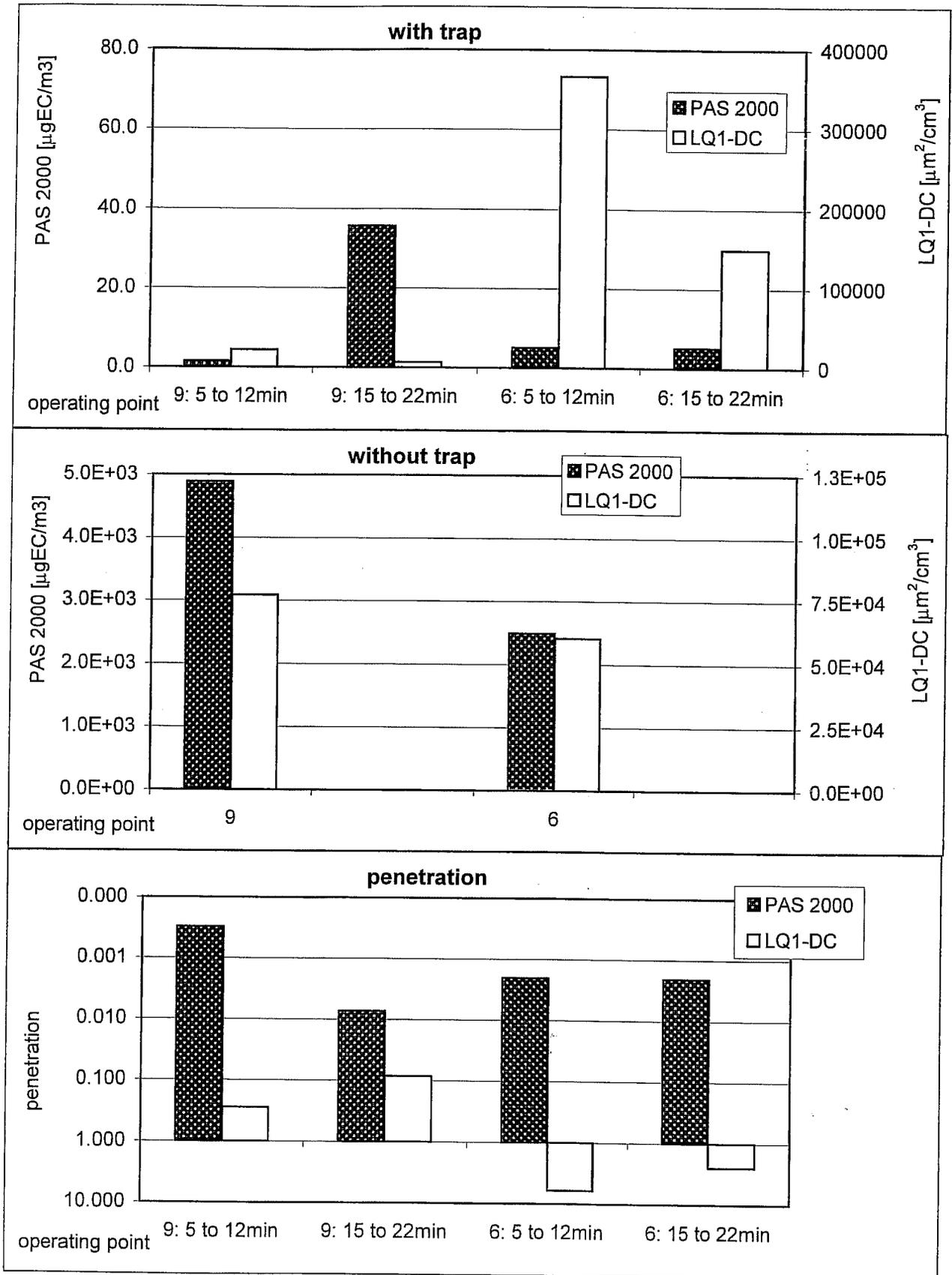


SMPS-size spectra, EHC-trap 3 Liebherr D914 T, 1400 min⁻¹ / 297Nm with NanoMet-diluter at exhaust pipe

pt. 6



EHC particle trap 3, NanoMet sensors with NanoMet-diluter at exhaust pipe



VERT Filter Test - measured and calculated values

engine:	Liebherr D914T	particle trap:	EHC-3
date:	24.06.2003	measurement:	3th
equipment:	std-Oel(15W40) , LSD fuel (S<25ppm)		
		CO ₂ Air-Amb	:0.040%

R _{Raum} [%]:	42.7
P _{atm} [mbar]:	972
T _{Raum} [°C]:	26

Pkt.	n	M	G _{Air} [kg/h]	V _{Fuel} [l/h]	SZ	CO	HC6 _{IR} [ppm]	NO	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	CO ₂ High [%]
9	2000	50	451	7.1	0	120	10.5	205	240	17.15	3.58
6	1400	297	334	11.7	0	23	17	1095	1115	12.59	7.94

t _{H2O} [°C]	t _{Oil} [°C]	t _{Fuel} [°C]
71	87	27
72	90	27

Pkt.	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
9	23	23	52	245	220	201	194	188
6	24	24	57	383	342	313	288	270

Δp1 [mbar]	Δp2 [mbar]	Δp3 [mbar]	Δp4 [mbar]	Δp5 [mbar]	Δp6 [mbar]
-6	270	390	0	10	20
-4	340	280	0	10	20

Pkt.	Pe [kW]	pme [bar]	G _{Fuel} [kg/h]	CO	NO _x [g/kWh]	G _{Exh} [kg/h]	be [g/kWh]	β [mm ² /H]	λ	CO	NO _x [g/h]
9	10.5	1.03	6.03	4.93	16.12	457.0	575.4	29.5	5.22	51.7	169
6	43.5	6.11	9.92	0.17	13.45	343.9	227.7	69.3	2.35	7.2	586