

Bericht Nr. 203'826

**Praxiserprobung eines Messverfahrens zur
Bestimmung der Partikelanzahl
an Personenwagen mit Selbstzündungsmotoren**

**Ein Beitrag zum
Particle Measurement Programme (PMP),
der UN-ECE GRPE WP29**

Autoren:

Martin Mohr
Urs Lehmann

Empa
Eidgenössische Materialprüfungs- & Forschungsanstalt
8600 Dübendorf, Schweiz

Abteilung Verbrennungsmotoren

Im Auftrag des
Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
Sektion Verkehr

Dübendorf, 15. November 2005

Projektbeteiligte:

Empa, Dübendorf

Projektleitung

Prüfstandsmessungen & -auswertungen

Dr. Martin Mohr

Jan Stilli

Peter Stettler

Philippe Novak

Claudio Rüdy

Ana-Marija Vasic

Anna-Maria Forss

Urs Lehmann

Daniel Schreiber

Partikelmessungen & -auswertungen

AFHB, Nidau

Prüfstands- & Partikelmessungen

Pierre Comte

Jean-Luc Petermann

METAS, Wabern

Kalibration Partikelzähler

Dr. Jürg Schlatter

Inhalt:

ZUSAMMENFASSUNG.....	5
1 EINLEITUNG.....	8
2 ZIEL DER UNTERSUCHUNGEN.....	8
3 BESCHREIBUNG DES TESTPROGRAMMS	9
3.1 UNTERSUCHTE FAHRZEUGE.....	9
3.2 TREIBSTOFF	9
3.3 MESSPROGRAMM.....	10
4 EXPERIMENTELLER AUFBAU	11
4.1 BESTIMMUNG DER PARTIKELANZAHL	11
4.2 GRAVIMETRISCHE BESTIMMUNG DER PARTIKELMASSE.....	14
4.3 MESSKONFIGURATIONEN.....	14
MESSKONFIGURATION FÜR KOMPONENTENVERGLEICH	15
5 ERGEBNISSE DER FAHRZEUGMESSUNGEN	16
5.1 TOYOTA AVENSIS (DIESEL).....	17
5.2 OPEL VECTRA (DIESEL).....	19
5.3 VW PASSAT (DIESEL)	21
5.4 VW TOURAN (BENZIN)	24
5.5 ÜBERSICHT FAHRZEUGE.....	26
5.6 WIEDERHOLBARKEIT DER PARTIKELANZAHLMESSUNG.....	28
6 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN ZUR MESSTECHNIK.....	29
6.1 VERGLEICH CPC	29
6.2 VERGLEICH VERDÜNNUNGSSYSTEME.....	31
7 KALIBRATION UND SPEZIFIKATION DER MESSTECHNIK.....	34
7.1 KALIBRATION CPC	34
7.2 KALIBRATION VERDÜNNUNGSEINHEITEN.....	35
7.3 SPEZIFIKATION VERDAMPFUNGSEINHEIT (HEATER)	36
7.4 TÄGLICHE FUNKTIONSÜBERPRÜFUNG CPC.....	37
7.5 MESSBEREICH CPC	39
8 RINGVERGLEICH MIT ABGASPRÜFSTELLE AFHB IN NIDAU.....	40
8.1 MESSAUFBAU AN DER AFHB	40
8.2 ERGEBNISSE DES LABORVERGLEICHS	41
8.3 ERGEBNISSE ZUM VERGLEICH DER MESSSYSTEME AFHB UND EMPA.....	44
9 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	46
10 EMPFEHLUNGEN	48

11 DANKSAGUNGEN	49
12 DEFINITIONEN, ABKÜRZUNGEN	50
13 REFERENZEN	51
14 ANHANG	52
A ROLLENPRÜFSTAND EMPA DÜBENDORF.....	52
B TREIBSTOFFANALYSE.....	53
C KALIBRIERZERTIFIKATE CPC.....	55
D ZEITVERLAUFE PARTIKELANZAHLMESSUNGEN NEDC.....	57
E MITTELWERTE DER GASFÖRMIGEN ABGASKOMPONENTEN.....	59
F VERORDNUNGSENTWURF BUWAL.....	60

Zusammenfassung

Dieselpersonenwagen sind eine wichtige Quelle von Dieseleruss. Weil dieser Schadstoff Krebs erregend ist und Herzkreislauf- sowie Atemwegserkrankungen hervorrufen kann, hat die Kommission für Umwelt, Raumplanung und Energie des Nationalrates in einer Motion (UREK-N 03.3572) am 28. Oktober 2003 verlangt, dass die Partikelemissionen neu eingeführter Dieselpersonenwagen ab 2006 soweit begrenzt werden, wie es die beste verfügbare Technologie (zum Beispiel durch den Einbau eines Partikelfilters) ermöglicht.¹

Das BUWAL hat den Auftrag erhalten zu prüfen, wie diese Motion konkret umzusetzen wäre. Weil nicht nur die Masse sondern auch die Anzahl der Partikeln gesundheitlich relevant ist, hat es vorgeschlagen, die heutige gravimetrische Methode durch eine Messmethode zur Bestimmung der Partikelanzahl zu ergänzen. Unter Einbezug einer Expertengruppe (ASTRA, EMPA, METAS, FH Aargau, AFHB Biel, TTM Mayer und Matter Engineering AG) hat das BUWAL eine Partikelanzahl-Messmethode entworfen, die sich an die ersten Ergebnisse der internationalen ECE-GRPE-Expertengruppe "Particulate Measurement Programm" (PMP) anlehnte. Ausserdem wurde ein Partikelanzahl-Grenzwert von 10^{11} Partikel/km vorgeschlagen, der sich an dem Reduktionspotential eines wirksamen Partikelfilters gemäss Stand der Technik orientiert. Dies wurde in einem Verordnungsentwurf zusammengefasst, den die Schweiz im März 2004 im Rahmen der WTO notifiziert hat. Gleichzeitig wurde die EMPA beauftragt, die Praxistauglichkeit des Verfahrens und die Einhaltung des Grenzwertes an mehreren Fahrzeugen zu überprüfen. Aussagen zu Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit sollten durch zahlreiche Wiederholungstests bzw. durch einen Ringvergleich mit der AFHB gewonnen werden.

Der vorliegende Bericht behandelt die praktische Erprobung dieser Messmethode zur Bestimmung der Partikelanzahl im Abgas von Personenwagen, welche auf einer kontinuierlichen Einzelpartikelzählung mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC) beruht. Die Probenahme erfolgt aus einem Vollstrom-CVS-Tunnel. Die Probe wird zusätzlich verdünnt und durch eine Verdampfungseinheit geleitet, um nur die Feststoffpartikeln zu messen.

Die Gruppe der Testfahrzeuge bestand aus drei Dieselfahrzeugen mit unterschiedlichen Partikelfiltersystemen und einem Benzinfahrzeug mit Direkteinspritzung. Während bei einem Filtersystem die Regeneration durch ein Metalladditiv unterstützt wird, handelte es sich bei den beiden anderen um katalytisch beschichtete Systeme, von denen ein System auch die Funktion eines NO_x -Speicher-katalysators beinhaltet. Das Messprogramm umfasste pro Fahrzeug mindestens sechs Fahrten des reglementierten Zyklus NEDC mit jeweiliger Konditionierung davor. Zwischen den NEDC-Tests wurden auch andere Fahrzyklen mit höheren Lasten gefahren, um die Wirksamkeit der Konditionierung zu untersuchen und Regenerationen der Filter sicherzustellen. Weil erste Messungen einen starken Einfluss der Vorgeschichte des Fahrzeugs auf das Ergebnis zeigten, wurden an einem Fahrzeug zusätzliche Messungen ohne Zwischenfahrten vorgenommen, was einer längeren Konditionierung entspricht. Zur Erweiterung der Datenbasis wurde zusätzlich an einem Dieselfahrzeug ohne Partikelfilter und einem weiteren mit katalytisch beschichtetem Filter je eine Einzelmessung durchgeführt. Für den Ringvergleich wurden an der AFHB fünf Messungen mit dem Dieselfahrzeug mit dem katalytisch beschichteten Filter durchgeführt. Diese Tests erfolgten ohne Zwischenfahrten mit anderen Fahrzyklen.

In den mehreren Wochen dauernden Untersuchungen erwies sich die Anzahlmessung als robust und als Partikelmessverfahren gut geeignet. Von den vier untersuchten Dieselfahrzeugen mit

¹ Der Bundesrat hat am 4. März 2005 die Ablehnung dieser Motion wegen der Unvereinbarkeit einer Pflicht mit den internationalen Wirtschaftsverpflichtungen der Schweiz beantragt. Er hat sich jedoch bereit erklärt, einen finanziellen Anreiz zur Ausrüstung von Dieselpersonenwagen mit Partikelfiltern umzusetzen. Die Motion wurde anschliessend am 10. Mai 2005 von der UREK-N zurückgezogen.

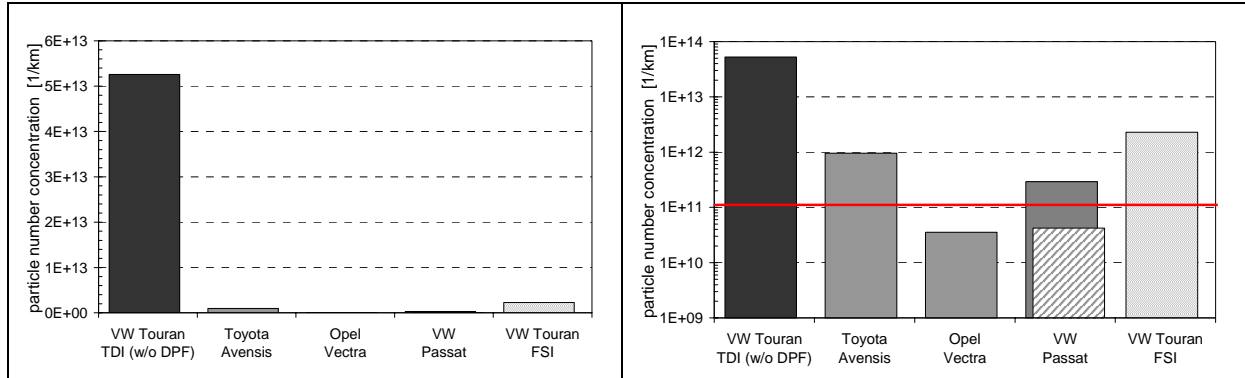
Partikelfilter hielten drei den vorgeschlagenen Grenzwert von 10^{11} Partikel/km ein. Allerdings wurde der Wert bei Messungen mit unmittelbar zuvor regenerierten Partikelfiltern überschritten. Für das Dieselfahrzeug mit der kombinierten Abgasnachbehandlung von Partikelfilter und NO_x -Speicherkatalysator und das Benzinfahrzeug mit der Direkteinspritzung ergaben sich in allen Messungen Emissionen mit etwa einem Faktor 10 über dem vorgeschlagenen Anzahlgrenzwert. Noch deutlicher mit einem Faktor 500 lag die Partikelanzahl des Dieselfahrzeugs ohne Partikelfilter über dem vorgeschlagenen Grenzwert. Weiterhin liegen der Empa umfangreiche eigene Messdaten zur Partikelanzahl von einem Peugeot 605 mit Partikelfilter aus früheren Projekten vor. Da mit einem sehr ähnlichen Verfahren gemessen wurde, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Fahrzeug den vorgeschlagenen Anzahlgrenzwert von 10^{11} Partikel/km einhalten würde.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass das Messverfahren zur Bestimmung der Partikelanzahl deutlich empfindlicher ist als das bestehende Verfahren für die Partikelmasse. So wurde für die Partikelmasse nur ein Unterschied von ca. 50% zwischen dem am höchsten und dem am niedrigsten emittierenden Fahrzeug der vier Versuchsfahrzeuge bestimmt, während für die Partikelanzahl der Unterschied einen Faktor 70 (d.h. 6900% !) betrug. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Messwerte der gravimetrischen Methode klar unterhalb der Nachweisgrenze lagen und diese daher nicht in der Lage ist, den Partikelaustritt von niedrig emittierenden Fahrzeugen zu quantifizieren. Die Messergebnisse für die Partikelanzahl ergaben für die einzelnen Fahrzeuge teilweise grosse Streuungen, deren Ursachen jedoch nicht auf das Messverfahren zurückzuführen sind. Weitergehende Untersuchungen offenbarten trotz vorangegangener Konditionierung einen grossen Einfluss der Vorgeschichte des Fahrzeugs. Dabei scheint die Russbelastung des Partikelfilters im Fahrzeug eine wichtige Rolle zu spielen. Eine weitere Ursache für grosse Messunterschiede liegt in der komplexen Motorsteuerung, die sich je nach Fahrzeugzustand von Zyklus zu Zyklus ändern kann, obwohl von aussen keine bewusste Änderung vorgenommen wird. Durch die erwähnten Einflüsse war die Bestimmung der Wiederholbarkeit des eigentlichen Messverfahrens schwierig, da diese nicht messtechnisch bedingten Ursachen die Streuung dominierten. Vorsichtige Berechnungen ergaben eine über alle Messreihen gemittelte Standardabweichung von 26% mit Extremwerten von 8% und 70%, wobei der Höchstwert von einer Messreihe mit sehr ungleichen Testvorgeschichten stammt. In Anbetracht der im Verhältnis zum geplanten Grenzwert niedrigen Anzahlkonzentrationen und der Unsicherheit durch den Einfluss der Fahrzeugzustände ist dieses Ergebnis als akzeptabel zu betrachten.

In dem Laborvergleich zwischen der Empa und der AFHB blieb das Testfahrzeug in beiden Labors deutlich unter dem Grenzwert. Bezogen auf den Grenzwert von 10^{11} Partikel/km betrug der Unterschied zwischen den Labors 16%. Aufgrund des sehr niedrigen Partikelaustritts des Fahrzeugs wurde ein grosser Einfluss der Qualität der Verdünnungsluft auf das Messergebnis für die Partikelanzahl und Partikelmasse beobachtet. So wurden an der AFHB etwa einen Faktor 3 höhere Konzentrationen für das Fahrzeug als auch für die CVS-Verdünnungsluft als an der Empa gemessen. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Partikelfilter des verwendeten Testfahrzeugs annähernd eine vollständige Abscheidung der Russpartikel leistet. Tests mit parallel laufenden Messsystemen von Empa und AFHB zeigen mit mittleren Abweichungen von 3% (gleiches CPC-Modell) und 12% eine gute Übereinstimmung für die Partikelanzahl. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass die Ursachen von Diskrepanzen nicht im Messverfahren begründet sind, sondern in Komponenten, die dem eigentlichen Messsystem vorgelagert sind.

Als Resümee lässt sich festhalten, dass sich das hier untersuchte Anzahlmessverfahren zur Bestimmung der Partikelemission eignet und keine grundsätzlichen Schwierigkeiten oder Hindernisse für die eigentliche Messmethode identifiziert werden konnten. Dagegen hat sich die heute gültige reglementierte Methode zur Bestimmung der Partikelmasse mittels Filterwägung für Messungen von Fahrzeugen mit Partikelfiltern als ungeeignet erwiesen. Um zuverlässige und

reproduzierbare Messungen in der Zukunft sicherzustellen, sind unabhängig vom Messverfahren Fragen zur Konditionierung des Fahrzeugs, zur Kontrolle der Motorsteuerung und zur Beurteilung der Emissionen während der Regeneration zu klären.



Ausgestossene Partikelanzahl für die untersuchten Testfahrzeuge über den NEDC; Mittelwert über alle Messungen in linearer (links) und logarithmischer Darstellung (rechts). Die Zusatzmessungen mit dem VW Passat mit längerer Konditionierung, sind separat dargestellt (gestreift). VW Touran FSI: Benziner mit Direkteinspritzung. Nähere Angaben zu diesen Abbildungen sind im Abschnitt 5.5 zu finden.

1 Einleitung

Über 40% der Schweizer Bevölkerung leben in Gebieten mit übermässiger Feinstaubbelastung. Die Verminderung der Partikelemissionen aus anthropogenen Quellen ist daher ein zentrales Thema der Luftreinhaltung. Insbesondere die Partikeln im Abgas von Dieselmotoren gelten als gesundheitsschädigend und werden in der LRV als kanzerogen eingestuft.

Personenwagen mit Dieselmotor sind eine wichtige Quelle von Dieselmotoren in der Schweiz. In den letzten Jahren wurde ein starker Zuwachs beim Neukauf von Personenwagen mit Dieselmotoren verzeichnet. Bereits über 20% der Neufahrzeuge sind mit einem Dieselmotor ausgestattet.

Um diesem Zuwachs an Partikelemissionen aus Diesel-Personenwagen zu begegnen, hat die Kommission für Umwelt, Raumplanung und Energie des Nationalrates in einer Motion (UREK-N 03.3572) verlangt, dass der Partikelausstoss neu eingeführter Diesel-Personenwagen ab 2006 soweit begrenzt wird, wie es die beste verfügbare Technologie (zum Beispiel durch einen Partikelfilter) ermöglicht.² Nach heutigem Stand der Technik ist ein dem Dieselmotor nachgeschalteter Partikelfilter die einzige Möglichkeit, die Partikelemissionen drastisch zu reduzieren. Um dieser Forderung nach niedrigsten Emissionen nachzukommen, wurde ein Partikelanzahl-Grenzwert festgelegt. Aus messtechnischen Gründen und im Einklang mit Bestrebungen in der EU sollte zusätzlich zum gravimetrischen Grenzwert die Anzahl der emittierten Russpartikel limitiert werden. Zur Prüfung der UREK-Motion wurde ein Messverfahren zur Anzahlbestimmung der emittierten Russpartikeln von Diesel-Personenwagen entwickelt und die Grundlagen für eine künftige Verordnung zur Einführung eines anzahlbasierten Grenzwertes bei der Emission von Russpartikeln bei Diesel-Personenwagen erarbeitet. Der im Anhang beigelegte Verordnungsentwurf des BUWAL (Stand März 2004) lehnt sich an erste Ergebnisse der internationalen ECE-GRPE-Expertengruppe im «Particle Measurement Programme (PMP)» an, bei dem die Schweiz ebenfalls mitarbeitet.

2 Ziel der Untersuchungen

Gegenstand dieser Untersuchung war die experimentelle Erprobung des im Verordnungsentwurfes (siehe Anhang F) beschriebenen Messverfahrens zur Bestimmung der Partikelanzahl an Personenwagen mit Selbstzündungsmotoren. Ziel der Untersuchungen war es, durch Anwendung des Messverfahrens an mehreren Fahrzeugen die Praxisauglichkeit dieses Verfahrens zu beurteilen. Erkenntnisse zu folgenden Fragen sollten gewonnen werden:

- Anwendbarkeit und Robustheit des Verfahrens auf dem Prüfstand
- Wiederholbarkeit der Messungen am selben Ort
- Reproduzierbarkeit der Messungen an verschiedenen Prüfständen
- Plausibilität der Messergebnisse und Vergleich mit der gravimetrischen Filtermethode
- Emissionsniveau von heute erhältlichen Fahrzeugen mit Partikelfilter

Entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen soll der Verordnungsentwurf gegebenenfalls überarbeitet werden.

² Der Bundesrat hat am 4. März 2005 die Ablehnung dieser Motion wegen der Unvereinbarkeit einer Pflicht mit den internationalen Wirtschaftsverpflichtungen der Schweiz beantragt. Er hat sich jedoch bereit erklärt, einen finanziellen Anreiz zur Ausrüstung von Dieselpersonenwagen mit Partikelfiltern umzusetzen. Die Motion wurde anschliessend am 10. Mai 2005 von der UREK-N zurückgezogen.

3 Beschreibung des Testprogramms

3.1 Untersuchte Fahrzeuge

Im Rahmen der Untersuchung wurden Messungen an drei Dieselfahrzeugen und einem Benzinfahrzeug durchgeführt. Bei der Auswahl der Fahrzeuge wurde darauf geachtet, dass Messergebnisse von unterschiedlichen Technologien von Abgasnachbehandlungen gewonnen werden. Die untersuchten Systeme umfassten einen katalytisch beschichteten Partikelfilter (kontinuierliche Regeneration), einen Partikelfilter mit Fe additiviertem Treibstoff (periodische Regeneration) und einen katalytisch beschichteten Partikelfilter, der gleichzeitig auch als NO_x-Speicherkatalysator fungiert (DPNR). Bei dem Benzinfahrzeug handelte es sich um ein Motor-konzept mit Direkteinspritzung mit zeitweisem Magerbetrieb. Dieses Fahrzeug ist mit einem NO_x-Speicherkatalysator ausgestattet. Weitere technische Angaben der getesteten Fahrzeuge sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Alle Personenfahrzeuge erfüllen die EURO 4 Abgasnorm.

Marke	Toyota	Opel	VW	VW
Model	Avensis 2.0 D-Cat	Vectra Caravan 1.9 CDTI 16V	Passat Variant 2.0 TDI	Touran 1.6 FSI
Treibstoff	Diesel	Diesel	Diesel	Benzin
Einspritzung	direkt	direkt	direkt	direkt
Zylinder	4 Reihe	4 Reihe	4 Reihe	4 Reihe
Hubraum [cm ³]	1995	1910	1968	1598
Getriebe	M5	M6	M6	M6
Max. Leistung [kW]	85	110	100	85
bei Drehzahl [1/min]	3600	4000	4000	5800
Max Drehmoment [Nm]	280	315	335	155
bei Drehzahl [1/min]		2000	1900	4000
Abgasnachbehandlung	Katalytisch beschichteter Partikelfilter mit NO _x - Speicherung	Katalytisch beschichteter Partikelfilter	Partikelfilter mit Fe additi- viertem Treibstoff	NO _x - Speicher- katalysator
Leergewicht [kg]	1455	1605	1649	1585
Zulassung nach Abgasvorschrift	Euro 4	Euro 4	Euro 4	Euro 4

Tabelle 1 : Technische Daten der Testfahrzeuge

3.2 Treibstoff

Alle Dieselfahrzeuge wurden mit handelsüblichem schwefelarmen Treibstoff aus einer Lieferung gefahren. Auch das Benzinfahrzeug wurde mit handelsüblichem schwefelarmen Treibstoff betankt. Die Ergebnisse der chemischen Analyse des Diesel- und Benzintreibstoffes sind in Tabelle 2 aufgelistet, weitere Details in Anhang B. Die Neufahrzeuge Avensis, Vectra und Passat wurden mit dem Testtreibstoff für mindestens 3'000 km eingefahren. Das bereits eingefahrene Fahrzeug Touran wurde etwa 500 km mit dem Testtreibstoff konditioniert.

	Benzin	Diesel
Dichte bei 15°C [kg/m ³]	748.5	827.1
Viskosität bei 40°C [mm ² /s]	-	2.470
Dampfdruck bei 37.8°C [kPa]	62.1	-
Flammpunkt [°C]	-	71
Schwefel [mg/kg]	3	8
Olefine [Vol.%]	1.6	-
Aromate [Vol.%]	35.5	23.1
Benzol [Vol.%]	0.8	< 0.1
Sauerstoffgehalt [Vol.%]	1.7	-
Kohlenstoffgehalt [mass-%]	85.24	85.85
Wasserstoffgehalt [mass-%]	13.39	14.04
Heizwert [MJ/kg]	-	43.16
Research-Oktananzahl (ROZ)	97.5	-
Motor-Oktananzahl (MOZ)	87.7	-
Cetanzahl [-]	-	53.5

Tabelle 2: Treibstoffspezifikationen (Detaillierte Analyse der Treibstoffe im Anhang)

3.3 Messprogramm

Als Messzyklus wurde der europäische Fahrzyklus NEDC (New European Driving Cycle) gefahren (Abbildung 1). Der Fahrzyklus teilt sich in einen innerstädtischen Teil (ECE: 0 – 780s) und einen Überlandteil (EUDC: 781 – 1180s) auf. Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse beziehen sich - wenn nicht anders erwähnt - auf den Integralwert über den ganzen NEDC Zyklus.

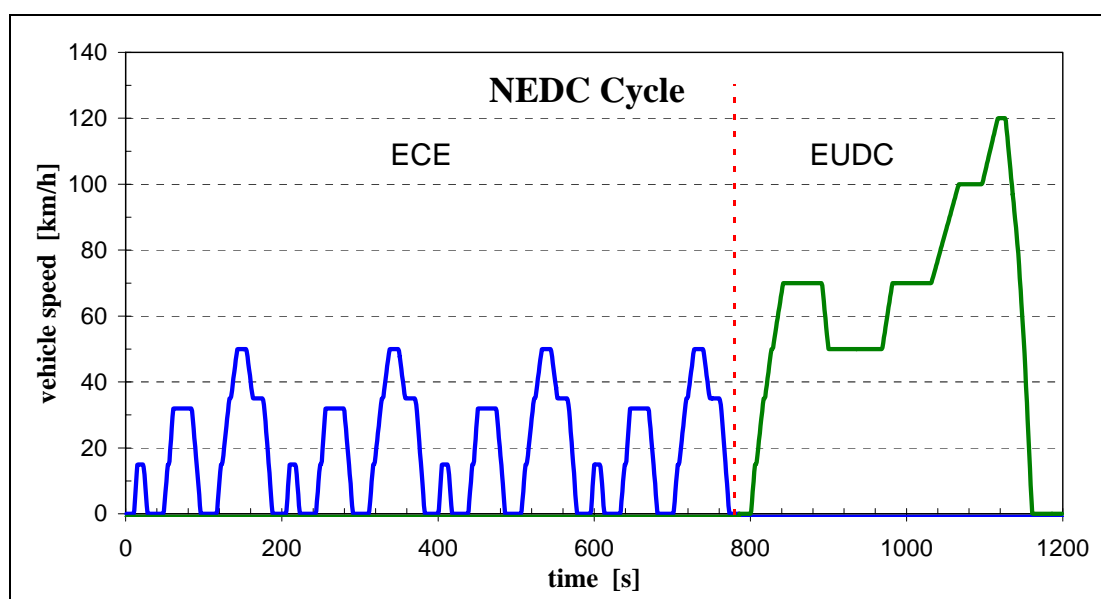


Abbildung 1: Testzyklus NEDC (New European Driving Cycle) aufgeteilt in ECE und EUDC

Vor jedem Zyklus wurde das Fahrzeug konditioniert. Dabei wurde während 15 Minuten eine konstante Geschwindigkeit von 80 km/h gefahren mit anschliessender Ruhezeit von mindestens 6 Stunden für das Fahrzeug und das Abgasprobenahmesystem. Zwischen den einzelnen NEDC-Tests sind in willkürlicher Folge auch andere Fahrzyklen gefahren worden. Die Ergebnisse dieser Tests sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes, da sie für ein anderes Projekt desselben Auftraggebers vorgenommen wurden. Die unsystematische Abfolge der Tests erlaubt jedoch einen Einblick in den Einfluss der Vorgeschichte zu den NEDC-Tests. Wie bereits beschrieben wurde vor jedem NEDC jedoch eine Konditionierung von 15 min vorgenommen.

4 Experimenteller Aufbau

4.1 Bestimmung der Partikelanzahl

Der Aufbau für die Partikelanzahlmessung erfolgte gemäss dem Entwurf «Verordnung über die Bestimmung der Partikelanzahl an Personenwagen mit Selbstzündungsmotor» vom März 2004 für das Messverfahren, dessen vollständiger Wortlaut sich im Anhang F befindet. Die Beschreibung des Messverfahrens zur Bestimmung der Partikelanzahl ist in der Verordnung detailliert beschrieben. Die wichtigsten Elemente der Messanordnung sind in Abbildung 2 dargestellt.

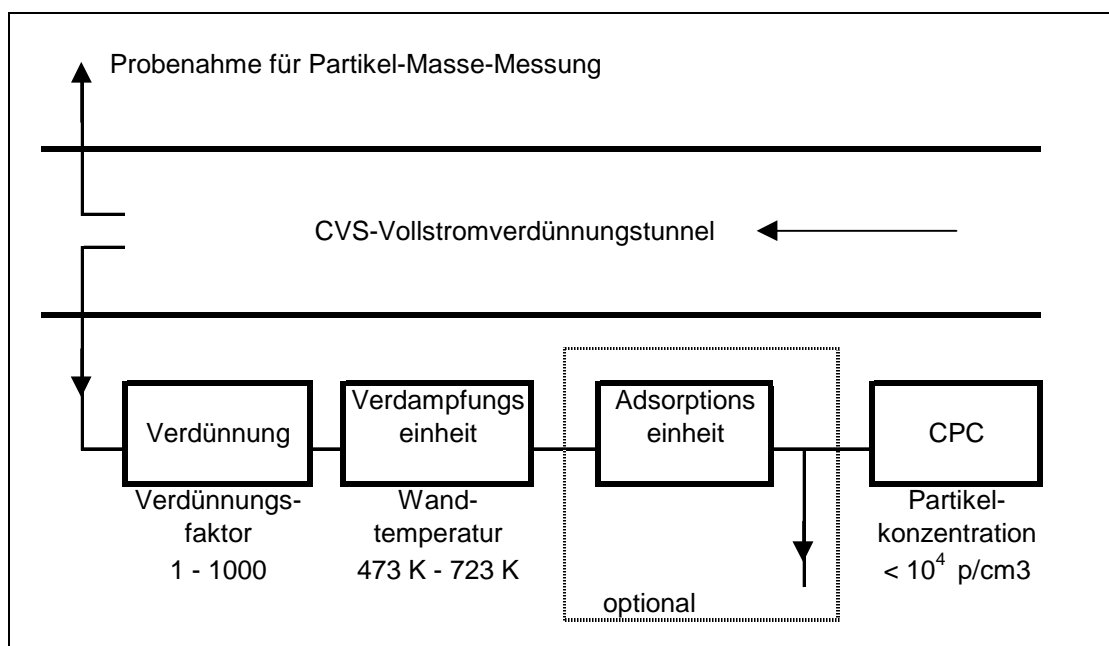


Abbildung 2: Aufbau für die Messung der Partikelanzahl gemäss Reglemententwurf

Die Verbindungsleitung zwischen Eintritt der Partikel in die Probenahmesonde (im CVS-Tunnel) und Eintritt in die Verdünnungseinheit hatte bei der verwendeten Messanordnung eine Länge von ca. 80 cm. Die Verbindungsleitung zwischen Eintritt der Partikel in die Probenahmesonde (im CVS-Tunnel) und Eintritt in den Partikelzähler hatte eine Länge von ca. 245 cm. Die berechnete Verweilzeit belief sich auf 8.6 s.

Probenahme

Die separate Probenahme für die Anzahlmessung erfolgte gemäss Verordnung mit einem einfachen gebogenen Rohr aus dem CVS-Vollstromverdünnungstunnel in unmittelbarer Nähe zur Sonde für die gravimetrische Partikelmessung.

Verdünnung

Der Probensonde schloss sich ein Verdünnungssystem an, das so ausgelegt wurde, dass vom Kondensationspartikelzähler (CPC) eine resultierende Konzentration von kleiner als 10^4 Partikel/cm³ gemessen wurde. Im Standardmessaufbau wurden zur Verdünnung des Aerosols Injektoren eingesetzt mit einem jeweiligen Verdünnungsfaktor von etwa 10. Das Prinzip von Injektoren ist in [Koch et al., 1988] detailliert beschrieben. Je nach Höhe der Partikelkonzentration wurden eine Stufe oder zwei hintereinander geschaltete Stufen verwendet (Palas GmbH; Dekati Ltd.) oder auf zusätzliche Verdünnung ganz verzichtet. Das Verdünnungssystem wurde bei Raumtemperatur betrieben, d.h. weder Stufen noch Verdünnungsluft wurden beheizt. Der Druckabfall über die Eingangsdüse wurde aufgezeichnet, um die genaue Verdünnungsrate durch den Vergleich mit im Vorfeld erstellten Kalibrierkurven zu bestimmen.

In einzelnen Experimenten wurde parallel zur Standardkonfiguration ein zusätzliches Messsystem mit einer Drehscheibenverdünnung verwendet (Matter Engineering AG). Die Einheit wurde auf eine Verdünnungsrate von 30 eingestellt und bei Raumtemperatur betrieben. Näheres zum Prinzip dieses Verdünnungsprinzips ist in [Hueglin et al., 1997] zu finden.

Verdampfungseinheit (Heater)

Nach der Verdünnungsstufe folgte eine Verdampfungseinheit (Heater) zur Entfernung von flüchtigen Partikelbestandteilen. Diese bestand aus einem Rohr (Länge: 50cm / Innendurchmesser: 2 cm), an dessen Aussenwand ein Heizdraht angelötet war. Es wurde eine Temperatur von 573 K (300 °C) eingestellt. Nähere Informationen zur Funktionsweise eines sogenannten Thermodesorbers sind in [Burtscher et al., 2001].

Partikelzählung

Zum Zählen der Partikeln wurden zwei verschiedene Modelle von Kondensationspartikelzähler verwendet. In der Standardkonfiguration wurden Geräte des Modells 3022A der Firma TSI (TSI Incorporated, USA) eingesetzt. In einzelnen Experimenten wurde auch das Modell 3010A derselben Firma verwendet. Hauptunterschiede zwischen den Modellen bestehen in der Zähleffizienz für sehr kleine Partikeln, in der Probenflussrate und in der Ansprechzeit. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Hauptmerkmale der verwendeten CPCs gemäss Spezifikation des Herstellers. Nähere Details zu den verschiedenen TSI-Modellen sind in [Sem 2002] beschrieben.

Die Funktionsweise des CPCs beruht auf dem Zählen der Partikeln mittels Streulichtpulsen in einem konstanten Probenfluss. Um eine ausreichende Streulichtintensität zu gewährleisten, werden die Partikeln zuvor durch einen übersättigten Alkoholdampf geleitet. Dadurch wachsen die Partikeln durch Kondensation auf mehrere Mikrometer an und können dann leicht detektiert werden.

Beim Modell 3010A kann die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfungs- und Kondensationsteil geändert werden, wodurch sich die Zähleffizienz für die kleinsten messbaren Partikeln ändert [Mertes et al., 1995]. Mit grösserer Temperaturdifferenz verschiebt sich die untere Messgrenze zu einer kleineren Partikelgrösse. Die vom Hersteller standardmässig eingestellte Temperaturdifferenz beträgt $\Delta T = 17^\circ\text{C}$, was einem d_{50} -Wert von etwa 10 nm entspricht. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zusätzlich auch Messungen mit $\Delta T = 9^\circ\text{C}$ durchgeführt. Dies ent-

spricht einem d_{50} -Wert von etwa 20 nm. Abbildung 3 stellt die vom Hersteller angegebenen Zähleffizienzkurven für verschiedene CPC-Modelle dar. Zusätzlich sind die Anforderungen gemäss CH-Verordnung und PMP-international angegeben. Zähleffizienz und Flussrate der verwendeten Partikelzähler wurden vorgängig (Juni 2004) durch METAS kalibriert (siehe Abschnitt 7.1 und Anhang C).

	CPC 3010	CPC 3022A
Hersteller	TSI	TSI
Minimalartikelgrösse (bei Default Einstellung)		
50% Zähleffizienz	10 nm	8 nm
90% Zähleffizienz	-	15 nm
Maximale Partikelgrösse [nm]	> 3000	> 3000
Flussrate durch Messkammer [l/min]	1.0 ± 0.015	0.3 ± 0.015
Konzentrationen [Partikel/cm ³]		
Einzelpartikelzählung, real-time	0.01 bis 10^4	0.001 bis 10^3
Einzelpartikelzählung, live-time	-	10^3 bis 10^4
Photometrischer Mode	-	10^4 bis $9.99 \cdot 10^6$
Koinzidenz bei $1 \cdot 10^4$ p/cm ³ [%]	< 10%	< 20%
Genauigkeit [%]	$\pm 10\%$ bis 10^4 cm ⁻³ -	$\pm 10\%$ bis $5 \cdot 10^5$ cm ⁻³
Ansprechzeit [s]	< 5	< 13
Lichtquelle	50 mW, 780 nm Laser	5 mW, 780 nm Laser
Ausleserate	1 Sekunde	1 Sekunde

Tabelle 3: Technische Angaben zu den verwendeten Partikelzählern

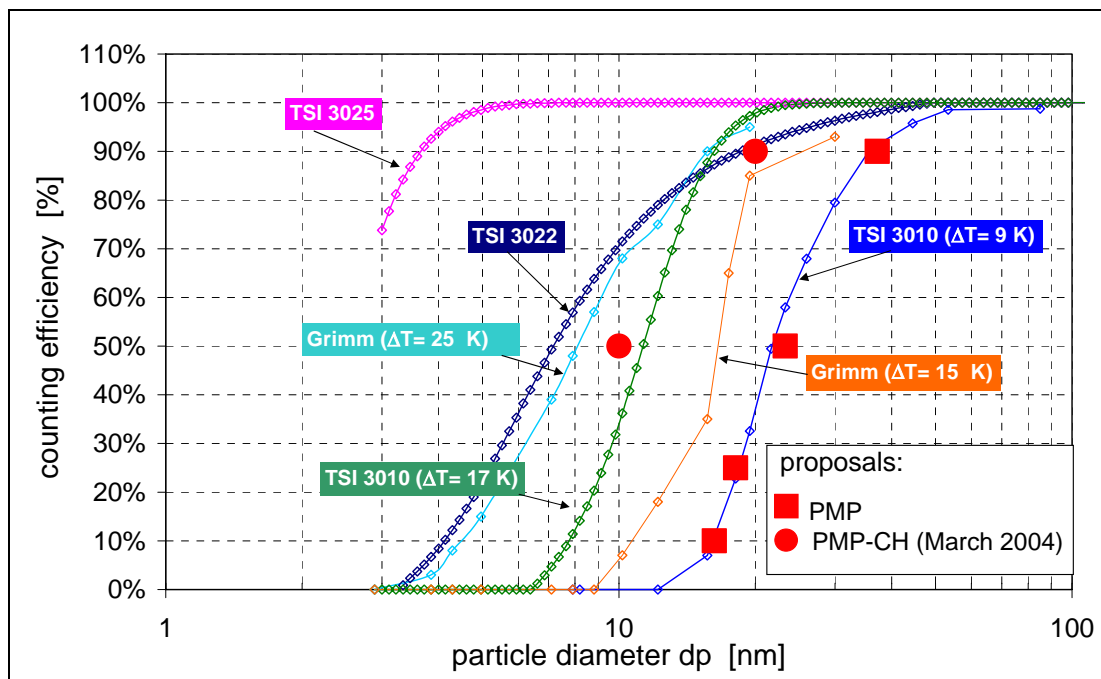


Abbildung 3: Zähl-effizienz verschiedener CPCs mit Angabe der jeweilig eingestellten Temperaturdifferenz ΔT , Quelle: TSI, Grimm

4.2 Gravimetrische Bestimmung der Partikelmasse

Die Bestimmung der Masse der emittierten Partikeln (PM) erfolgte gravimetrisch gemäss Reglement [70/220/EEC]. Das verdünnte Abgas wurde auf Teflon beschichteten Glasfaser-Filtern (Pallflex, T60A20) mit einer Flussrate von 50 NI/min gesammelt. Die Filter wurden vor und nach der Belegung während 16 bis 25 Stunden bei $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ und 50 % rel. Feuchtigkeit konditioniert. Die Partikelmasse wurde durch Wägung der Filter auf einer Waage (Mettler Toledo – MT5) bestimmt. Die Waage hat eine Ablesegenauigkeit von $1 \mu\text{g}$ und eine Messunsicherheit von $2.6 \mu\text{g}$ für den verwendeten Messbereich.

Die Filterbelegung war bei allen Fahrzeugen im Bereich von $30 \mu\text{g}$ und kleiner somit sehr tief. Dies hatte auf die Wiederholbarkeit der Einzelmessungen einen grossen Einfluss.

4.3 Messkonfigurationen

Standardkonfiguration

In Abbildung 4 ist die in dieser Untersuchung verwendete Standardkonfiguration mit Sonde, Verdünnungssystem, Verdampfungseinheit und Partikelzähler dargestellt. Der Kondensationspartikelzähler „vor“ der Verdampfungseinheit (CPC 3022A, S/N 553) ist gemäss Verordnung nicht vorgesehen und war aber während allen Messungen installiert, um die Wirksamkeit der Verdampfungseinheit (Heater) zu überprüfen. Die Anzahl der verwendeten Injektoren («ejector 1» und «ejector 2») wurde je nach Emissionsniveau des Fahrzeugs variiert, um den in der Verordnung geforderten Messbereich der Partikelzähler einzuhalten. In der Standardkonfiguration wurde der CPC 3022A (555) nach der Verdampfungseinheit (Heater) mit einem Fluss von $1.3 \text{ l}/\text{min}$ betrieben.

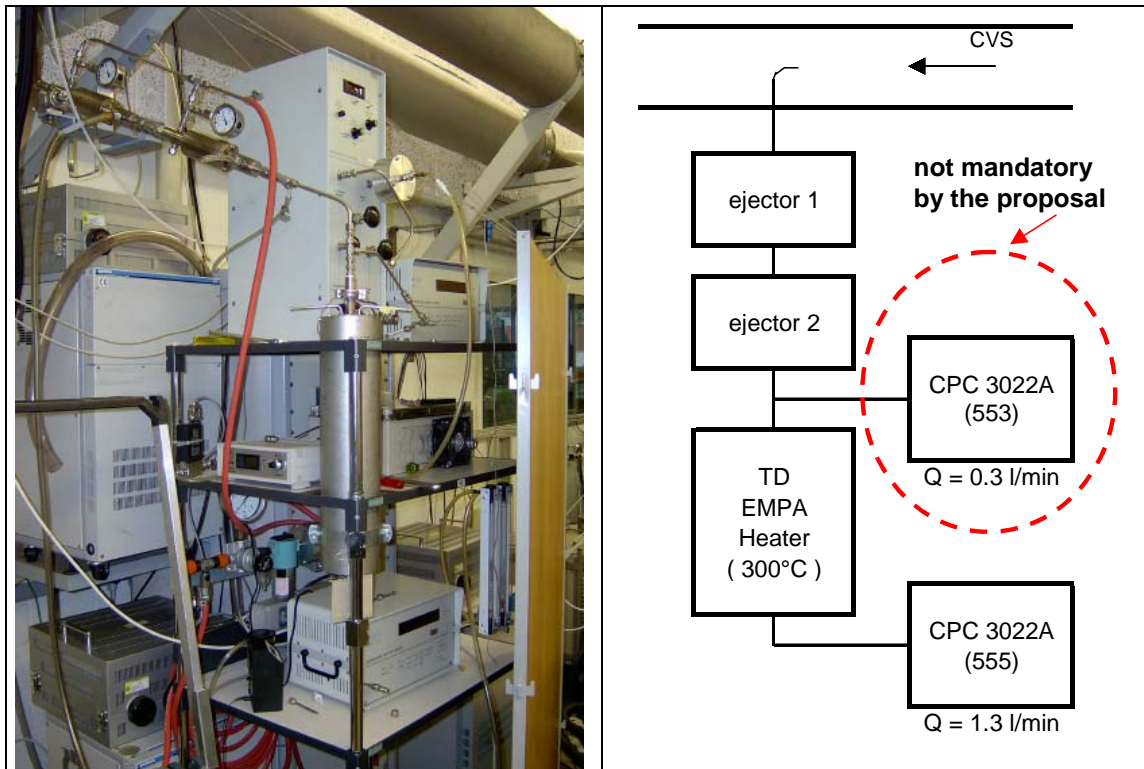


Abbildung 4 : Standardaufbau für die Partikelanzahlmessung

Messkonfiguration für Komponentenvergleich

Bei einigen Messungen wurde der Einfluss unterschiedlicher Modelle von Partikelzähler und Verdünnungseinheiten genauer untersucht. Für einen Vergleich der beiden CPC Modelle wurde bei manchen Messungen ein CPC 3010 (281) mit einem Fluss von 1 l/min nach der Verdampfungseinheit (Heater) parallel zum CPC 3022A (555) angebracht. In diesem Fall wurde der Fluss durch den CPC 3022A (555) auf 0.3 l/min umgestellt, um den Fluss von 1.3 l/min durch die Verdampfungseinheit (Heater) unverändert zu lassen. Für den Vergleich mit einem anderen Verdünnungssystem wurde parallel zur Standardkonfiguration eine zweite Messkonfiguration mit einer separaten Probenahme aufgebaut (siehe Abbildung 5). Jedes der beiden Systeme hatte eine eigene Sonde, welche auf gleicher Höhe wie die Probenahme für die Gravimetrie am Ende der CVS Anlage angebracht waren.

Die Aerosolprobe wurde bei diesem System mit einem Rotationsverdünner (Matter Engineering AG) verdünnt und nach einer baugleichen Verdampfungseinheit (Heater) auf zwei CPC 3010 der Firma TSI verteilt. Zur Kennzeichnung wurden die Geräte mit «CPC 3010 (175)» und «CPC 3010 (281)» benannt.

Auf die Messresultate zum Vergleich der beiden CPCs mit unterschiedlichen Einstellungen und der Verdünnungseinheiten wird in Abschnitt 6.1 eingegangen.

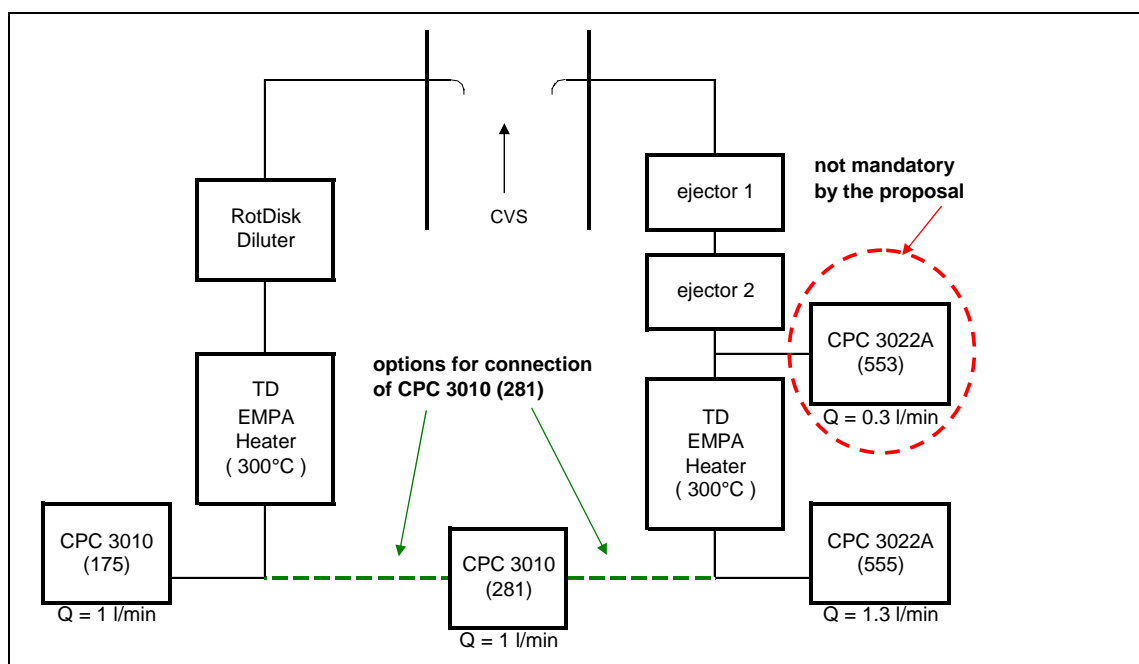


Abbildung 5 : Schema der beiden Messaufbauten

5 Ergebnisse der Fahrzeugmessungen

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Messungen für die einzelnen Fahrzeuge dargestellt. Die Partikelanzahlmessungen sind mit der Standardkonfiguration durchgeführt worden. Je nach Partikelkonzentration wurden zusätzliche Verdünnungsstufen (Injektoren) verwendet, um die maximale Anzahlkonzentration im CPC gemäss Vorschrift nicht zu überschreiten. Die Art der Verdünnung und der effektive Verdünnungsfaktor sind zusammen mit dem effektiven CVS-Volumen über den gesamten NEDC jeweils in den Diagrammen angegeben. Der Integralwert wurde durch Aufsummieren der Sekundenwerte über den ganzen gesetzlichen europäischen Fahrzyklus (NEDC) gemäss folgender Formel bestimmt.

$$TPN = \frac{V_{mix}}{d} \times DF \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=t1}^{tn} C_{CPCi}$$

Hierbei bedeuten:

- TPN: Partikelanzahl, ausgedrückt in Partikel/km
- V_{mix} : Volumen der verdünnten Abgase, ausgedrückt in L/Prüfung und korrigiert auf Normaltemperatur und Normaldruck (273.15 K; 101.325 kPa).
- C_{CPCi} : gemessene Partikelanzahlkonzentration des CPC im Zeitintervall i bei Normalbedingungen (273.15 K; 101.325 kPa).
- DF: Verdünnungsfaktor der Verdünnungsstufe.
- d : dem Fahrzyklus entsprechende Strecke
- $t1...tn$: Prüfzeit aufgeteilt in n Sekundenintervalle
- n : Anzahl der Messwerte

Neben den Ergebnissen für die Partikelanzahl werden auch diejenigen der Partikelmasse und der gasförmigen Schadstoffkomponenten gezeigt. Bei allen Fahrzeugen erfolgten zwischen den einzelnen hier dargestellten NEDC Messungen zusätzliche Tests mit anderen Fahrzyklen.

5.1 Toyota Avensis (Diesel)

In Abbildung 6 sind die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen für den Toyota Avensis dargestellt, dessen Dieselmotor ein katalytisch beschichteter Partikelfilter mit NO_x-Speicherung (DPNR) nachgeschaltet ist. Die mittlere Konzentration der sechs Wiederholungsmessungen liegt bei etwa 10¹² Partikel/km mit einer Standardabweichung von etwa 20% zwischen den einzelnen Zyklen. Auf Grund der relativ hohen Emissionen wurde das Aerosol nach dem CVS-Tunnel um einen Faktor 100 zusätzlich verdünnt. Der waagerechte Balken repräsentiert den vorgeschlagenen Grenzwert von 10¹¹ Partikel/km, der für dieses Fahrzeug klar überschritten wird.

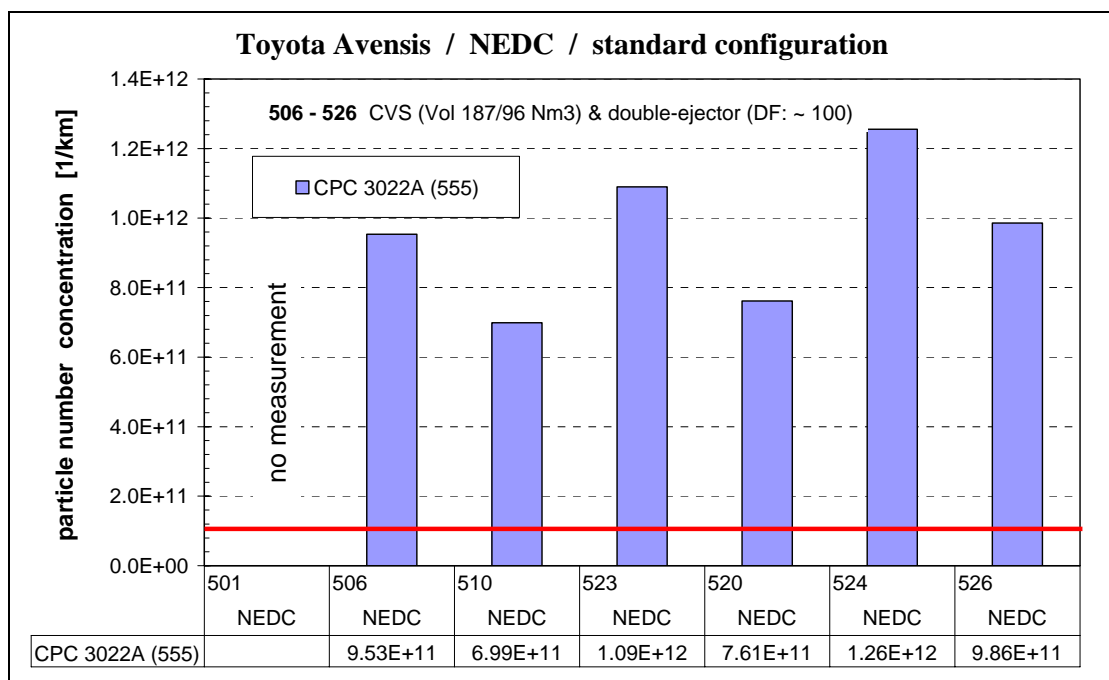


Abbildung 6: Partikelanzahlkonzentrationen für Toyota Avensis, Grenzwert im Verordnungsentwurf: 10¹¹ Partikel/km

Ein Einfluss durch die Vorgeschichte für den jeweiligen Test, aufgelistet in Tabelle 4, konnte nicht festgestellt werden. Das Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach der Verdampfungseinheit wurde aus den Ergebnissen der zeitgleichen CPC-Messungen ("CPC 3022A (555)" / "CPC 3022A (553)") an den entsprechenden Orten bestimmt. Abbildung 7 (unten rechts) zeigt einen konstanten Verlauf mit einem Wert von etwa 0.8, was auf einen unveränderten Feststoffanteil der Partikeln über die Tests hindeutet. Da der Penetrationsgrad der Verdampfungseinheit etwa 90% für Festpartikeln beträgt, kann von einem Anteil von flüchtigen Partikeln von etwa 10% ausgegangen werden, der über die Messreihe sehr konstant blieb, was auch auf eine stabile Funktionstüchtigkeit der Verdampfungseinheit hindeutet.

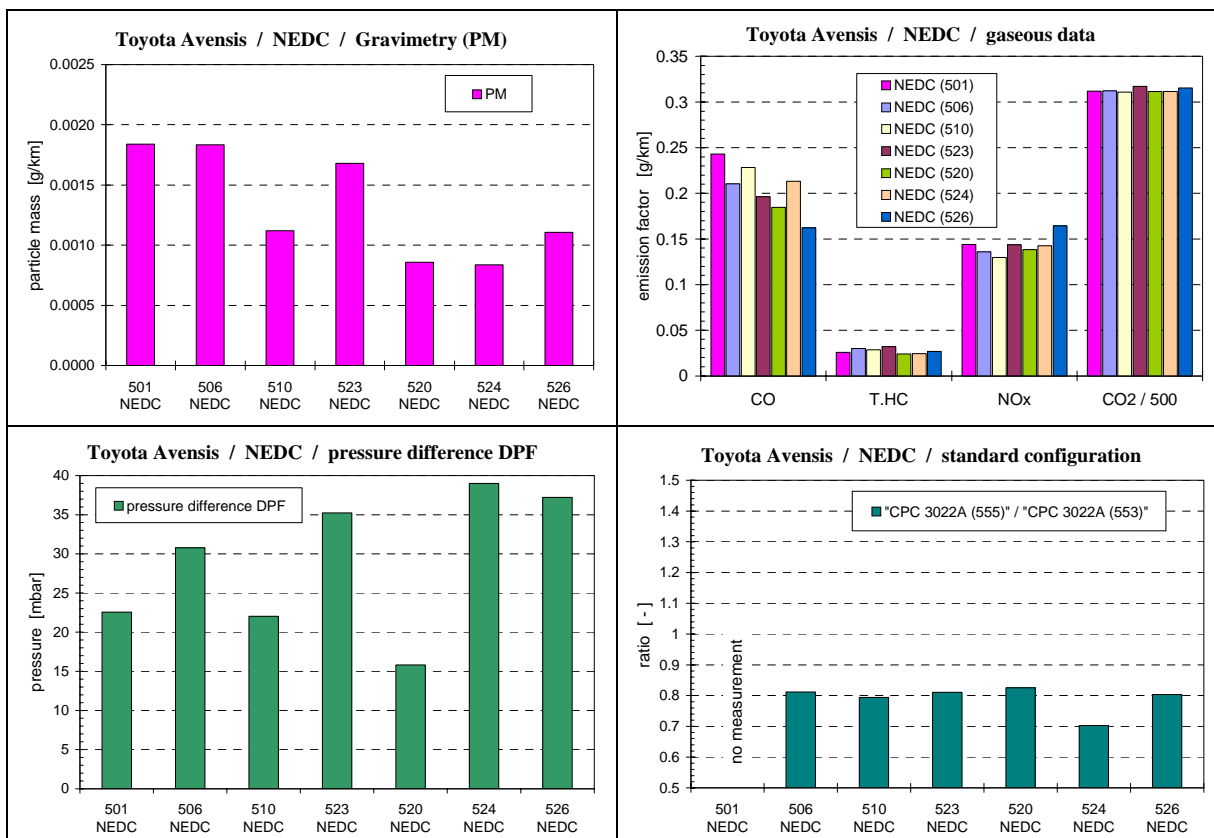


Abbildung 7: Messergebnisse für Toyota Avensis gemittelt jeweils über die einzelnen Testzyklen
 OL: Emission der Partikelmasse
 OR: Emission der gasförmigen Komponenten
 UL: Druckdifferenz über DPF
 UR: Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit Messungen

Test No	501	506	510	523	520	524	526
Zuvor gefahrene Zyklen	NEDC Konst. (50, 80 km/h 20 min)	BAB CADC Konst. (versch. Lasten 1 h)	BAB CADC Konst. (80, 120 km/h, 2 h)	IUF15 Konst. (50 km/h, 2 h)	BAB 2xCADC IUF15 CADC Konst. (120 km/h 2.5 h)	BAB	Konst. (80 km/h, 2 h)
	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.

Tabelle 4: Vorgeschichte der einzelnen Testfahrten für den Toyota Avensis

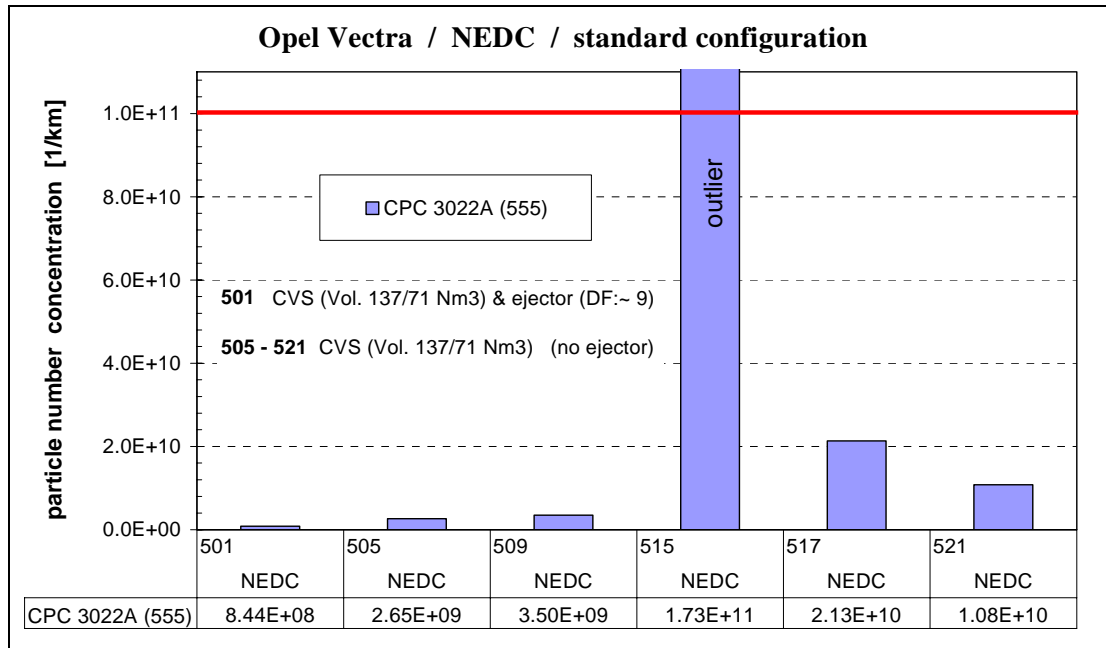


Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentrationen für Opel Vectra, Grenzwert im Verordnungsentwurf: 10^{11} Partikel/km

5.2 Opel Vectra (Diesel)

Abbildung 8 zeigt die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen für den Opel Vectra, der mit einem katalytisch beschichteten Partikelfilter bestückt ist. Die Emissionen liegen mit Ausnahme einer Messung deutlich unter dem vorgeschlagenen Grenzwert von 10^{11} Partikel/km, zeigen jedoch grosse Schwankungen. Die Messung «NEDC 515» zeigt eine deutlich höhere Partikelkonzentration, die über zwei Grössenordnungen über der tiefsten gemessenen Konzentration liegt. Wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist, wurde vor Test 515 das Fahrzeug für zwei Stunden mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h und anschliessend 6 min bei Vollast betrieben, um eine Filterregeneration zu erzwingen. Dem entsprechend wurde für Messung 515 der niedrigste Druckabfall über den Filter aufgezeichnet, was auf einen frischregenerierten Filter schliessen lässt (Abbildung 9). Die besondere Situation in Test 515 schlägt sich dagegen nicht in der gravimetrisch bestimmten Partikelmasse nieder (Abbildung 8). Die Unterschiede für die Partikelanzahl zwischen den einzelnen Testfahrten sind auch in den zeitaufgelösten Ergebnissen zu erkennen. Siehe Abbildung 45. Vor allem hohe Konzentrationen in der Anfangsphase des Zyklus verursachen die grossen Diskrepanzen, während nach etwa 5-7 Minuten sich Niveaus in einigen Fällen angleichen. Nur bei den Tests 515 und 517 ist ein klarer Zusammenhang zwischen Partikelemission und Fahrzustand über den ganzen Zyklus erkennbar. Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Russchicht im Filter und vor allem auf der Filteroberfläche erheblich zur Filtereffizienz beiträgt. Die in Abbildung 9 (unten rechts) dargestellten Verhältnisse der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit für die einzelnen Tests sind nicht sehr aussagekräftig, da die vom CPC gemessene Rohkonzentration grösstenteils in der Grössenordnung von 1 cm^{-3} waren und daher kleine Abweichungen zu grossen Werten führen können.

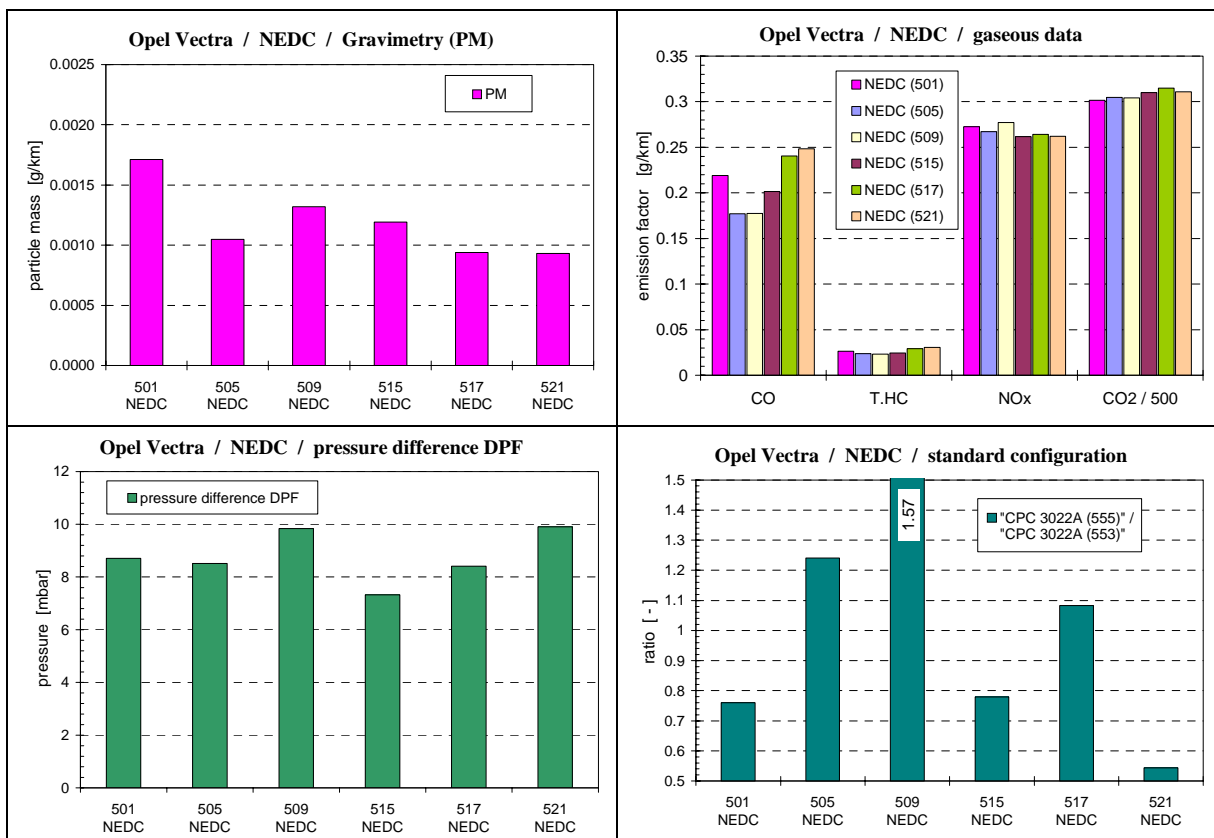


Abbildung 9: Messergebnisse für Opel Vectra gemittelt jeweils über die einzelnen Testzyklen
 OL: Emission der Partikelmasse
 OR: Emission der gasförmigen Komponenten
 UL: Druckdifferenz über DPF
 UR: Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit Messungen

Test No	501	505	509	515	517	521
Zuvor gefahrene Zyklen	NEDC	BAB CADC	BAB CADC Konst. (versch. Lasten 1.5 h)	BAB CADC Konst. (80 km/h 2.5 h) IUFC15 Konst. (120 km/h 2 h & Volllast 6 min)	Konst. (50 km/h 3 h)	Konst. (50 km/h 1 h & 80 km/h mit Last 1 h)
	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.

Tabelle 5: Vorgeschichte der einzelnen Testfahrten für den Opel Vectra

5.3 VW Passat (Diesel)

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse für den VW Passat dargestellt. Dieses Fahrzeug besitzt einen Partikelfilter, der mit Hilfe eines Eisenadditivs im Kraftstoff periodisch regeneriert wird. Die Messungen zeigen eine mittlere Konzentration im Bereich von 10^{11} Partikel/km. Jedoch ist auch hier eine grosse Variation von $4 \cdot 10^{10}$ bis $1 \cdot 10^{12}$ Partikel/km zu beobachten.

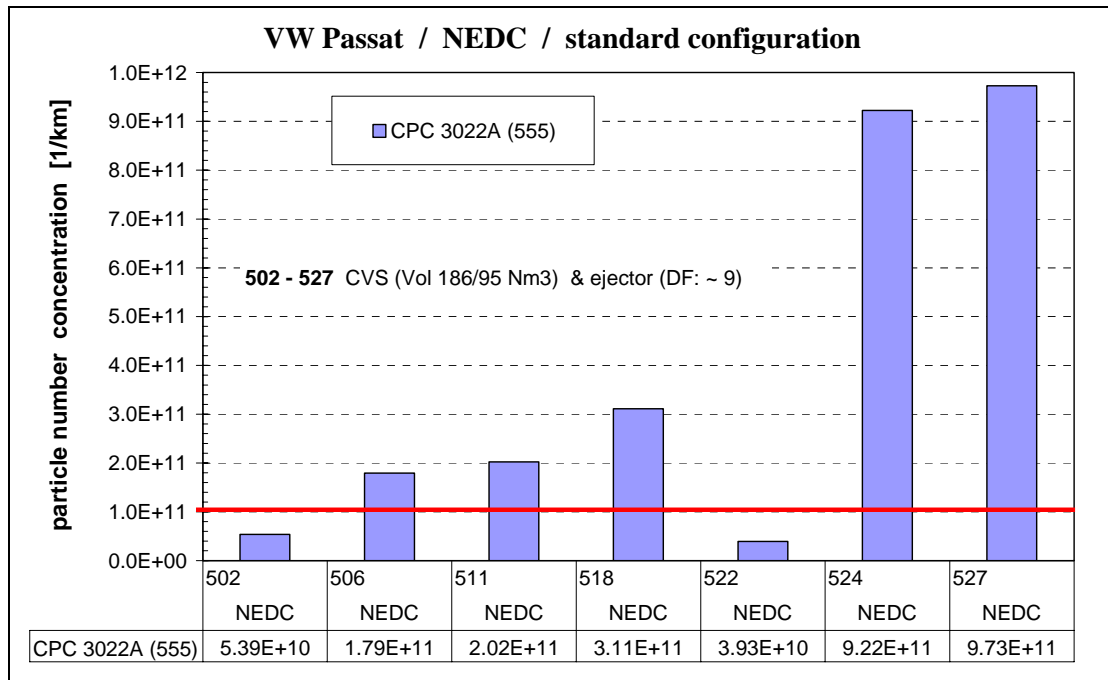


Abbildung 10: Partikelanzahlkonzentrationen für VW Passat, Grenzwert im Verordnungsentwurf: 10^{11} Partikel/km

Die grossen Schwankungen werden auch in diesem Fall nicht durch die Ergebnisse für die Partikelmasse oder den gasförmigen Komponenten widerspiegelt (Abbildung 11). Ein Vergleich mit den Daten für den Druckabfall über den Partikelfilter zeigt zumindest tendenziell einen inversen Verlauf: Ein hoher Druckabfall korrespondiert mit einer niedrigeren Partikelemission und umgekehrt. Dies lässt einen Einfluss der Filterbeladung auf die Emissionen vermuten. Aus Tabelle 6 ist ersichtlich, dass vor den Tests 524 und 527 längere Konstantfahrten mit erhöhter Last (volle Zuladung, 6% Steigung) durchgeführt wurden. Die Temperaturen vor Filter stiegen dabei auf 400 °C an und es konnte aufgrund des Temperatur- und Druckverlaufs auf eine Regeneration des Filters geschlossen werden. Die Tests 524 und 527 wurden somit mit jeweils frisch regeneriertem Filter gefahren, was auch die niedrigeren Druckabfälle zeigen.

Das Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit, dargestellt in Abbildung 11 (unten rechts) zeigt beim VW Passat mit etwa 0.85 einen konstanten Verlauf über die Messreihe, was auf einen unveränderten Feststoffanteil der Partikeln über die Tests hindeutet und auch auf keine Sättigungserscheinungen der Verdampfungseinheit hinweist.

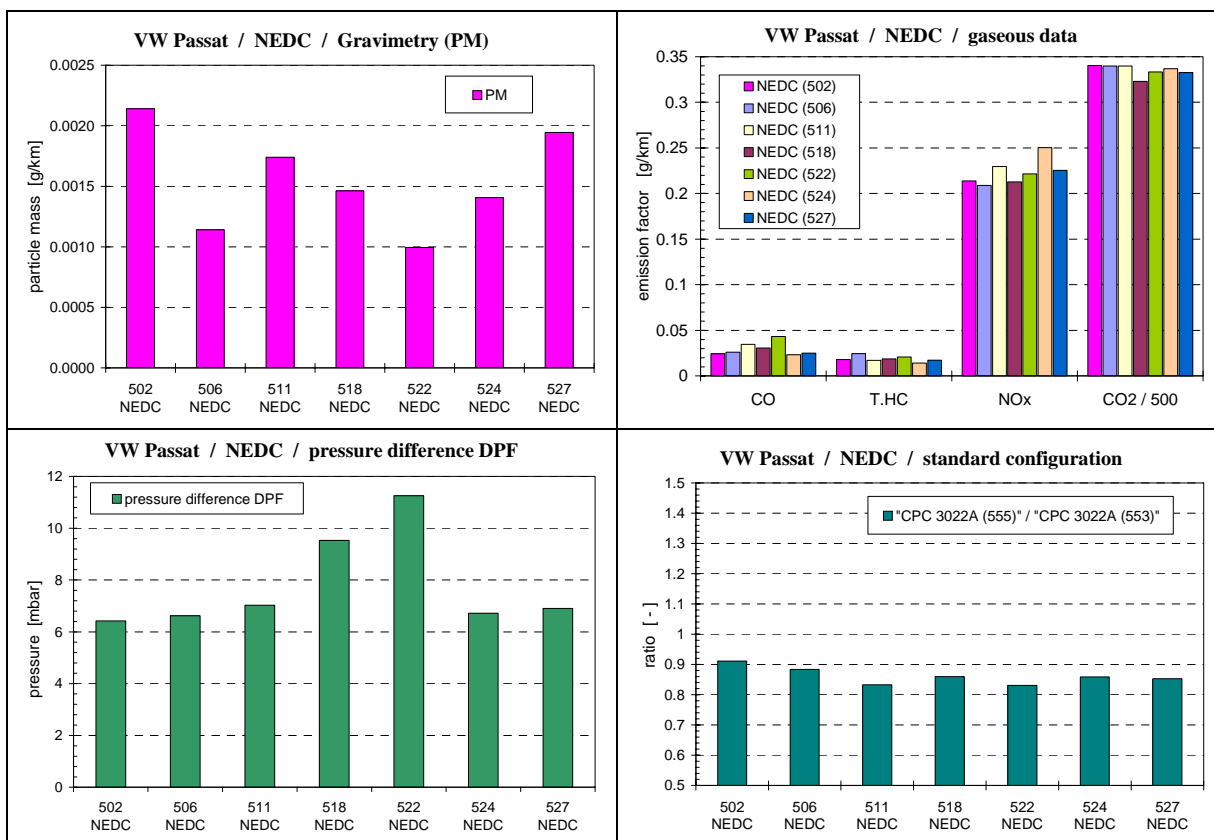


Abbildung 11: Messergebnisse für VW Passat gemittelt jeweils über die einzelnen Testzyklen
 OL: Emission der Partikelmasse
 OR: Emission der gasförmigen Komponenten
 UL: Druckdifferenz über DPF
 UR: Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit Messungen

Test No	502	506	511	518	522	524	527
Zuvor gefahrene Zyklen	NEDC	BAB CADC	BAB CADC Konst. (versch. Lasten 1.5 h)	BAB CADC Konst. (80 km/h 3 h) IUF15 Konst. (120 km/h 3 h)	Konst. (50 km/h 3 h)	Konst. (80 km/h mit Last 1.5 h)	Konst. (80 km/h mit Last 2.5 h)
	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.

Tabelle 6: Vorgeschichte der einzelnen Testfahrten für den VW Passat

Zusätzliche Messungen

Aufgrund des Befundes, dass die Vorgeschichte über die Konditionierung hinaus einen Einfluss auf die Partikelanzahlemission hat, wurden am Beispiel des VW Passat weitere Messungen zur Wirksamkeit der Konditionierung durchgeführt. In Abweichung zu der ersten Messreihe wurde nun zwischen den ersten fünf NEDC-Zyklen keine anderen Zyklen gefahren, sondern lediglich das Fahrzeug mit drei EUDC-Fahrzyklen reglementkonform konditioniert. In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der zusätzlichen Messungen dargestellt. Der Mittelwert der ersten 5 Messungen beträgt $4.2 \cdot 10^{10}$ Partikel/km. Vor der Messung 546 wurde 40 min mit Last gefahren und nach dem Abkühlen gemessen, bei Messung 551 das Gleiche, aber mit Konditionierung. Beide Messungen ergaben stark erhöhte Partikelkonzentrationen, was die Ergebnisse der ersten Messreihe bestätigt und zeigt, dass die Konditionierung unzureichend ist, um vorangegangene Fahrten zu kompensieren.

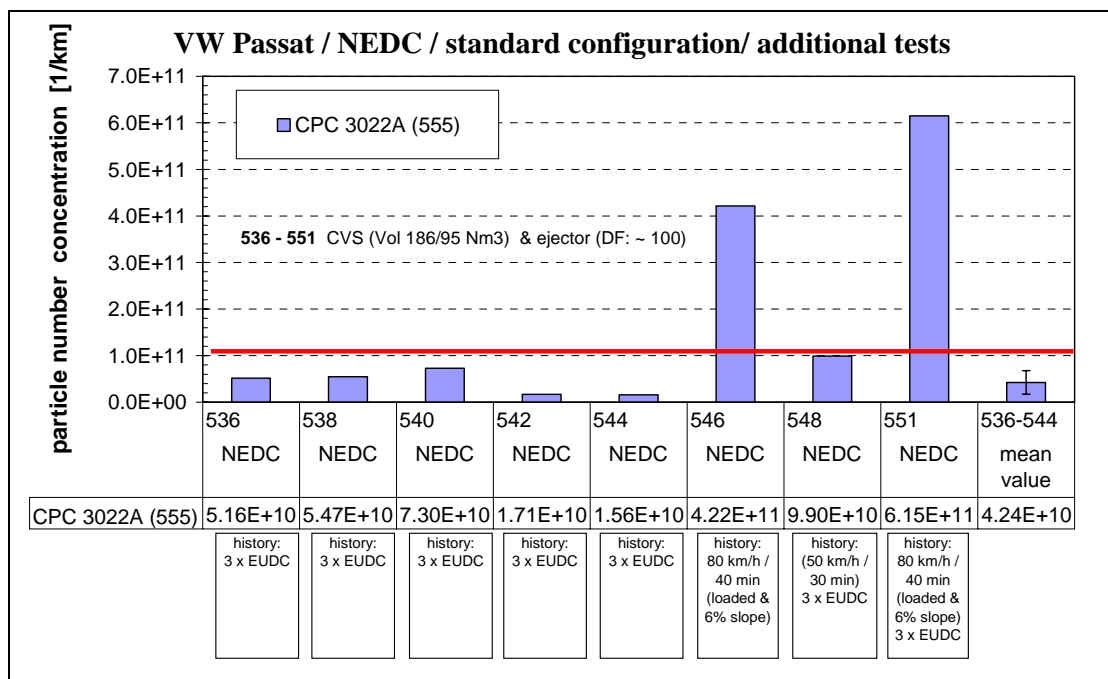


Abbildung 12: Partikelanzahlkonzentrationen für VW Passat, Grenzwert im Verordnungsentwurf: 10^{11} Partikel/km

Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Vorgeschichten keinen erkennbaren Einfluss auf die Partikelmasse haben. Dagegen ist wie in der ersten Messreihe ein klarer Zusammenhang von Vorgeschichte, Druckabfall über Filter und Partikelanzahl zu erkennen. Damit erhärtet sich die Vermutung, dass die Filterbelegung einen Einfluss auf die Partikelemission hat.

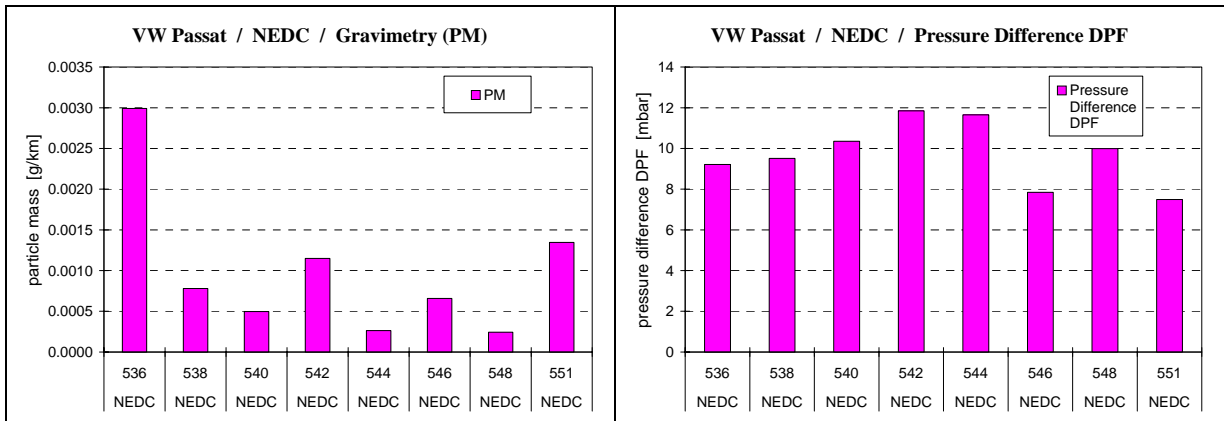


Abbildung 13: Messergebnisse für VW Passat gemittelt jeweils über die einzelnen Testzyklen
 L: Emission der Partikelmasse
 R: Druckabfall über DPF

5.4 VW Touran (Benzin)

Beim VW Touran handelt es sich um einen Ottomotor mit Fremdzündung und Direkteinspritzung. Dieses Fahrzeug würde also der hier untersuchten Verordnung nicht unterliegen. Doch ist seit längerem bekannt, dass Benziner mit Direkteinspritzung gegenüber Benziner mit konventioneller Vormischung erhöhte Emissionen aufweisen [z.B. Mohr et al., 2000]. Um die Emission einordnen zu können, wurde ein Fahrzeug mit einem solchen Konzept in die Untersuchungen aufgenommen. Bei bestimmten Fahrzuständen, vorwiegend im niedrigen und mittleren Lastbereich, wechselt die Motorsteuerung von einer stöchiometrischen Verbrennung zu einer mageren Verbrennung. Das Fahrzeug ist mit einem NO_x-Speicherkatalysator ausgerüstet. Aus den in Abbildung 14 dargestellten Messergebnissen für die Partikelanzahlkonzentration können zwei Niveaus abgelesen werden: Die ersten vier Messungen «NEDC 501» bis «NEDC 507» zeigen eine Anzahlkonzentration von etwa $1.3 \cdot 10^{12}$ Partikel/km mit einer guten Wiederholbarkeit (Standardabweichung etwa 8%). Für die restlichen drei Messungen resultiert eine etwa dreimal höhere Konzentration mit einer Standardabweichung von etwa 14%. Der Sprung in den Emissionen nach dem vierten Test ist durch das Fahrzeug selbst verursacht, was aus den Werten für die CO-Emissionen und den Druckabfall hervorgeht (Abbildung 15). Der Unterschied ist durch unterschiedliche Betriebsweisen des Motors zu erklären, die jedoch nicht bewusst eingestellt wurden. Die Auswertung des zeitaufgelösten CO₂-Signals ergab, dass der Motor während den ersten vier Tests ausschliesslich im stöchiometrischen Mode arbeitete, während in den darauf folgenden drei Tests kurze Phasen (insgesamt etwa 240 s) mit magerem Betrieb zu beobachten sind. In Abbildung 16 ist der CO₂-Verlauf beispielhaft für jeweils einen Zyklus dargestellt. Die Phasen mit Magerbetrieb sind gekennzeichnet. Es ist bekannt, dass in der Regel durch den mageren Betrieb höhere Partikelemissionen verursacht werden als im stöchiometrischen Betrieb [z.B. Mohr et al., 2002]. Aus den Werten für die gravimetrisch bestimmte Partikelmasse sind die unterschiedlichen Betriebsmodi nicht abzulesen, da diese Werte eine zu grosse Streuung aufweisen.

Das Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit, dargestellt in Abbildung 15 (unten rechts) zeigt für die Messungen mit dem VW Touran einen sehr stabilen Verlauf. Dabei entspricht der Wert von 0.9 dem Penetrationsgrad der Verdampfungseinheit für Festpartikeln. Das heisst, dass das Proben aerosol aus dem CVS-Tunnel keinen nennenswerten Anteil an flüchtigen Partikeln enthielt.

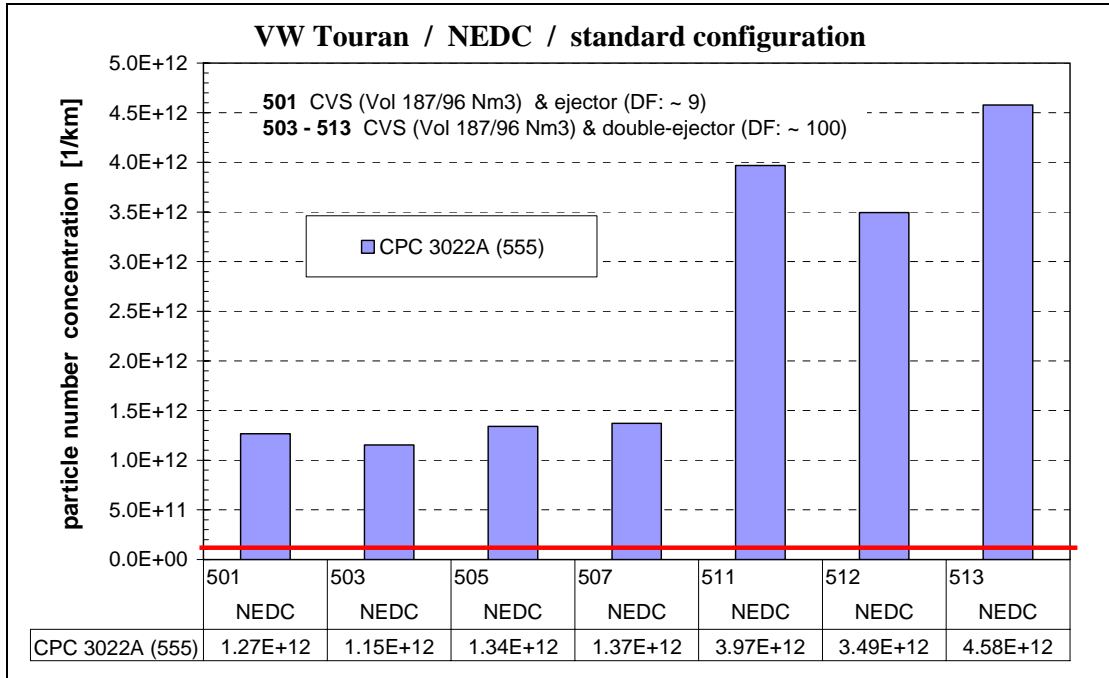


Abbildung 14: Partikelanzahlkonzentrationen für VW Touran, Grenzwert im Verordnungsentwurf für Dieselfahrzeuge: 10^{11} Partikel/km

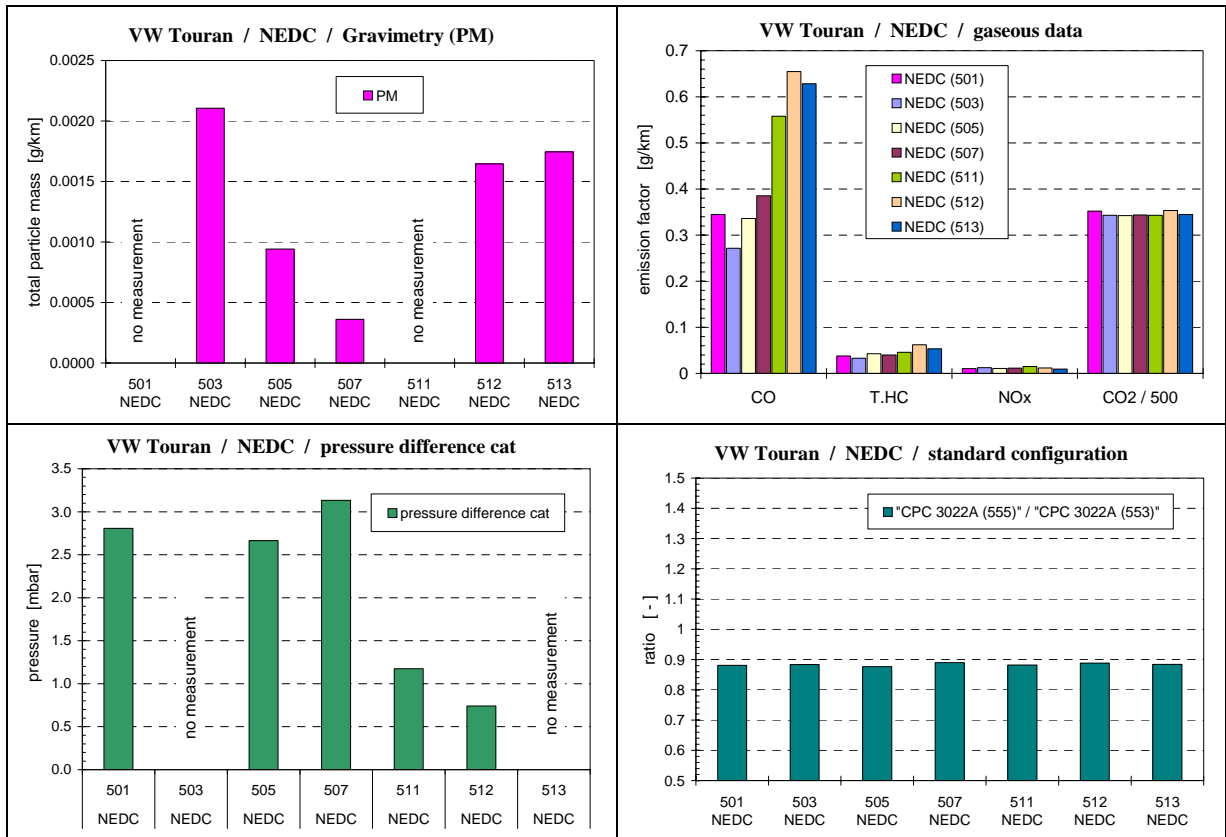
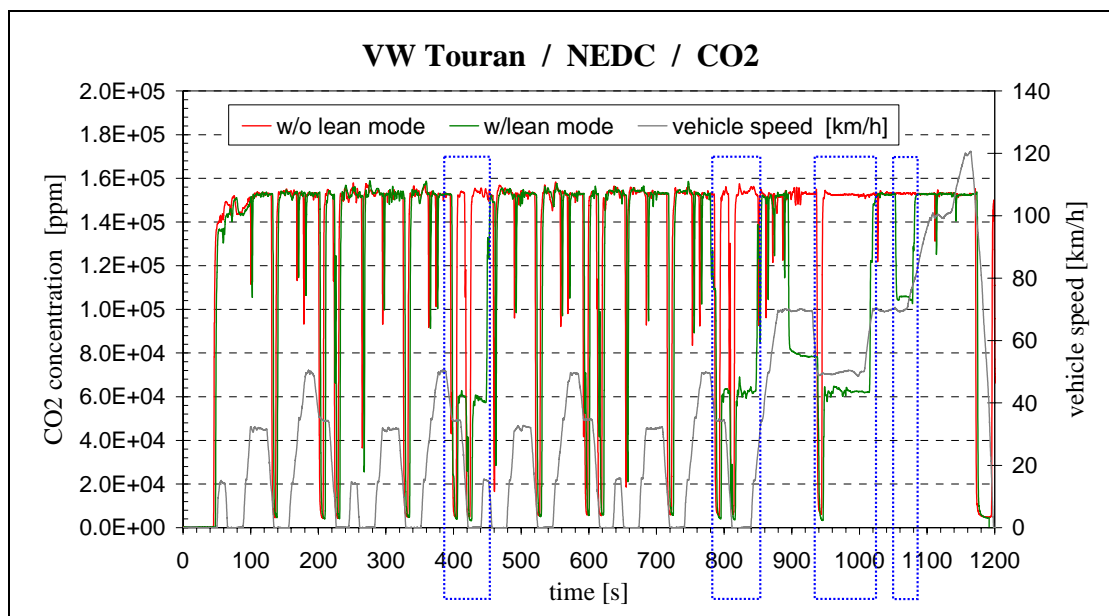


Abbildung 15: Messergebnisse für VW Touran gemittelt jeweils über die einzelnen Testzyklen
 OL: Emission der Partikelmasse; OR: Emission der gasförmigen Komponenten
 UL: Druckdifferenz über NO_x-Speicherkatalysator; UR: Verhältnis der Anzahlkonzentration vor und nach Verdampfungseinheit Messungen

Test No	501	503	505	507	511	512	513
Zuvor gefahrene Zyklen	NEDC	BAB CADC	BAB CADC	BAB CADC	IUF15 Konst. (versch. Lasten 90 min)	-	-
	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.	cond.

Tabelle 7: Vorgeschichte der einzelnen Testfahrten für den VW Touran

Abbildung 16: Zeitverlauf der CO₂-Konzentration für den VW Touran

5.5 Übersicht Fahrzeuge

Eine Übersicht der gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen für die untersuchten Fahrzeuge ist in Abbildung 17 in linearer und logarithmischer Darstellung gezeigt. Die Werte entsprechen dem Mittelwert für alle Messungen pro Fahrzeug, d.h. einschliesslich Messungen unmittelbar nach einer Filterregeneration. Um das Emissionsniveau einordnen zu können, ist zusätzlich auch die Einzelmessung eines Dieselfahrzeugs ohne Partikelfilter («VW Touran TDI») hinzugefügt, dass mit demselben Messsystem im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurde. Wie aus Abbildung 8, Abbildung 10 und Abbildung 12 ersichtlich ist, würde der Opel Vectra und der VW Passat in den meisten den vorgeschlagenen Grenzwert von 10^{11} Partikel/km erfüllen. Grenzwertüberschreitungen treten vor allem bei Tests mit frisch regeneriertem Filter auf. Die häufigere Regeneration beim Passat, die durch hohe Lasten in Zwischenfahrten provoziert wurde, erklärt auch den höheren Mittelwert in Abbildung 17 gegenüber dem Vectra. Dennoch ist für alle Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter unabhängig vom Filterzustand ein deutlicher Unterschied von mindestens Faktor 50 zum Dieselfahrzeug ohne Partikelfilter vorhanden und auch das Benzinfahrzeug mit Direkteinspritzung hat höhere Emissionen. Die Zeitverläufe der Partikelanzahlmessungen pro Fahrzeug sind im Anhang D dargestellt.

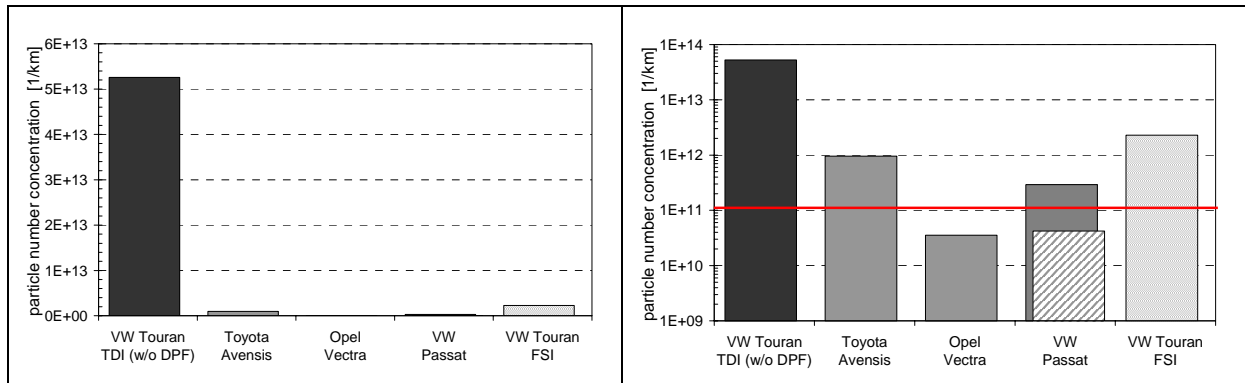


Abbildung 17: Partikelanzahl für die Testfahrzeuge über den NEDC, Mittelwert über alle Messungen in linearer (links) und logarithmischer Darstellung (rechts). Die Zusatzmessungen (536-542) mit dem VW Passat sind separat dargestellt. VW Touran FSI: Benziner mit Direkteinspritzung.

Abbildung 18 zeigt eine Übersicht für die gravimetrischen Filtermessungen der Partikelmasse. Für alle Fahrzeuge liegt die gemessene Partikelmassenemission bei etwa 1.5 mg/km. Der Unterschied zwischen den Fahrzeugen beträgt weniger als Faktor 2, während er bei der Anzahlmessung bis zu Faktor 300 ist. Dieses Ergebnis ist ein klares Indiz, dass die Messwerte von der gravimetrischen Filtermethode unter der Nachweisgrenze lagen und im Wesentlichen der Untergrund gemessen wurde. Dieses Ergebnis ist nicht erstaunlich, da alle Filterbelegungen im Bereich von 30 μg und kleiner waren.

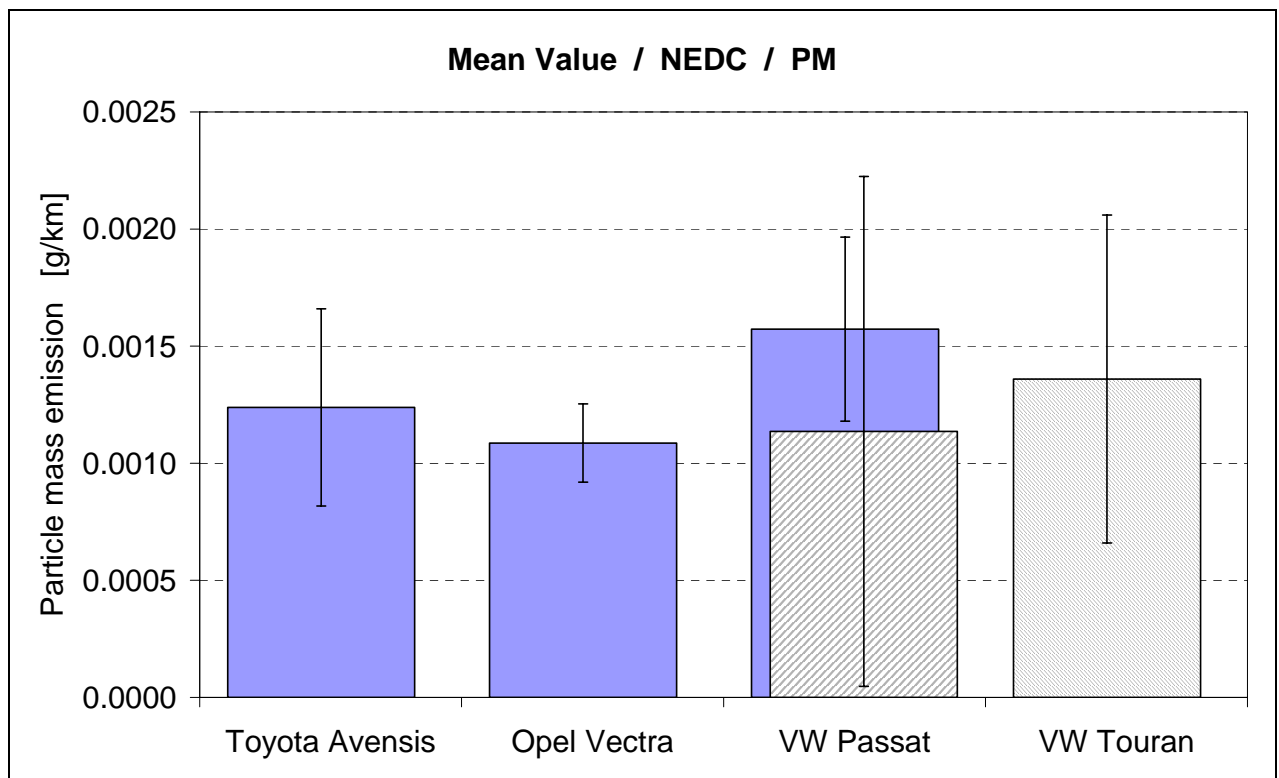


Abbildung 18: Partikelmasse für die Testfahrzeuge über den NEDC, Mittelwert über alle Messungen. Die Zusatzmessungen (536-542) mit dem VW Passat sind separat dargestellt. VW Touran FSI: Benziner mit Direkteinspritzung.

5.6 Wiederholbarkeit der Partikelanzahlmessung

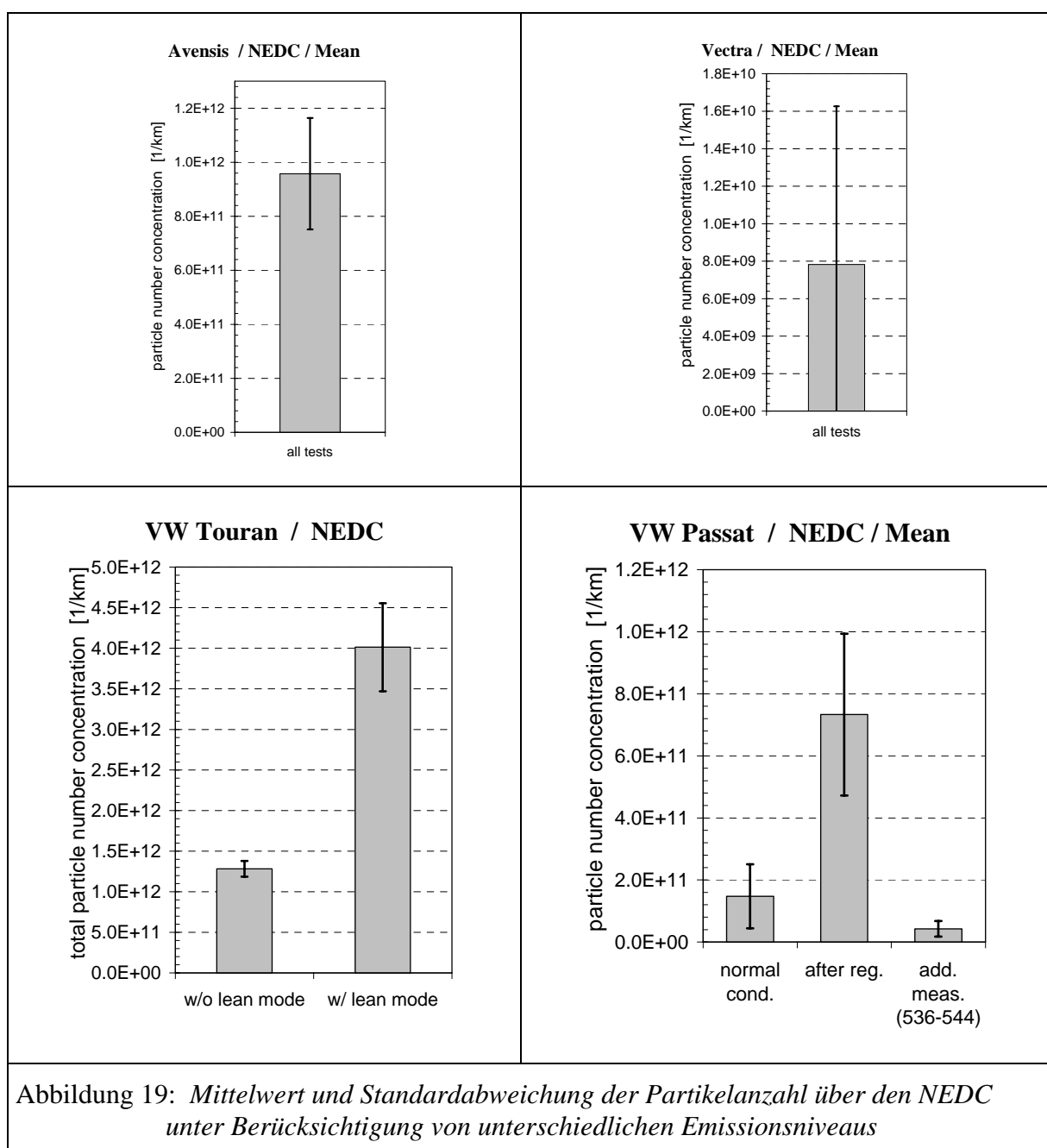
Bei der Auswertung der Messdaten hat es sich als schwierig erwiesen, Aussagen zur Bewertung der Wiederholbarkeit des zu überprüfenden Messverfahrens für die Partikelanzahl zu treffen. Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, waren die Fahrzeuge in allen Fällen als Partikelquellen nicht ausreichend stabil, um durch die Messtechnik verursachte Schwankungen untersuchen zu können. Für zwei Fahrzeuge (Vectra, Passat) hingen die Emissionen stark von den vorangefahrenen Testzyklen ab, obwohl vor jedem NEDC dieselbe Konditionierung gefahren wurde.

Offensichtlich war die für diese Fahrzeuge die übliche Konditionierung (3 EUDC oder 15 min 80 km/h) nicht ausreichend, um unmittelbar nach der Regeneration im Filter eine konstante Abscheideeffizienz zu gewährleisten. Dies zeigt die Abhängigkeit der Abscheideeffizienz vom Beladungsgrad des Filters. Im Falle des Touran mit Benzindirekteinspritzung können die zwei unterschiedlichen Emissionsniveaus auf zwei verschiedene Moden in der Motorsteuerung zurückgeführt werden, die sich jedoch von aussen unbeeinflusst eingestellt haben. Neben der Partikelzahl haben sich auch andere Schadstoffe entsprechend der Motorsteuerung innerhalb der Messreihe geändert.

Um Aussagen zur Wiederholbarkeit der Messmethode alleine zu ermöglichen, wurde versucht, die Messergebnisse soweit wie möglich von Fahrzeug bedingten Einflüssen zu entkoppeln. Deshalb sind für die Fahrzeuge Touran und Passat separate Mittelwerte für die unterschiedlichen Emissionszustände der Fahrzeuge gebildet worden. Beim Opel Vectra wurde für die Mittelwertbildung die Messung 515 nicht berücksichtigt, deren viel höhere Konzentration auf eine vorangegangene Regeneration zurückzuführen ist. In Abbildung 19 sind die Ergebnisse mit ± 1 Standardabweichung dargestellt. Die entsprechenden rel. Standardabweichungen sind in Tabelle 8 aufgegeben. Daraus ergeben sich relative Standardabweichungen von 8% bis 70%, wobei für die Absolutwerte unter 10^{11} Partikel/km die relative Standardabweichung auf den vorgeschlagenen Grenzwert bezogen ist.

Fahrzeug	Tests	n	Rel. Standardabweichung
Toyota Avensis	alle Tests	6	22%
Opel Vectra	alle Tests	5	8%
VW Touran	ohne Magerbetrieb	4	8%
	mit Magerbetrieb	3	14%
VW Passat	1. Messreihe ohne Regeneration	5	70%
	nach Regeneration	4	36%
	2. Messreihe ohne Zwischenfahrten	5	25%

Tabelle 8: Wiederholbarkeit der Partikelanzahlmessungen



6 Ergebnisse der Untersuchungen zur Messtechnik

Durch den Einsatz weiterer Instrumente, die zur Standardkonfiguration parallel geschaltet waren, war es möglich den Einfluss von einzelnen Komponenten der Messkette zu untersuchen. Im Nachfolgenden werden vor allem die Ergebnisse zum Einfluss des CPC-Modells und der Verdünnungsmethode dargestellt.

6.1 Vergleich CPC

Die Messung der Partikelanzahl in der Standardkonfiguration erfolgte mit einem CPC 3022A (555) der Firma TSI (Abschnitt 4.3) nach der Verdampfungseinheit (Heater). Für einige Messungen wurde zusätzlich ein CPC 3010A (281) parallel zum CPC 3022A (555) angebracht. Da-

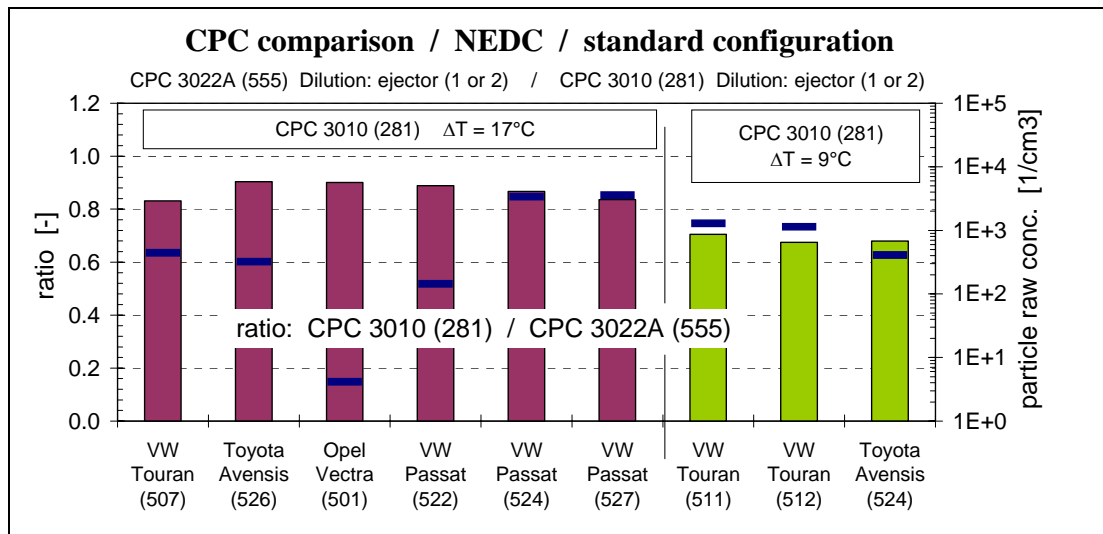


Abbildung 20: Vergleich der Partikelzähler in der Standardkonfiguration, links (Balken): Quotient CPC3010/CPC3022A, rechts (Streifen): Rohkonzentration

mit wurde ein direkter Vergleich dieser beiden Modelle von Kondensationspartikelzähler möglich. In Abbildung 20 ist das in den Fahrzeugmessungen ermittelte Verhältnis zwischen dem «CPC 3022A (555)» und dem «CPC 3010 (281)» gezeigt (linke Skala). Für beide CPCs war die Verdünnung jeweils gleich. Die jeweilige vom CPC3022A effektiv gemessene Partikelkonzentration ist als horizontaler Balken in logarithmischer Darstellung (rechte Skala) eingezeichnet. Wie in Abbildung 20 dargestellt, ist in allen Messungen ein Minderbefund des CPC 3010 gegenüber dem CPC3022 zu beobachten. Bei der standardmässig eingestellten Temperaturdifferenz beim CPC 3010 (281) von $\Delta T = 17^\circ\text{C}$ beträgt der Unterschied etwa 13%, für $\Delta T = 9^\circ\text{C}$ etwa 30%. Bei beiden Einstellungen ist das Verhältnis jedoch recht stabil und unabhängig von der Absolutkonzentration und vom Fahrzeug, was die geringen Standardabweichungen von 3.7%, bzw. 2.3% zeigen. Der Unterschied in den gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen ist durch die unterschiedliche Zähleffizienz der verwendeten CPC-Modelle (siehe Abbildung 3) zu erklären und weist auf eine Präsenz von Festpartikeln im Bereich unter 20 nm im Durchmesser hin. Abbildung 21 zeigt den Vergleich von zwei baugleichen CPC 3010. Jedoch war die Temperaturdifferenz bei beiden Geräten mit $\Delta T = 17^\circ\text{C}$ und $\Delta T = 9^\circ\text{C}$ unterschiedlich eingestellt. Diese Temperaturdifferenz bestimmt die untere Partikelgrösse, die noch gezählt wird. Beide Zähler waren an derselben Verdünnung (RotDisk) angehängt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die unterschiedliche Temperatureinstellung über 20% weniger Partikeln gezählt werden.

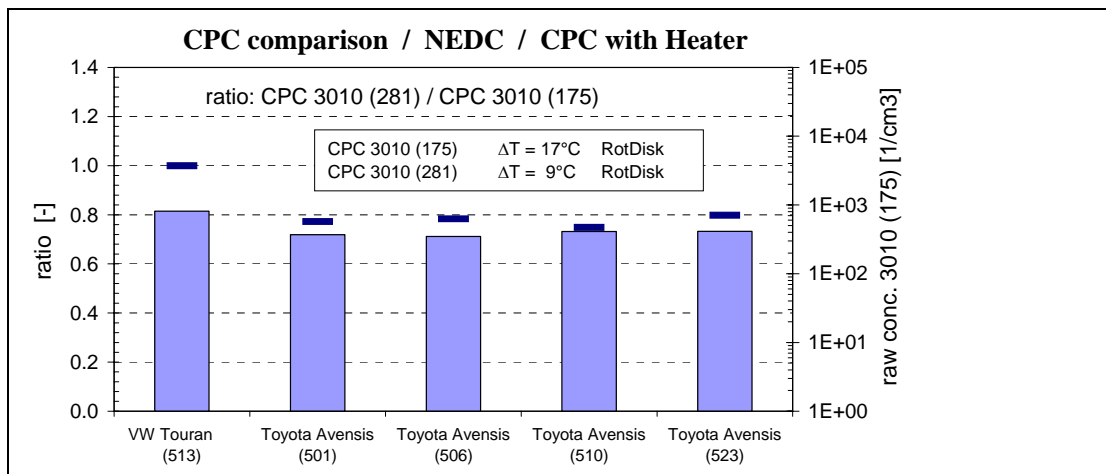


Abbildung 21: Vergleich der Partikelzähler in der Standardkonfiguration, links (Balken): Quotient CPC3010/CPC3010, rechts (Streifen): Rohkonzentration

6.2 Vergleich Verdünnungssysteme

Neben den Messungen mit der Standardkonfiguration wurde für einige Tests ein zweites Messsystem aufgebaut, um den Einfluss von Verdünnungssystem und Verdampfungseinheit in der Messkette zu untersuchen. Um den Einfluss des Partikelzählers klein zu halten, wurden zwei baugleiche Verdampfungseinheiten und zwei CPC3010 verwendet. Die Temperaturdifferenz ΔT (siehe Abschnitt 6.1) war für beide Instrumente jeweils gleich eingestellt. Der Messaufbau ist in Abschnitt 4.3 näher beschrieben. Das Aerosol wurde bei der Standardkonfiguration («CPC 3010 (281)») mit ein oder zwei Injektoren verdünnt, während für den CPC 3010 (175) ein Rotationsverdünner eingesetzt wurde (Abbildung 22).

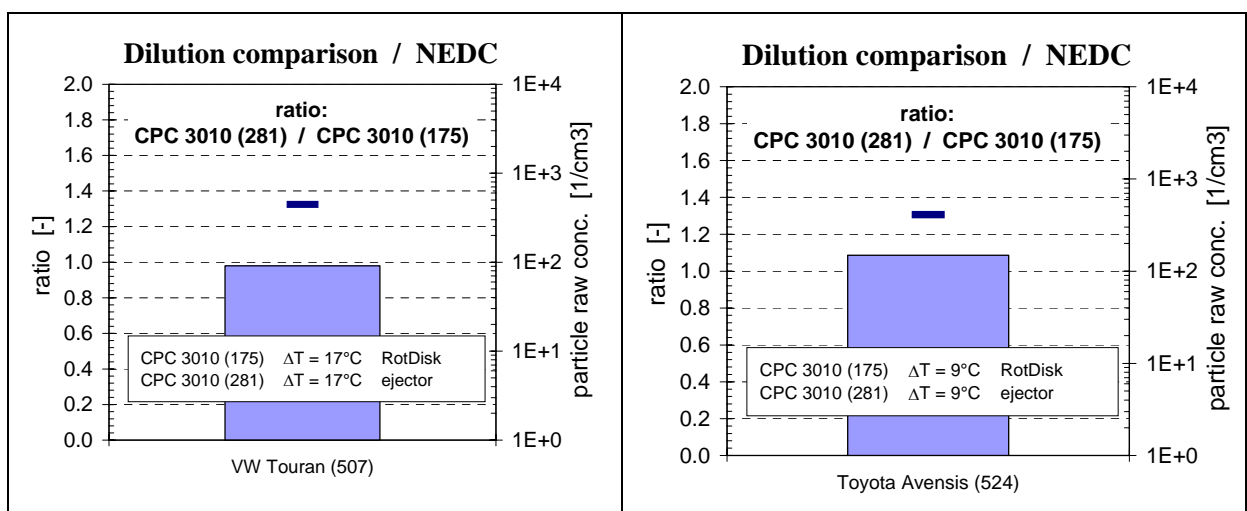


Abbildung 22: Vergleich Verdünnungseinheiten

Abbildung 23 zeigt weitere Ergebnisse zum Vergleich der Verdünnungssysteme. Allerdings wurden hier unterschiedliche CPC-Modelle verwendet. Die gemessenen Rohkonzentrationen des Referenz-CPC sind in den Graphiken jeweils als waagrechte Balken in logarithmischer Darstellung (rechte Skala) aufgezeichnet. Wie aus beiden Diagrammen ersichtlich, liegt das Verhältnis stabil annähernd bei 1.0. Ausnahmen bilden die Fälle, in denen bei einem CPC3010 eine Temperaturdifferenz von $\Delta T=9^{\circ}\text{C}$ eingestellt war und diese somit nicht auf die Verdünnungssysteme zurückzuführen sind. Für einen Vergleich wurden auch einige wenige Messungen mit einer anderen Verdampfungseinheit durchgeführt, die die Anforderung zur Penetration von Festpartikeln von 90% gemäss Reglemententwurf nicht erfüllt. Erwartungsgemäss wurden in diesen Messungen entsprechend grosse Unterschiede in der Konzentration zum Standardsystem gemessen. Auf eine graphische Darstellung der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet.

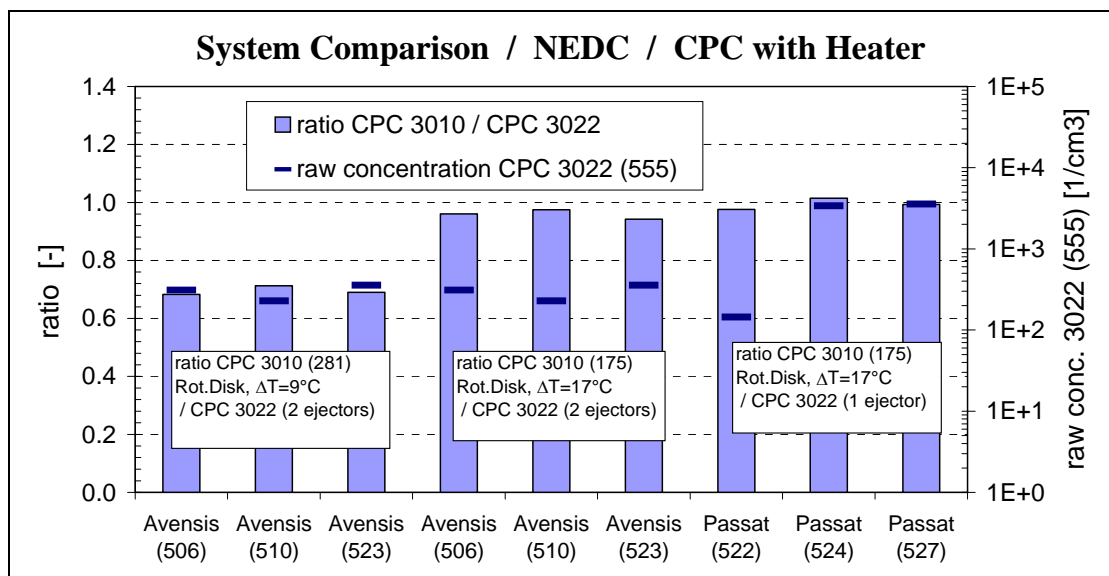


Abbildung 23: Vergleich Messsysteme

In Abbildung 24 ist beispielhaft das Verhältnis der zeitaufgelösten Konzentrationen für zwei Verdünnungssysteme gezeigt. Es ist keine systematische Abweichung von 1 für die verschiedenen Fahrzustände festzustellen. Die grosse Streuung ist wahrscheinlich durch die unterschiedliche Ansprechzeit und die unzureichende Zeitauflösung für die Synchronisation zu erklären.

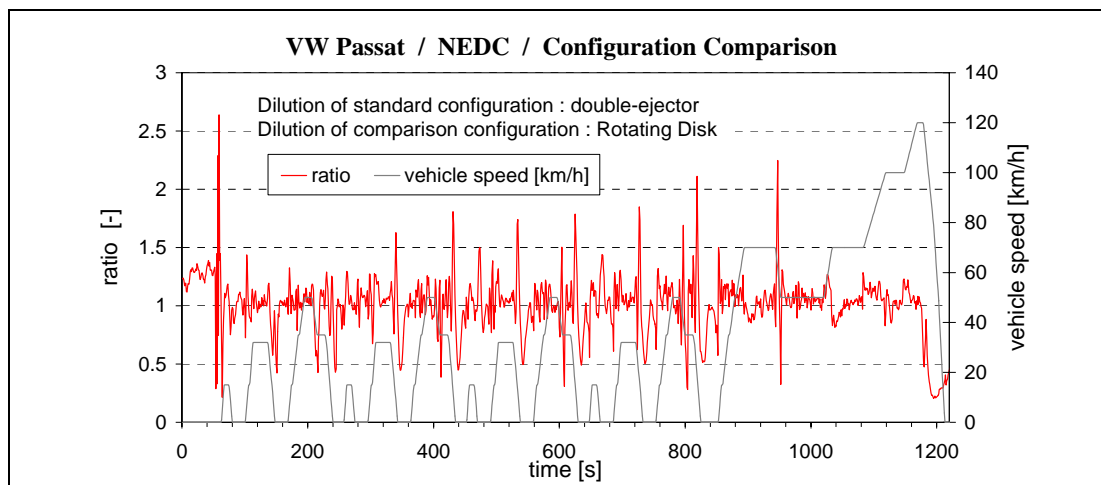


Abbildung 24: Vergleich der Messsysteme beim VW Passat

In Abbildung 25 ist an Hand von zeitaufgelösten Konzentrationsdaten beispielhaft die Funktionsfähigkeit der Verdampfungseinheit dargestellt. Der CPC (553) „vor“ der Verdampfungseinheit zeigt im EUDC-Teil des Fahrzyklus einen deutlichen Anstieg der Partikelanzahl, während der CPC (555) nach der Verdampfungseinheit überhaupt keine Änderung registriert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Partikeln um flüchtige Partikeln gehandelt hat. Im Gegensatz dazu weist der Anstieg von beiden CPCs am Anfang des Zyklus auf Festpartikeln hin.

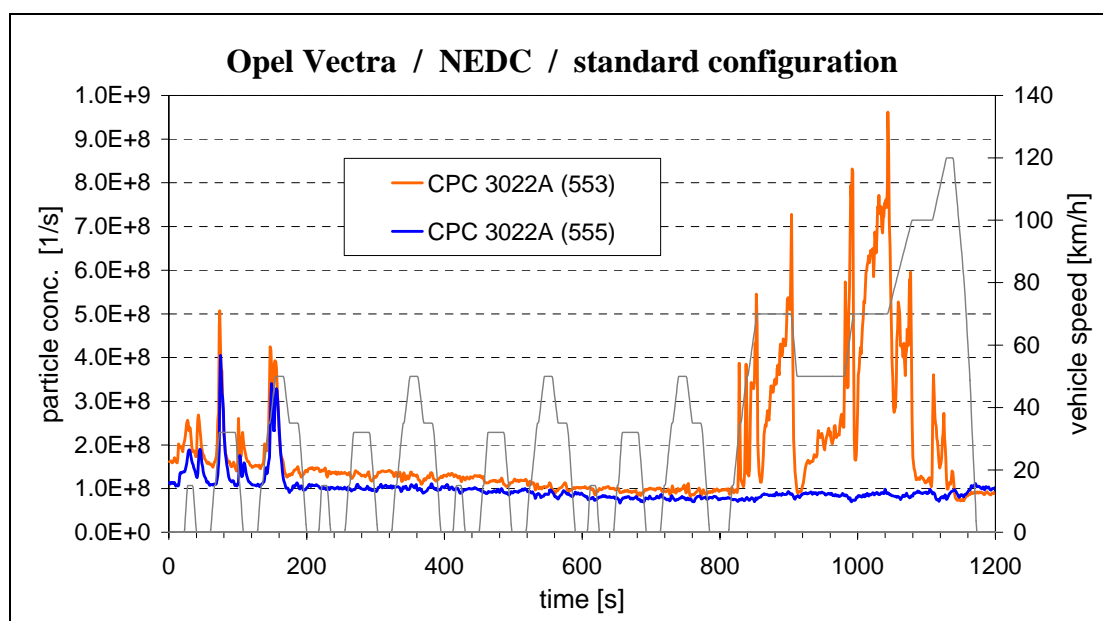


Abbildung 25: Vergleich CPC-Messung mit und ohne Verdampfungseinheit

7 Kalibration und Spezifikation der Messtechnik

7.1 Kalibration CPC

Die Partikelzähler wurden während einer Messpause im Projekt von METAS in Wabern kalibriert (siehe Anhang C). Die Kalibration erfolgte gemäss den Anforderungen des Verordnungsentwurfes. Der CPC 3022A (555) wurde gegen ein Normal für fünf unterschiedliche Partikelkonzentrationen bei jeweils vier verschiedenen Partikelgrössen kalibriert. Zusätzlich wurde der Probenfluss kalibriert. Die Ergebnisse für das CPC-Modell 3022 in Abbildung 26 und für das Modell CPC 3010 in Abbildung 27 dargestellt. Die mittlere Abweichung betrug für den CPC3022 etwa 3% mit einer schwachen Grössenabhängigkeit. Für den CPC3010 betrug die Abweichung bis zu 6.5% für die kleinste gemessene Partikelgrösse und eine ausgeprägtere Abhängigkeit von Partikelgrösse und -konzentration ist festzustellen.

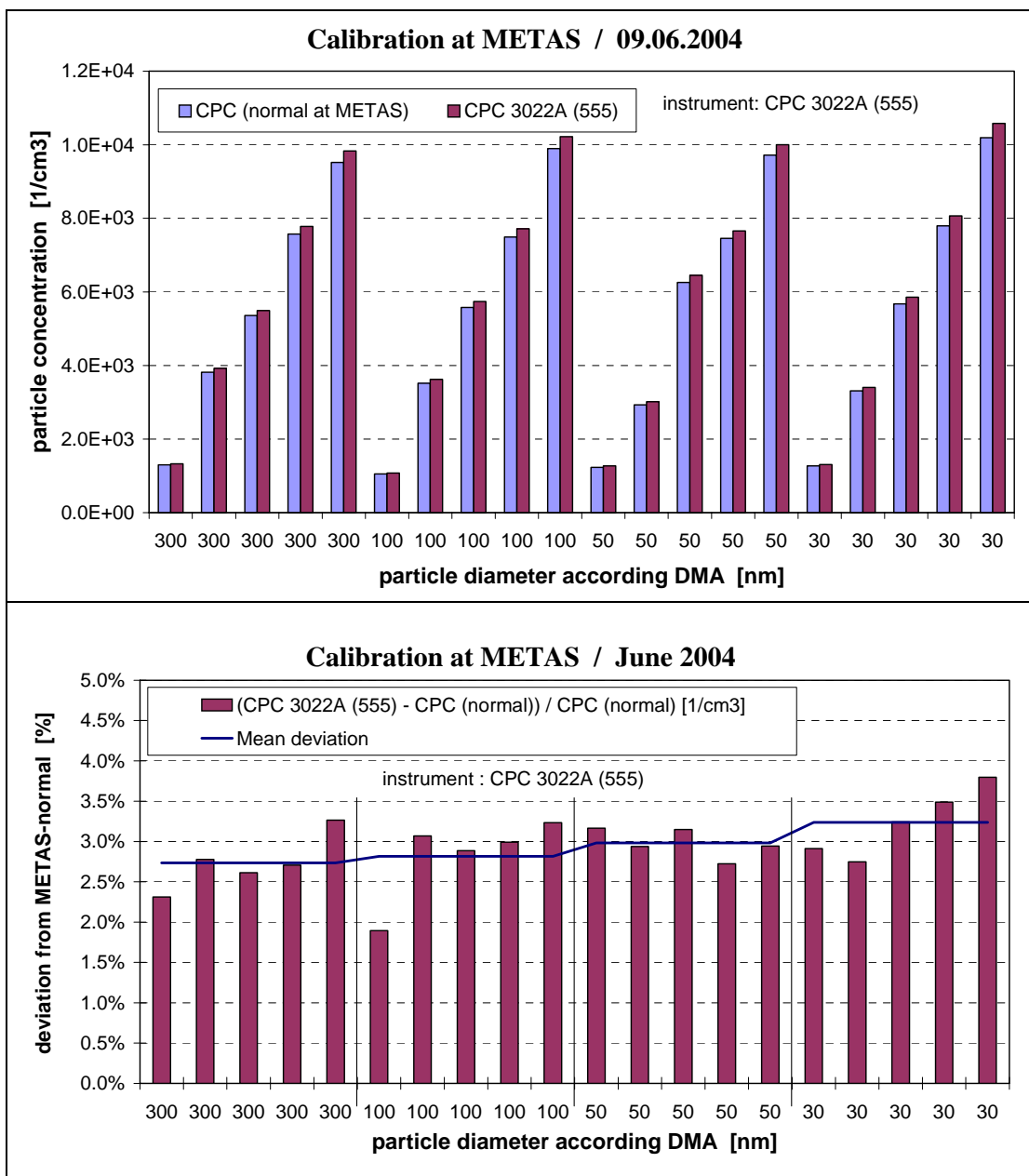


Abbildung 26: Ergebnisse der Kalibration des CPC3022A (555), durchgeführt von METAS

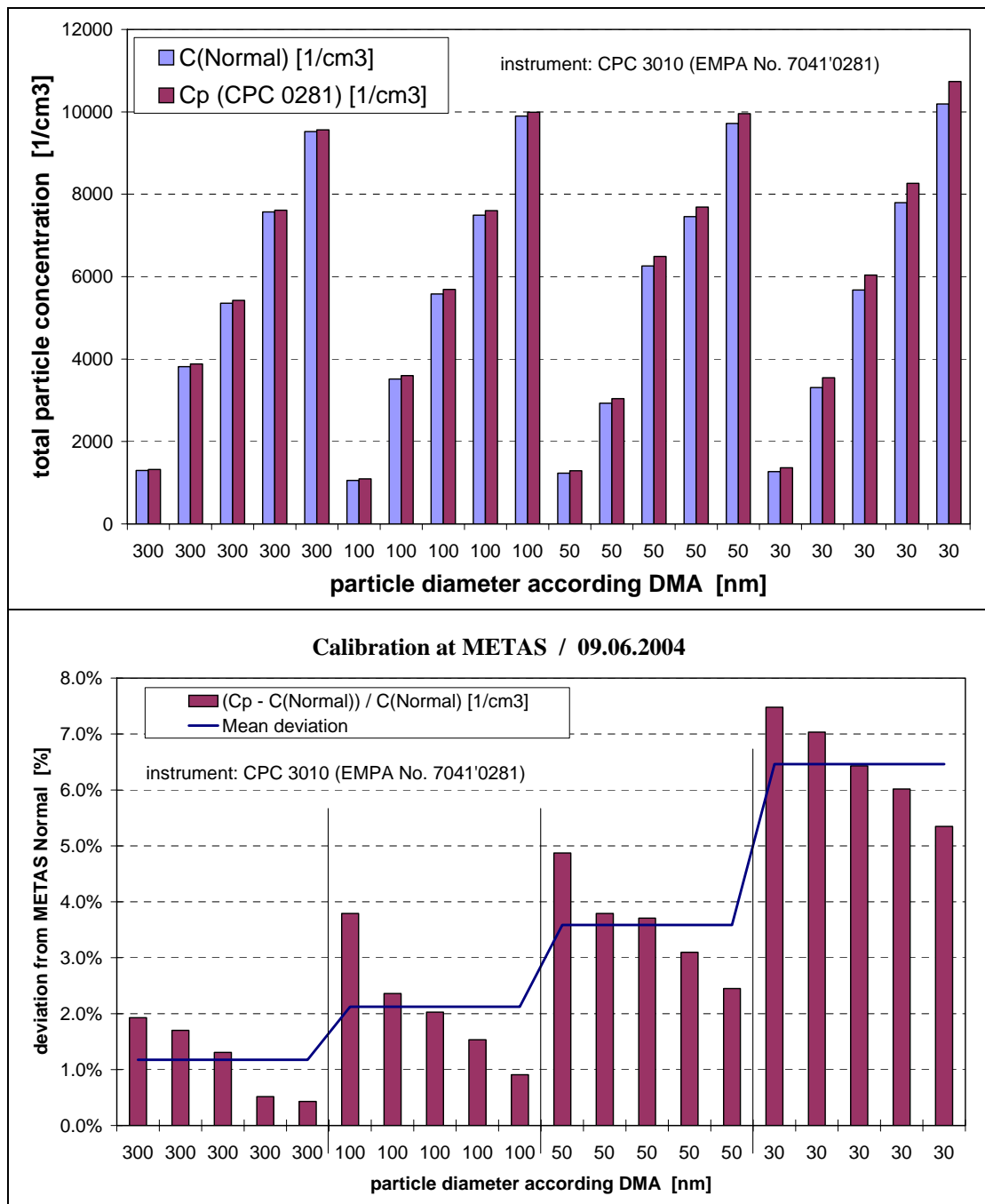


Abbildung 27: Ergebnisse der Kalibration des CPC3010 (281), durchgeführt von METAS

7.2 Kalibration Verdünnungseinheiten

Im Vorfeld zu diesem Projekt wurden die Verdünnungseinheiten mit CO-Kalibriergas kalibriert und an einer Holzfeuerung überprüft. Die Verdünnungsfaktoren wurden für verschiedene Temperaturen und Eingangsdrücken bestimmt, wie auch bei den eigentlichen Messungen erwartet wird. Die Konfiguration der Verdünnungsstufen war dieselbe wie bei den Messungen. Abbildung 28 zeigt als Beispiel die Ergebnisse für der Kalibration für den Rotationsverdünner (Rotating Disk Diluter) und die Doppel-Injektor-Stufe.

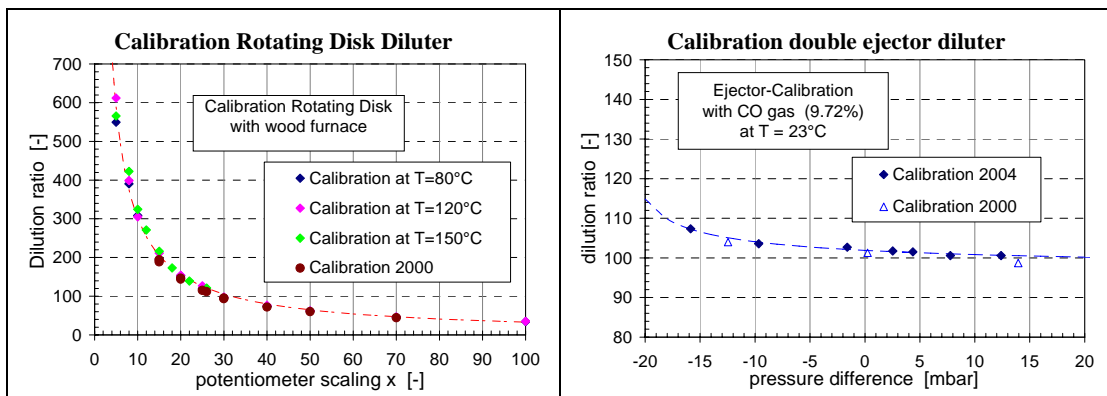


Abbildung 28: Kalibration der Verdünnungseinheiten

7.3 Spezifikation Verdampfungseinheit (Heater)

Gemäss Verordnungsentwurf (siehe Anhang F) muss die Verdampfungseinheit zwei Leistungskriterien erfüllen:

- einen Penetrationsgrad für Festpartikeln von mindestens 90% für Partikeln der Grösse 30nm, 50, nm und 100 nm im Durchmesser
- eine Verdampfungseffizienz von mindestens 99% für Tetracontan-Partikeln ($H_{82}C_{40}$) mit einem Durchmesser von 30 nm und einer Konzentration von mindestens $1000 \text{ Partikel/cm}^3$.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden die im Eigenbau gefertigten Verdampfungseinheiten auf eine Temperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt und mit einem Fluss von 1.3 l/min betrieben. Zur Überprüfung der Penetration wurde als Aerosolquelle ein Zerstäuber mit einer NaCl-Lösung verwendet und mit zwei CPCs gleichzeitig gemessen. Abbildung 29 zeigt als Ergebnis für die drei Partikelgrössen die gemessenen Konzentrationen der beiden CPCs und die berechnete Penetration.

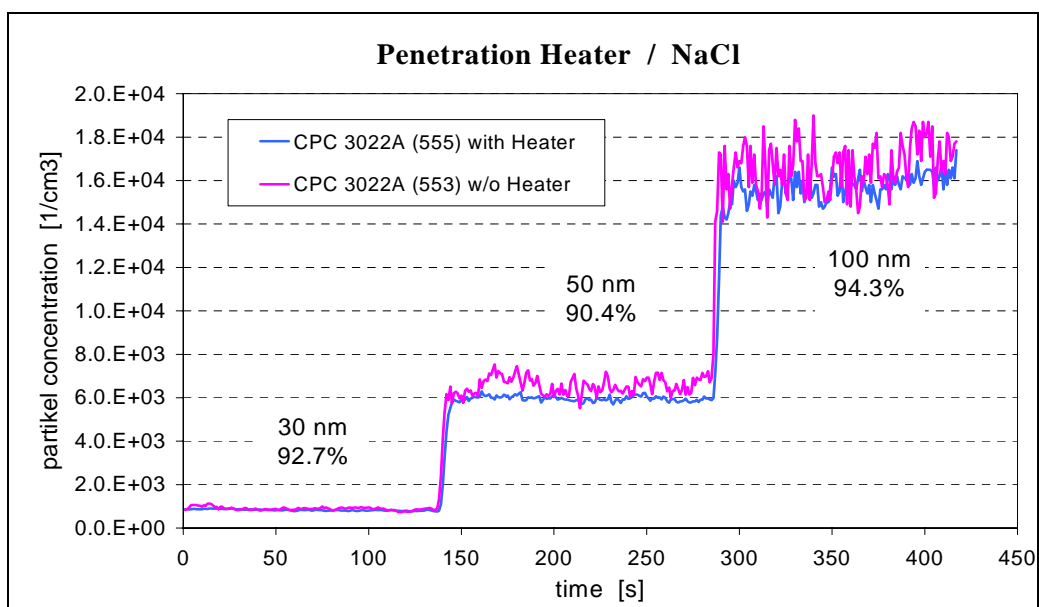


Abbildung 29: Bestimmung der Penetration von NaCl-Partikeln durch die Verdampfungseinheit für drei verschiedene Partikelgrössen.

Abbildung 30 zeigt die gemessenen Konzentrationen vor und nach der Verdampfungseinheit für Tetracontan-Aerosol mit einem häufigsten Durchmesser von 30 nm. Eine Reduktion von etwa 99% wird bei einer Temperatur von 300 °C und einem Durchfluss von 1.3 l/min erreicht. Das Aerosol wurde durch Verdampfen von $H_{82}C_{40}$ -Granulat in einem Röhrenofen hergestellt. Wie aus beiden Graphiken ersichtlich ist, wurden beide Anforderungen von der Verdampfungseinheit gerade erfüllt. Die Anforderungen sind daher als streng zu bewerten.

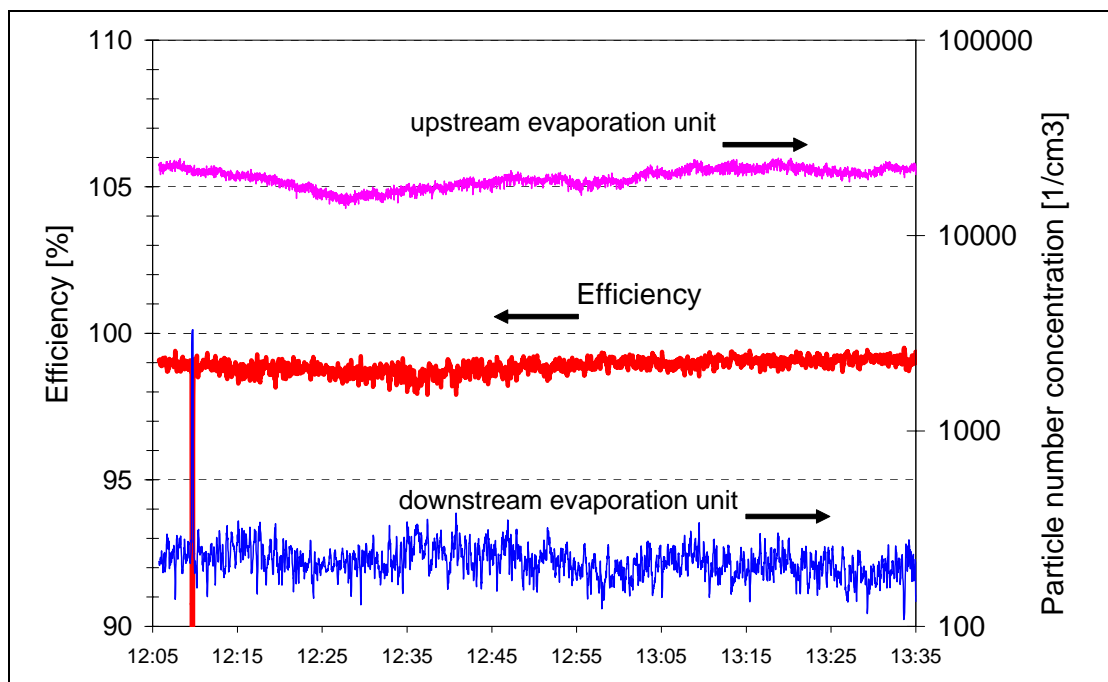


Abbildung 30: Bestimmung der Effizienz der Verdampfungseinheit für C40-Partikeln mit einer Grösse von 30 nm

7.4 Tägliche Funktionsüberprüfung CPC

Die Funktionsweise der CPCs wurde an jedem Tag vor der ersten Messung überprüft. Dazu wurden alle CPCs parallel geschaltet. Aus einem NaCl-Aerosol wurden mit einem DMA nacheinander drei verschiedene Partikelgrössenklassen (100, 50, 30 nm) ausgewählt. Diese wurden dann über einen Neutralisator an die CPCs geleitet, wobei die Zuleitung zu jedem CPC gleich lang war und aus elektrisch leitendem Material bestand.

Die Partikelkonzentration wurde so eingestellt, dass bei den Messungen der 100 nm Partikeln zu keinem Zeitpunkt eine Konzentration grösser als 10^4 Partikel/cm³ gemessen wurde. Aufgrund der Grössenverteilung des NaCl-Aerosols waren die Konzentrationen bei 30 nm sehr niedrig, was eine grosse Streuung der Messresultate verursachte.

In Abbildung 31 ist das Verhältnis der beiden CPC 3022A, normiert auf die gemessene Konzentration des CPC 3022A (555), für die drei Partikelgrössen gezeigt. Der CPC 3022A (555) wurde vorgängig von METAS kalibriert. Es ist keine systematische Abweichung festzustellen. Die Standardabweichung über alle Messungen liegt im Bereich von 4%.

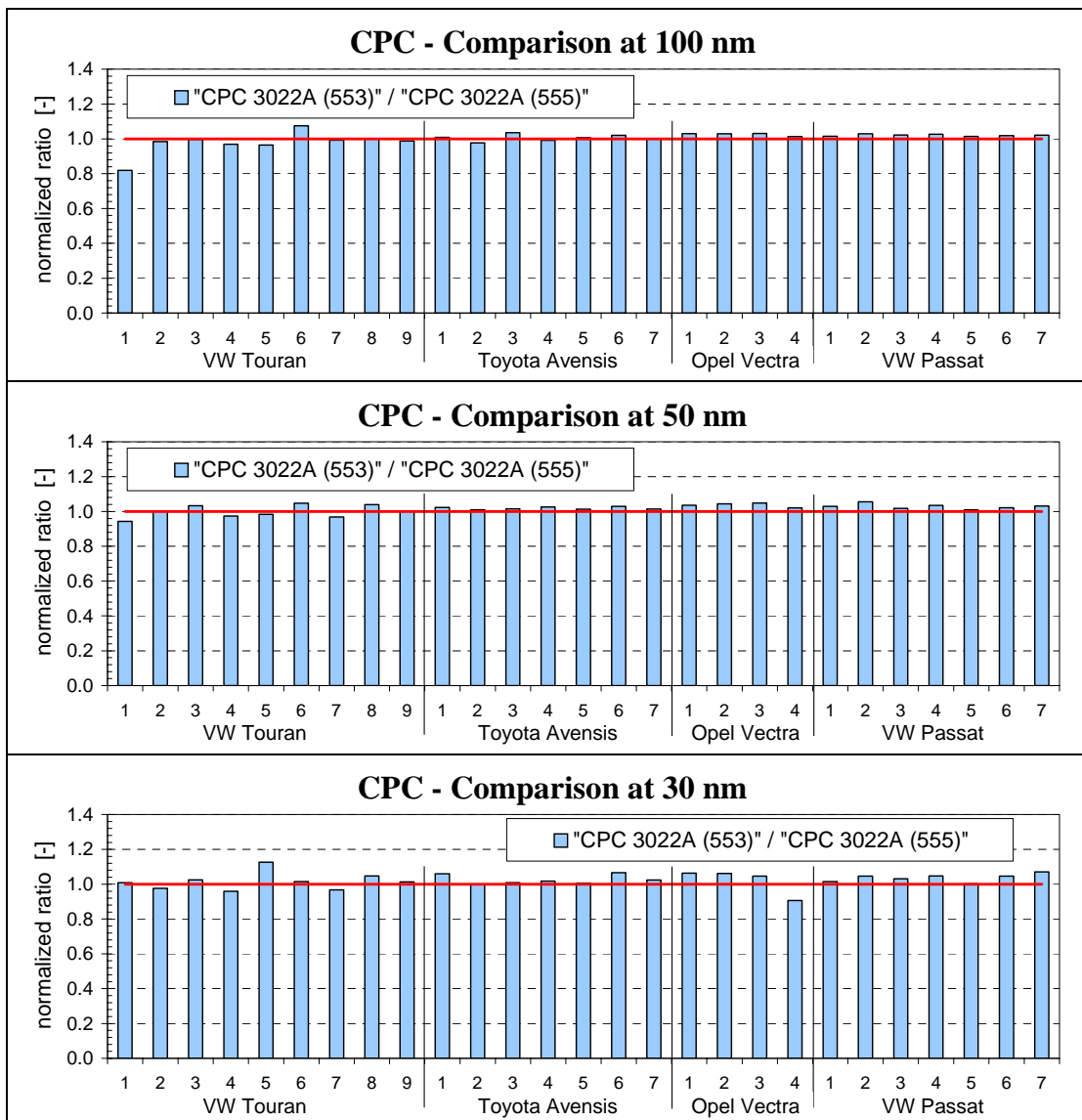


Abbildung 31: Vergleich des CPC3022(553) zum Referenzgerät CPC3022 (555) in der täglichen Überprüfung

Abbildung 32 zeigt die Verhältnisse zwischen «CPC 3010 (281)» und «CPC 3022A (555)», jeweils für die drei Partikelgrössenklassen (100, 50, 30 nm). Eine geringere Zähleffizienz des CPC 3010 (281) ist für die 30 nm-Partikeln zu beobachten. Bei den dunkel markierten Messungen wurde beim CPC3010 (281) die Temperaturdifferenz auf $\Delta T = 9^\circ\text{C}$ eingestellt (siehe Abschnitt 6.1). Für alle drei Partikelgrössen ist eine geringere Zähleffizienz festzustellen, die bei 30 nm auf unter 50% fällt. Diese Beobachtung ist nicht in Einklang mit der vom Hersteller angegebenen Spezifikation. Für die Messungen mit der Partikelgrösse von 30 nm ergibt sich eine Standardabweichung von 8% über alle Messungen, wenn beide CPCs auf $\Delta T = 17^\circ\text{C}$ eingestellt sind. Die grössere Streuung ist auch auf die geringen Konzentrationen zurückzuführen, die zum Teil kleiner als 10 Partikel/ Ncm^3 waren.

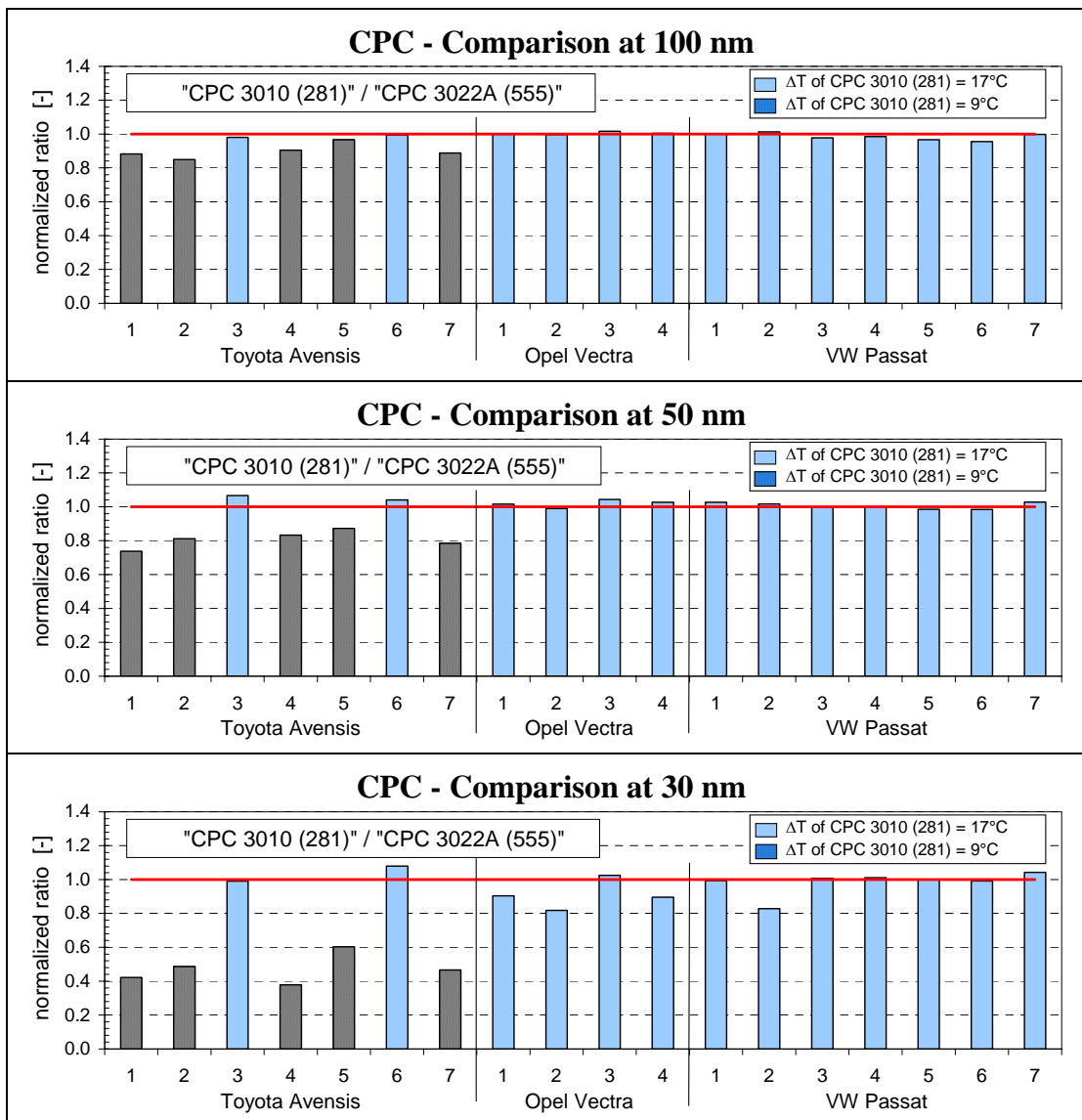


Abbildung 32: CPC Vergleich in der tägliche Überprüfung

7.5 Messbereich CPC

Gemäss der Verordnung des BUWAL soll der Partikelzähler keine Partikelkonzentrationen grösser als 10'000 anzeigen. Aufschlussreich ist in diesem Zusammenhang, wie die Histogramme für die vom CPC gemessene Rohkonzentration für die einzelnen Messungen aussehen. In Abbildung 33 ist die Häufigkeitsverteilung der Sekundendaten für die einzelnen Fahrzeuge gezeigt. Es gilt zu berücksichtigen, dass für manche Fahrzeuge die Verdünnungsrate innerhalb der Messreihe geändert wurde.

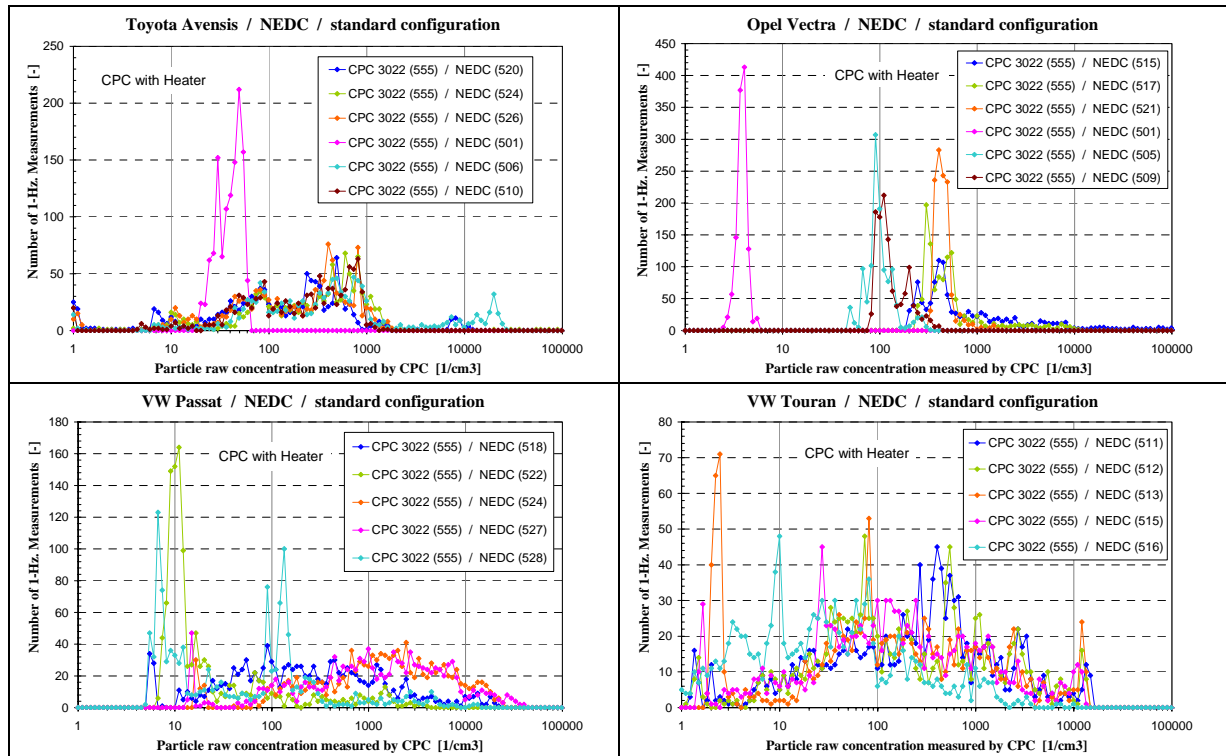


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung der Sekundenwerte für die Partikelanzahlmessungen

8 Ringvergleich mit Abgasprüfstelle AFHB in Nidau

Um Aussagen über die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens zu gewinnen, wurden im Rahmen der CPC Praxiserprobung auch Messungen an der Abgasprüfstelle AFHB in Nidau bei Biel durchgeführt. Die Messungen wurden mit dem Opel Vectra durchgeführt, der auch an der EMPA als Testfahrzeug diente. Das Fahrzeug wurde mit demselben Treibstoff gefahren, welcher auch für die Messungen an der EMPA verwendet wurde. Zur Konditionierung des Fahrzeuges, der Rohre und der CVS-Anlage wurden am Vorabend vor der ersten Messung drei NEDC und Konstantfahrten bei verschiedenen Geschwindigkeiten gefahren. Vor jeder Messung erfolgte dieselbe Konditionierung wie an der EMPA.

8.1 Messaufbau an der AFHB

Die Messung der Partikelanzahl erfolgte mit zwei parallel installierten Systemen. Von der AFHB wurde ein unabhängiges System für die Partikelanzahlmessung («System AFHB») aufgebaut. Abbildung 34 zeigt den Prüfstand der AFHB mit dem Messaufbau. Die Probenahme erfolgte am Ende des CVS-Tunnels mittels einer Bogensonde (siehe Abbildung 34, rechts). Aufgrund der niedrigen Rohkonzentrationen wurde keine zusätzliche Verdünnungseinheit verwendet. Als Verdampfungseinheit diente ein Thermo-Diluter der Firma Matter Engineering AG und als Messgerät ein CPC 3010 (2230) der Firma TSI (siehe Abbildung 35). Dieser CPC wurde vorgängig von METAS kalibriert. Als Vergleichssystem diente die Standardkonfiguration mit denselben Instrumenten, die auch an der EMPA verwendet wurden (siehe Abschnitt 4.3). Auch



Abbildung 34 : Messaufbau an AFHB



Abbildung 35 : System EMPA & System AFHB

für diese Konfiguration wurde auf eine zusätzliche Verdünnung verzichtet. Die Probenahme erfolgte für jedes der beiden Systeme mittels einer separaten Sonde aus der CVS-Anlage.

8.2 Ergebnisse des Laborvergleichs

Die Ergebnisse des Laborvergleichs für die Partikelanzahlkonzentrationen sind nachfolgend dargestellt. Abbildung 36 zeigt den Vergleich der Messungen an der EMPA, gemessen mit dem EMPA-System (Standardkonfiguration siehe Abschnitt 4.3), mit denen der AFHB, gemessen mit dem AFHB-System (siehe Abschnitt 8.1). Mit Ausnahme eines Ausreißers (bedingt durch Vorgeschichte, siehe Abschnitt 5.2) wird in beiden Labors in allen Messungen der vorgeschlagene Grenzwert von 10^{11} Partikel/km deutlich eingehalten. Die Messungen bei der AFHB sind im Mittel in der Konzentration höher und haben eine kleinere Streuung als die Messungen an

der EMPA. Für die auf den vorgeschlagenen Grenzwert bezogenen relativen Standardabweichungen ergeben sich unter Ausschluss der Ausreisser Werte von 8% bzw. 15%. Die grössere Streuung an der EMPA ist durch die Tatsache zu erklären, dass dort zwischen den NEDC-Zyklen andere Testzyklen gefahren wurden, während an der AFHB keine weiteren Fahrten zwischen den Zyklen stattfanden. Wie in Kapitel 5 gezeigt, hat jedoch die Vorgeschichte trotz Konditionierung einen grossen Einfluss auf die Partikelanzahlemission.

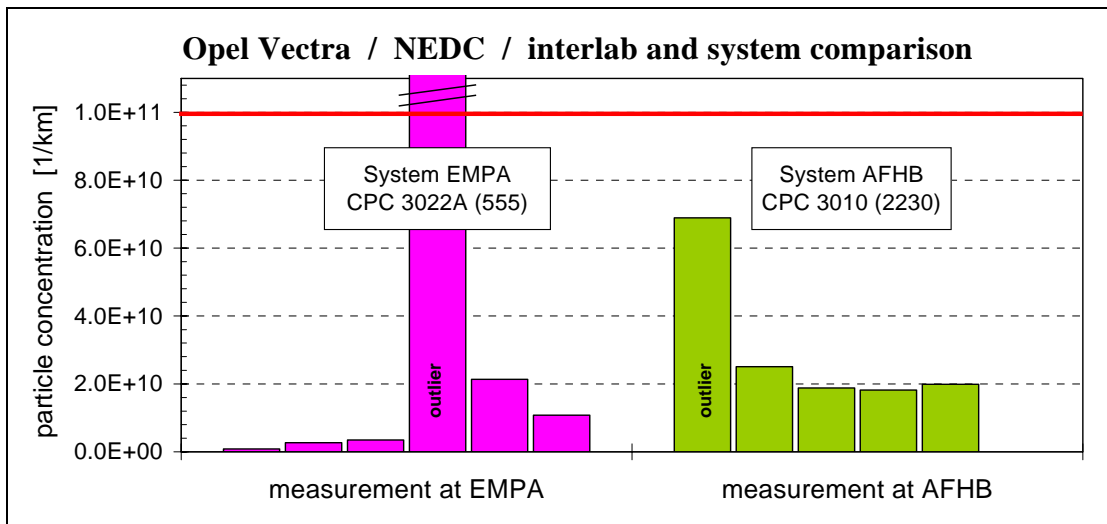


Abbildung 36: Partikelanzahlkonzentrationen des Opel Vectra gemessen an der EMPA und AFHB mit dem jeweiligen Labor eigenen Messsystem

Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse der Messungen mit demselben EMPA-Messsystem in beiden Labors. Daraus wird ersichtlich, dass die aus Abbildung 36 ersichtlichen Diskrepanzen zwischen den Labors nicht vom Messsystem hervorgerufen werden, sondern vom Fahrzeug selbst oder dem Messsystem vorgelagerten Komponenten.

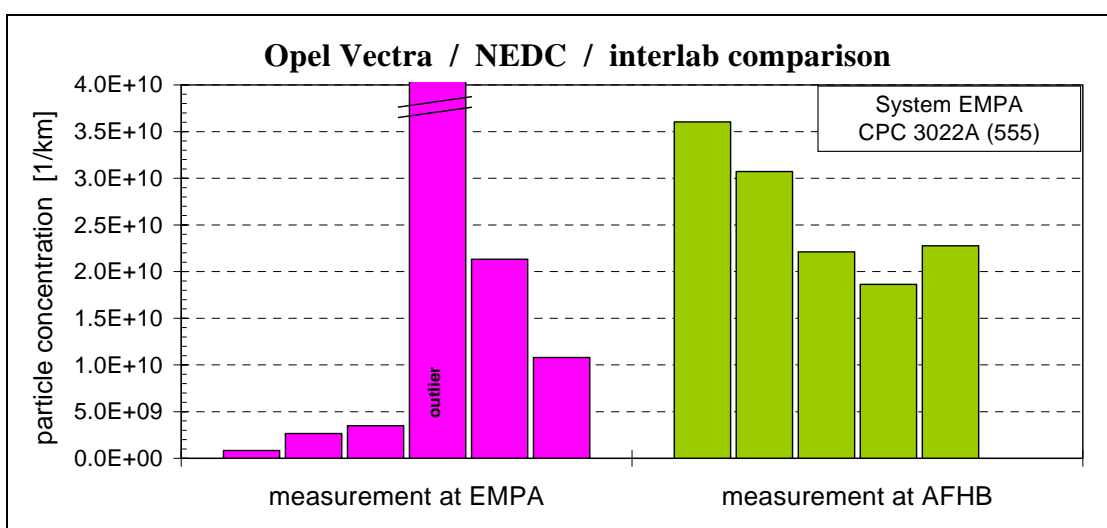


Abbildung 37: Vergleich der Messungen in beiden Labors mit dem selben Messsystem

Absolut betrachtet sind die Partikelanzahlemissionen des Opel Vectra sehr tief und nahe an der Nachweisgrenze des Messsystems. Letztere wird im Wesentlichen durch die Qualität der Verdünnungsluft im CVS-Tunnel und die Sauberkeit der Abgaszuleitung zum CVS-Tunnel bestimmt. Um die Untergrundkonzentration zu bestimmen, wurden in beiden Labors Messungen ohne Fahrzeugbetrieb durchgeführt. In Abbildung 38 sind die zeitaufgelösten Messdaten für die Anzahlkonzentration dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Untergrundkonzentration an der AFHB etwa einen Faktor 2.5 höher war, was eine Ursache für höhere Abgaskonzentrationen darstellen könnte.

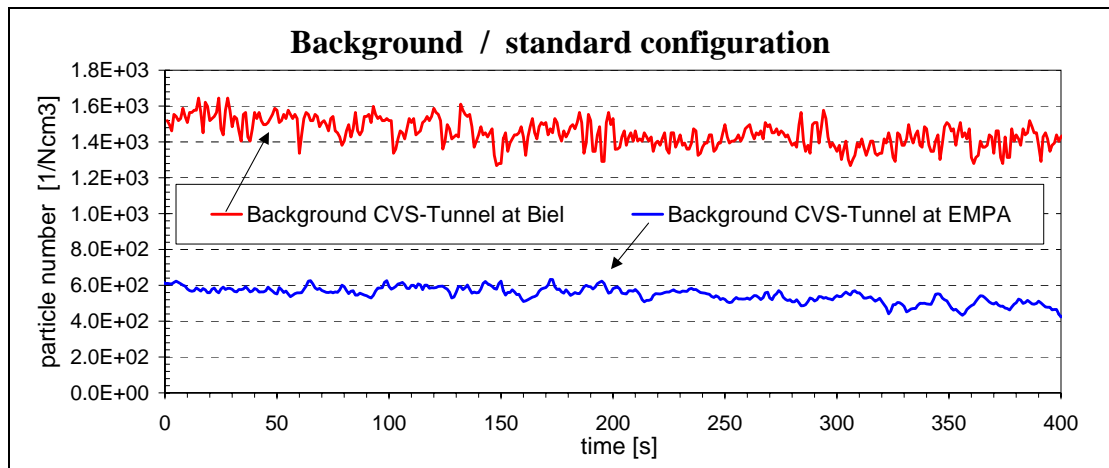


Abbildung 38: CVS Untergrund Partikelkonzentration

Die gasförmigen Abgaskomponenten zeigen in der Regel eine gute Übereinstimmung zwischen EMPA und AFHB (Abbildung 39 und Abbildung 40). Auffallende Diskrepanzen sind für CO_2 und NO_x festzustellen, doch können diese nicht als Erklärung für die Unterschiede in der Partikelemission herangezogen werden. Die gravimetrisch bestimmten Daten für die Partikelmasse (PM) zeigen in Niveau und Streuung eine deutliche Diskrepanz. Die höheren Werte von AFHB könnten durch die höhere Untergrundkonzentration erklärt werden, die bei den sehr tiefen Filterbeladungen einen Einfluss haben kann.

Abbildung 41 zeigt zusammenfassend die laborbezogenen Mittelwerte der Partikelmessungen mit +/- einer Standardabweichung als Fehlerbalken. Sowohl für die Partikelanzahl als auch für die Partikelmasse wurden an der EMPA deutlich tiefere Werte gemessen.

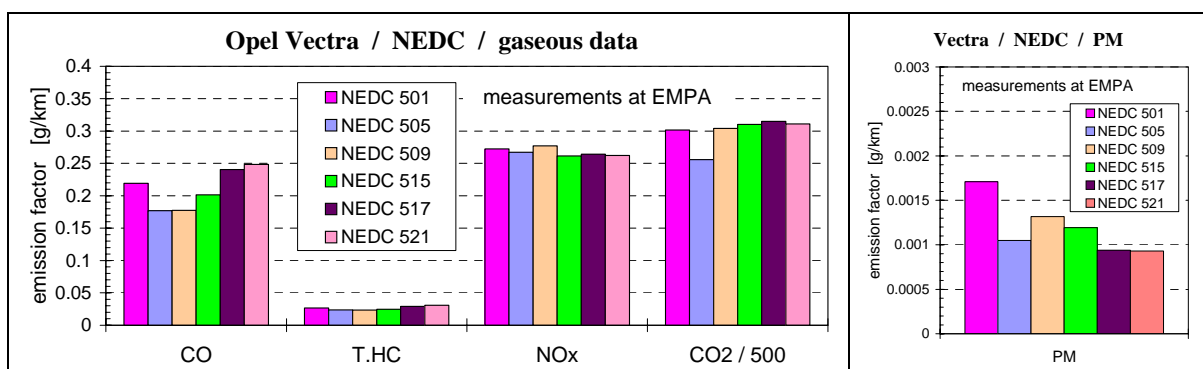


Abbildung 39 : Ergebnisse für die gasförmigen Abgaskomponenten (links) und für die Partikelmasse (rechts) für die Messungen an der EMPA

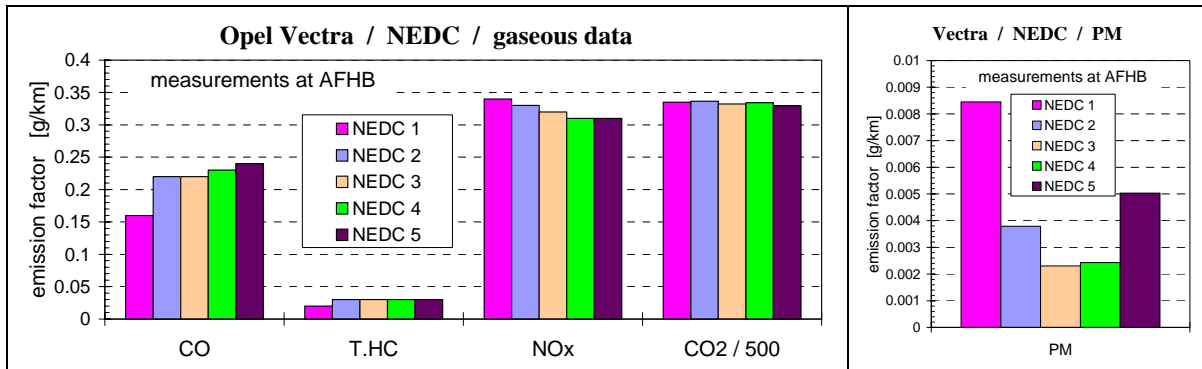


Abbildung 40 : Ergebnisse für die gasförmigen Abgaskomponenten (links) und für die Partikelmasse (rechts) für die Messungen an der AFHB

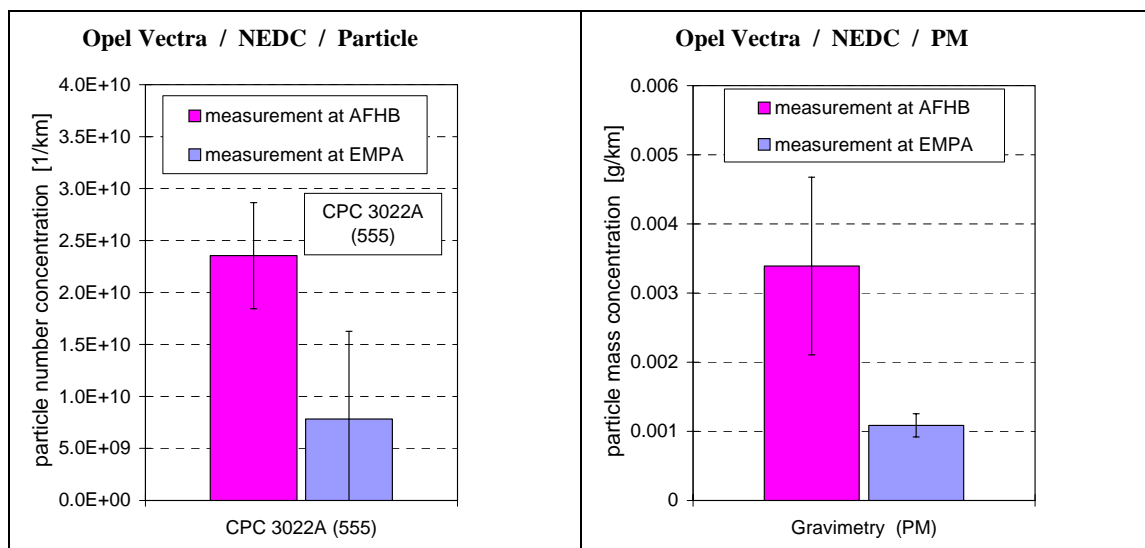


Abbildung 41 : Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Partikelkonzentration an EMPA und AFHB, links: Partikelanzahl, rechts: Partikelmasse

8.3 Ergebnisse zum Vergleich der Messsysteme AFHB und EMPA

Bei den Messungen bei der AFHB in Nidau kamen zwei voneinander getrennte Partikelanzahlmesssysteme zum Einsatz. Das «System EMPA» war dieselbe Standardkonfiguration mit zwei CPCs, welche auch für die Messungen an der EMPA eingesetzt wurde. Das «System AFHB» ist in Abschnitt 8.1 genauer beschrieben.

Ein direkter Vergleich der beiden Messsysteme für die Absolutkonzentrationen der Partikelanzahl ist in Abbildung 42 dargestellt. Bis auf den Ausreisser in der ersten Messung ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Die relativen Standardabweichungen bezogen auf den vorgeschlagenen Grenzwert betragen für die einzelnen Systeme 3%, 7% und 4%. Die resultierenden Verhältnisse zwischen den Messsystemen von EMPA und AFHB für die Partikelkonzentrationen zeigt Abbildung 43, getrennt dargestellt für den CPC3022 und den CPC3010. Betrachtet man die erste Messung als Ausreisser, ergibt sich für die Partikelmesssysteme alleine, d.h. ohne CVS-Anlage und Prüfstand, eine mittlere Abweichung von 3% für die Systeme mit gleichem CPC-Modell und ein mittlerer Minderbefund von 12% für das Messsystem mit dem CPC3010 gegenüber dem System mit CPC3022.

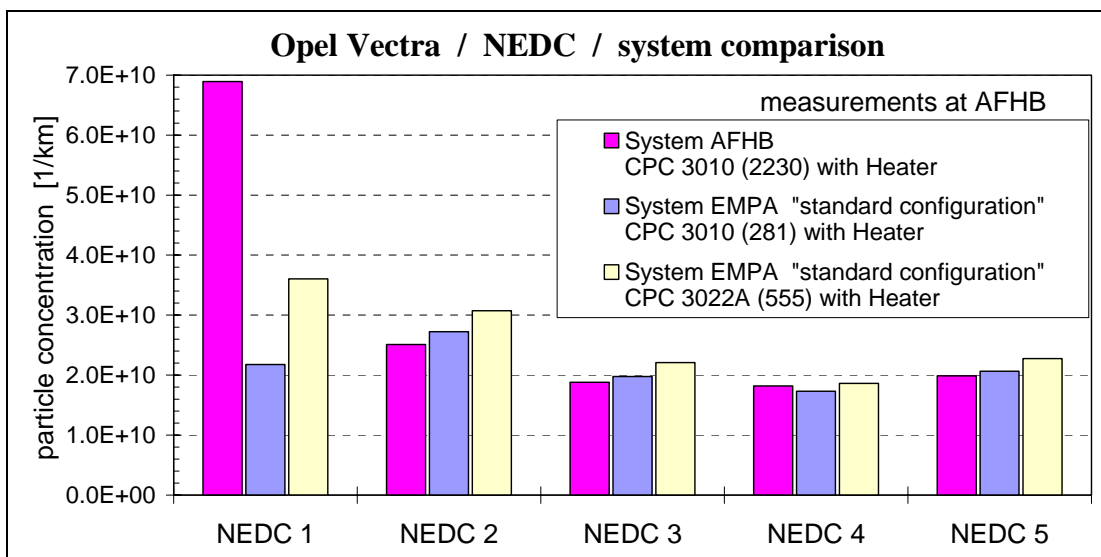


Abbildung 42: Vergleich der beiden Partikelmesssysteme EMPA und AFHB für die Messungen an der AFHB

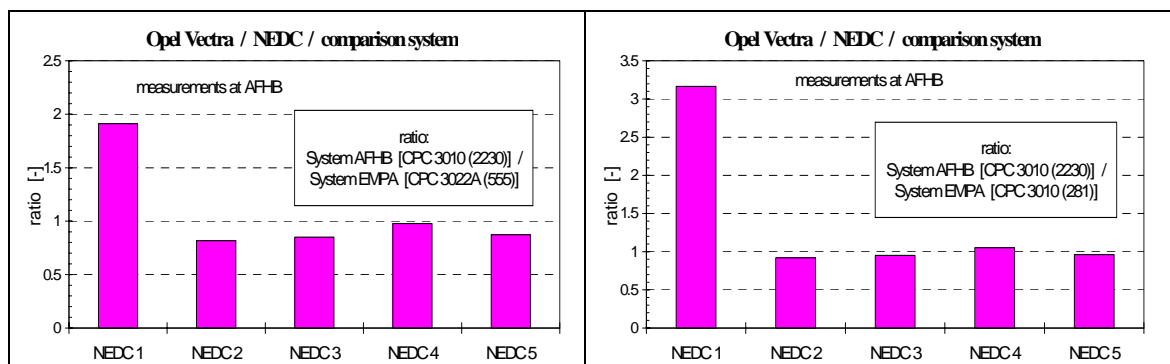


Abbildung 43: Verhältnisse zwischen Partikelmesssysteme für die Messungen an der AFHB, links: CPC3022, rechts: CPC3010

9 Schlussfolgerungen

Robustheit der Messmethode

Der Messaufbau für die Partikelanzahlmessung hat sich während der über mehrere Wochen dauernden Praxiserprobung als geeignet und robust erwiesen. Die CPCs zeigten eine sehr gute Langzeitstabilität und die Verdampfungseinheit erwies sich während allen Messungen als ausreichend effizient. Es waren keine Ausfälle der Messtechnik zu beobachten.

Spezifikation der Verdampfungseinheit

Die Spezifikation der Verdampfungseinheit hat sich als sehr streng erwiesen. Nach einigem experimentieren konnte jedoch ein Aufbau realisiert werden, mit dem die Anforderungen bzgl. Verdampfungseffizienz von flüchtigen Partikeln und Penetration von Festpartikeln gleichzeitig erfüllt wurden.

Einfluss Verdampfungseinheiten

Ein Vergleich von unterschiedlichen Verdampfungseinheiten war nicht Gegenstand dieses Projektes und wurde nicht systematisch durchgeführt. Einzelne Versuche mit zwei baugleichen Verdampfungseinheiten zeigten eine gute Übereinstimmung. Vergleichsmessungen mit einer anderen Verdampfungseinheit, die die strengen Anforderungen an die Penetration von Festpartikeln nicht erfüllt, ergaben erwartungsgemäss grosse Unterschiede im Ergebnis der Fahrzeugmessungen.

Einfluss Verdünnungseinheiten

Auch ein Vergleich von unterschiedlichen Verdünnungsmethoden war nicht Gegenstand dieses Projektes und wurde nicht systematisch durchgeführt. Eine Vielzahl von Parallelmessungen ergab jedoch konsistente Ergebnisse zwischen einem Rotationsverdünner und den in diesem Projekt mehrheitlich eingesetzten Injektor basierten Verdünnungseinheiten.

Einfluss CPC-Modell

Die Kondensationspartikelzähler gleicher Bauart zeigten in den Fahrzeugmessungen als auch bei der täglichen Funktionsüberprüfung eine sehr gute Übereinstimmung mit Abweichungen unter 5%. Vergleiche mit einem anderen CPC-Modell mit unterschiedlicher Zähleffizienz für kleine Partikeln zeigten dagegen Unterschiede. Das Modell CPC3010 mit einer Temperatureinstellung von $\Delta T = 9 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht im Wesentlichen der Spezifikation des internationalen PMP-Entwurfes, zeigte aber einen Minderbefund von etwa 30% gegenüber dem Modell CPC3022A, das kleinere Partikeln zählen kann und die Mindestanforderung von PMP-CH erfüllt. Daraus folgt, dass die untere Messgrenze und die individuelle Zähleffizienzkurve des CPCs einen Einfluss auf das Messresultat hat, wenn kleine Partikeln (d.h. kleiner 30 nm) in relevanter Zahl im Abgas sind. Die daraus resultierende Messunsicherheit ist aufgrund der typischen Partikelgrössenverteilung dabei umso grösser je höher die untere Messgrenze für die Partikelgrösse angesetzt ist. Aus diesen Gründen ist durch die tiefere untere Messgrenze im CH-Verordnungsentwurf eine geringere Messunsicherheit gegenüber PMP-international zu erwarten, auch wenn im CH-Entwurf nur eine Mindestanforderung festgelegt ist.

Reproduzierbarkeit des Messverfahrens

Der zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit durchgeführte Laborvergleich mit der AFHB ergab deutliche Unterschiede der Partikelanzahl und Partikelmasse für das sehr niedrig emittierende Fahrzeug. Bezogen auf den Grenzwert von 10^{11} Partikel/km entspricht der Unterschied jedoch nur 16%. Die Unterschiede sind hauptsächlich auf die Untergrundkonzentration und damit auf die Qualität der verwendeten Verdünnungsluft zurückzuführen. Diese Erklärung wird durch Vergleichsmessungen am selben Prüfstand mit unabhängigen Messsys-

temen gestützt, für die die Abweichungen der Einzelwerte lediglich zwischen 3% und 20% betragen. Damit kann die Reproduzierbarkeit des Messsystems für die Partikelanzahl alleine, d.h. ohne CVS-Anlage und Prüfstand als gut bezeichnet werden.

Qualität der CVS-Verdünnungsluft

Messungen der Untergrundkonzentration im CVS-Tunnel beider Labors zeigten einen Unterschied von einem Faktor 2.5, der auf die Filterung der Verdünnungsluft zurückzuführen ist. Die Ergebnisse weisen auf einen grossen Einfluss der Qualität der CVS-Verdünnungsluft bei der Messung von Fahrzeugen mit sehr effizienten Partikelfiltern hin.

Fahrzeugkonditionierung

Die Vorgeschichte des Fahrzeugs und des Probenahmesystems vor dem Test hat einen grossen Einfluss auf das Testergebnis. Trotz einer einheitlichen Konditionierung und einer Ruhephase von 6 h unmittelbar vor dem Prüfzyklus wurden grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Tests gemessen. Unabhängig vom Filtersystem (katalytische Beschichtung oder Treibstoffadditiv) wurden deutlich erhöhte Partikelemissionen nach Fahrten mit hoher Last gemessen, die eine Regeneration des Filters auslösten. Weder die reglementierte Konditionierung (3 EUDC) noch eine Konstantfahrt (15 min, 80 km/h) waren nach Regenerationen ausreichend, den Filter durch die neue Russbeladung in einen Zustand mit quasi stationärem Abscheidegrad überzuführen. Eine weitere Ursache für grosse Schwankungen kann in der komplexen Motorsteuerung liegen, die je nach Fahrzeugzustand von Zyklus zu Zyklus ändern kann, auch wenn von aussen keine bewusste Änderung vorgenommen wird. Bei den untersuchten Fahrzeugen trifft dies vor allem auf das Benzinfahrzeug mit Direkteinspritzung (VW Touran) zu, bei dem das Luft/Kraftstoffverhältnis variierte.

Wiederholbarkeit des Messverfahrens

Die oben erwähnten nicht messtechnisch bedingten Einflüsse machten eine Bestimmung der Wiederholbarkeit des Messverfahrens schwierig. Konservative Abschätzungen die lediglich Messungen mit eindeutigen Fahrzeugeinflüssen ausschlossen, ergab eine über alle Messreihen gemittelte Standardabweichung von 26% mit Extremwerten von 8% und 70%, wobei der Höchstwert von einer Messreihe mit sehr ungleichen Testvorgeschichten stammt.

Gravimetrische Filtermethode

Die gravimetrische Filtermethode zur Bestimmung der Partikelmasse gemäss gültigem Reglement hat sich für die Quantifizierung der Partikelemission von Fahrzeugen mit Partikelfilter als völlig ungeeignet herausgestellt. Während für die Partikelzahl Unterschiede von bis zu Faktor 70 zwischen den Fahrzeugen bestimmt wurden, betrug der Unterschied für die Partikelmasse in allen Fällen weniger als 50%! Dieses Ergebnis zeigt, dass die Messwerte klar unterhalb der Nachweisgrenze der gravimetrischen Methode lagen und eine Differenzierung von Partikelfiltern mit unterschiedlicher Filtereffizienz nicht möglich ist.

Partikelanzahlgrenzwert

Von den drei untersuchten Dieselfahrzeugen hat der Opel Vectra und der VW Passat den vorgeschlagenen Grenzwert von 10^{11} Partikel/km eingehalten. Für beide Fahrzeuge lagen die Emissionen jedoch während Testfahrten, die mit frischregeneriertem Filter erfolgten, über dem Grenzwert. Der Toyota Avensis und das Benzinfahrzeug mit Direkteinspritzung, VW Touran FSI, emittierten in allen Messungen mehr als 10^{11} Partikel/km. Vergleichbare Messungen ausserhalb dieses Projektes mit einem Peugeot 605 und eine Einzelmessung mit einem BMW 530d, beide mit Partikelfilter ausgestattet, ergaben, dass diese Fahrzeuge den vorgeschlagenen Grenzwert klar einhalten.

10 Empfehlungen

Konditionierung der Fahrzeuge

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die grossen Schwankungen in den Messergebnissen vorwiegend durch unterschiedliche Beladungszustände der Partikelfilter hervorgerufen werden. Um diese Beobachtung zweifelsfrei erklären zu können, bedarf es jedoch weiterer gezielter Untersuchungen zur Konditionierung und zur beladungsabhängigen Filtereffizienz. Die Wiederholbarkeit des Prüfverfahrens könnte erheblich erhöht werden, wenn mit der Konditionierung ein definierter Zustand des Filters erreicht werden könnte. Dies könnte zum einen durch das Erzwingen einer Filterregeneration durch Betreiben des Fahrzeuges bei hoher Last erzielt werden oder zum andern durch eine hohe Filterbeladung durch längere Fahrt bei niedriger konstanter Last.

Qualität CVS-Verdünnungsluft

Die Reproduzierbarkeit und Nachweisgrenze des Messverfahrens könnten durch strengere Anforderungen an die Qualität der CVS-Verdünnungsluft verbessert werden. Im derzeitigen Verordnungsentwurf wird die CVS-Verdünnungsluft nur durch die gültige Richtlinie 70/220/EWG spezifiziert. Der internationale PMP-Entwurf sieht dagegen darüber hinausgehende Anforderungen an die Filterung der CVS-Verdünnungsluft vor.

Spezifikation Verdampfungseinheit

Die von PMP-international übernommenen Anforderungen an die Verdampfungseinheit wurden erfüllt, haben sich aber in der Erprobung als sehr streng erwiesen. Aus Gründen der Praktikabilität und um Präzedenzfälle zu vermeiden, wird eine Lockerung vorgeschlagen, z.B. Penetration von Festpartikeln $>80\%$ statt $>90\%$ bei gleichbleibender Verdampfungseffizienz. Diese Änderung ist auch im internationalen PMP-Entwurf vorgesehen und würde daher auch eine Harmonisierung bedeuten.

Messung der Partikelkonzentration während der Regeneration

Im Rahmen dieses Projektes wurden keine Messungen während Fahrzyklen durchgeführt, in denen eine Regeneration des Filters auftrat. Da solche Messungen im Verordnungsentwurf jedoch vorgesehen sind, wird dringend empfohlen, Untersuchungen zur Regeneration durchzuführen. Konkrete offene Fragen für Messungen während der Regeneration betreffen die Höhe der Emission und ihre Wiederholbarkeit sowie die Effizienz der Verdampfungseinheit.

11 Danksagungen

Für die Messungen an der EMPA danken wir unseren Kollegen Peter Stettler, Philippe Novak und Jan Stilli für das Vorbereiten und Fahren der Fahrzeuge auf dem Rollenprüfstand und das Aufzeichnen und Auswerten von Daten. Bei der Durchführung der Messungen und bei der Auswertung der Daten wurden wir auch von Anna-Maria Forss, Daniel Schreiber und Ana-Marija Vasic unterstützt.

Bei den Messungen an der Abgasprüfstelle AFHB in Nidau konnten wir auf die tatkräftige Unterstützung von Pierre Comte und Jean-Luc Petermann zählen.

Die Kalibration der Partikelzähler wurde von Jürg Schlatter von METAS durchgeführt.

12 Definitionen, Abkürzungen

AFHB	Abgasprüfstelle der Fachhochschule Biel
CFPP	Cold Filter Plogging Point
CO	Carbonoxid, gaseous pollutant, Kohlenmonoxid
CPC	<i>Condensation Particle Counter</i> – Kondensationskernzähler
CVS	<i>Constant Volume Sampler</i> – Verdünnungssystem mit konstantem Gesamtfluss
DF	<i>Dilution factor</i> – Verdünnungsfaktor
DMA	<i>Differential Mobility Analyser</i> – Mobilitätsanalysator
DVPE	Dampfdruck
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i>
EDC	<i>European Driving Cycle</i> – Europäischer Fahrzyklus
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research)
EUDC	<i>Extra Urban Driving Cycle</i> – Überlandteil des NEDC
ECE-GRPE	Economic Commission for Europe – Working Party on Pollution and Energy
Heater	Heizteil des Thermodesorber
LRV	Luftreinhalteverordnung
mass-%	Massenprozent
NEDC	New European Driving Cycle (englische Bezeichnung für NEFZ)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus (bestehend aus ECE und EUDC)
nm	Nanometer = $1 \cdot 10^{-9}$ Meter
NO _x	Stickstoffoxid, bestehend aus NO and NO ₂
NSD	<i>Number Size Distribution</i> – Anzahlgrössenverteilung
PM	<i>Particulate Matter</i> – Partikelmasse
PMP	Particle Measurement Programme, Programm der ECE-GRPE
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
T.HC	<i>Total hydrocarbons</i> – Gesamtkohlenwasserstoffe (measured with FID according to regulations, group of gaseous pollutants)
TD	Thermodesorber
VOC	Volatile Organic Compounds
vol.-%	Volumenprozent
λ	Luft-Brennstoff-Äquivalenzverhältnis

13 Referenzen

- [Burtscher et al., 2001] Burtscher H., U. Baltensperger, N. Bukowiecki, P. Cohn, C. Huglin, M. Mohr, U. Matter, S. Nyeki, V. Schmatloch, N. Streit, and E. Weingartner, 2001: Separation of volatile and non-volatile aerosol fractions by thermodesorption: instrumental development and applications. *Journal of Aerosol Science*, 32, 427-442.
- [Hueglin et al., 1997] Hueglin C, Scherrer L, Burtscher H., 1997. «An accurate, continuously adjustable dilution system (1:10 to 1:10(4)) for submicron aerosols». *Journal of Aerosol Science*, 28, 1049-55
- [Koch et al., 1988] Koch W, Lödding H, Mölter W, Munzinger F., 1988. «Verdünnungssystem für die Messung hochkonzentrierter Aerosole mit optischen Partikelzählern», *Staub - Reinhaltung der Luft*, 48, 341-344
- [Mertes et al., 1995] Mertes S., Schroder F., Wiedensohler A., 1995. The particle-detection efficiency curve of the TSI-3010 CPC as a function of the temperature difference between saturator and condenser. *Aerosol Science and Technology* 23 (2): 257-261 Aug 1995
- [Mohr et al., 2003] Mohr, M., U. Lehmann, and G. Margaria, 2003: ACEA programme on the emissions of fine particulates from passenger cars (2), Part 1: Particulate characterisation of a wide range of engine technologies. *SAE Technical paper series* 2003-01-1889.
- [Mohr et al., 2000] Mohr, M., A. M. Forss, D. Steffen (2000). "Particulate emissions of gasoline vehicles and influence of the sampling procedure." *SAE Technical paper series* 2000-01-1137
- [Sem, 2002] Sem GJ., 2002. «Design and performance characteristics of three continuous-flow condensation particle counters: a summary», *Atmospheric Research*, 62, 267-94


14 Anhang

A Rollenprüfstand EMPA Dübendorf

Ein-Rollenprüfstand

Technische Daten	Bremsentyp	Wechselstrommotor
	Maximal fahrbare Geschwindigkeit	200 km/h
	Rollendurchmesser	122 cm
	CVS-System	Horiba CVS-9300
	Abgasmessanlage system	Horiba MEXA-7400
	zeitaufgelöst [g/s] : CO, CO ₂ , T.HC, NO _x	unverdünnt
	Sack [g/km] : CO, CO ₂ , T.HC, NO _x , CH ₄	verdünnt
	Messsystem für Filtermessung von Partikeln	Horiba PMU-9000
	Getrennte Tunnel für Diesel- und Ottomotoren	
<p>In den Messzellen werden Temperatur und Feuchtigkeit geregelt und ist mit zusätzlichen modernen Messinstrumenten und datenaufzeichnungssystemen ausgestattet.</p> <p>Die Kühlluft erfolgt durch ein Gebläse (55 kW), dessen Leistung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit geregelt wird.</p>		

B Treibstoffanalyse

 Caleb Brett		Intertek Caleb Brett (Schweiz) AG ehem. EMPA Betriebsstoffe			
Überlandstrasse 129 CH-8600 Dübendorf Fon:+41-1-823 43 33 Fax:+41-1-823 40 38 www.intertek.ch / info@intertek.ch					
Prüfbericht Nr.: 140277/01					Seite 1 von 2
Auftraggeber:			EMPA Abt 137 Überlandstrasse 129 8600 Dübendorf		
Prüfobjekt:	Benzin (Bleifrei 98)				
Eingangsdatum:	2004-05-05				
Verpackung:	1 Kanne				
Tank Nr.:	33				
Sachbearbeiter:	Herr Stettler				
Spezifikation:	SN 181162:2000 (Klasse A)				
Probenbezeichnung:	BUWAL Klima Wiederholung				
Analyse	Einheit	Resultat	Limiten		Prüfmethode
			Tief	Hoch	
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	748,5	720	775	ASTM D 4052
Dampfdruck (DVPE) bei 37,8 °C	kPa	(!) 62,1	45,0	60,0	EN 13016-1
Siedeanalyse (101,3 kPa)					ISO 3405
Siedebeginn	°C	35			
10 Vol.% verdampft bis	°C	50			
20 Vol.% verdampft bis	°C	56			
50 Vol.% verdampft bis	°C	81			
90 Vol.% verdampft bis	°C	147			
Siedeende	°C	183		210	
Rückstand	Vol.%	0,9		2	
Siedeverlust	Vol.%	0,9			
bis 70 °C verdampft	Vol.%	40,1	20,0	48,0	
bis 100 °C verdampft	Vol.%	61,7	46,0	71,0	
bis 150 °C verdampft	Vol.%	91,4	75,0		
Schwefel	mg/kg	3		150	EN ISO 20846
Abdampfrückstand					EN 26246
Abdampfrückstand	mg/100 mL	5			
nach n-Heptanbehandlung	mg/100 mL	0		5	
Olefine	Vol.%	1,6		18,0	ASTM D 1319
Aromaten	Vol.%	35,5		42,0	ASTM D 1319
Bleigehalt	mg/L	<1		5	EN 237
Benzol	Vol.%	0,8		1,0	EN 238
Sauerstoffgehalt	Mass.%	1,7		2,7	ASTM D 4815
Sauerstoffverbindungen					ASTM D 4815
Methanol	Vol.%	<0,1		3	
Ethanol	Vol.%	<0,1		5	
2-Propanol (IPA)	Vol.%	<0,1		10	
2-Methyl-1-propanol (IBA)	Vol.%	<0,1		10	
2-Methyl-2-propanol (TBA)	Vol.%	<0,1		7	
Ether (5 oder mehr C-Atome)	Vol.%	9,4		15	
andere sauerstoffhalt. org.	Vol.%	<0,1		10	
Verbindungen					
Sauerstoffverbindungen, total	Vol.%	9,4			ASTM D 4815
Elementaranalyse					ASTM D 5291
Kohlenstoff	Mass.%	85,24			
Wasserstoff	Mass.%	13,39			
Research-Oktanzahl (ROZ)		97,5	95,0		ISO 5164
Motor-Oktanzahl (MOZ)		87,7	85,0		ISO 5163

Intertek Caleb Brett

Intertek Caleb Brett (Schweiz) AG
ehem. EMPA Betriebsstoffe

Überlandstrasse 129 CH-8600 Dübendorf Fon:+41-1-823 43 33 Fax:+41-1-823 40 38 www.intertek.ch / info@intertek.ch

Prüfbericht Nr.: 140277/03

Seite 1 von 2

Auftraggeber:

EMPA
Abt 137
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf

Prüfobjekt: Dieselöl Greenergy
Eingangsdatum: 2004-09-15
Verpackung: 1 Kanne
Tank Nr.: 40
Ihr Auftrag vom: 2004-09-15
Sachbearbeiter: Peter Stettler
Spezifikation: SN 181190-1:2000 Klasse D
Probenbezeichnung: E-Faktoren

Analyse	Einheit	Resultat	Limiten		Prüfmethode
			Tief	Hoch	
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	827,1	820	845	ASTM D 4052
Viskosität bei 40°C	mm ² /s	2,470	2,00	4,50	ISO 3104
Flammpunkt	°C	71,0	55		ISO 2719
Cloudpoint	°C	-7			ISO 3015
CFPP	°C	(!) -9		-10	EN 116
Koksrückstand (10% Dest.)	Mass.%	<0,01		0,30	ISO 10370
Abdampfrückstand vor Heptanbehandlung	mg/100 mL	3			SOP 1818
nach Heptanbehandlung	mg/100 mL	1			
Wassergehalt (KF)	mg/kg	45		200	ASTM D 1744
Benzol	Vol.%	<0,1			EN 238
Schwefel	mg/kg	8		350	EN ISO 20846
Elementaranalyse					ASTM D 5291
Kohlenstoff	Mass.%	85,85			
Wasserstoff	Mass.%	14,04			
Heizwert					ASTM D 4809
Brennwert	MJ/kg	46,22			
Heizwert	MJ/kg	43,16			
Cetanzahl		53,5	51,0		ISO 5165

Siedeanalyse (101,3 kPa)					ISO 3405
Aufgefangen bei 180°C	Vol.%	0,8			
Aufgefangen bei 250°C	Vol.%	42,4		65	
Aufgefangen bei 340°C	Vol.%	94,0			
Aufgefangen bei 350°C	Vol.%	96,1	85		
Siedebeginn	°C	177			
10 Vol.% aufgefangen bis	°C	204			
50 Vol.% aufgefangen bis	°C	261			
90 Vol.% aufgefangen bis	°C	328			
95 Vol.% aufgefangen bis	°C	345		360	
HFRR-Test bei 60°C	µm	391		460	ISO 12156-1
Aromaten (mono-, di-, tri-)					IP 391
Monoaromaten	Mass.%	20,3			
Diaromaten	Mass.%	2,4			
Tri- und Tetraaromaten	Mass.%	0,4			

Bemerkung:

Die mit (!) gekennzeichneten Analysenpunkte liegen ausserhalb der geforderten Spezifikation.

C Kalibrierzertifikate CPC



Kalibrierzertifikat

Nr. 235-10007

<i>Gegenstand</i>	Partikelzähler : Condensation Particle Counter Hersteller : TSI Inc., MN, U.S.A. Modell : CPC 3022A (EMPA) Serie-Nr. : 555
<i>Auftrag</i>	Kalibrierung der Partikelkonzentration mit einem mono-dispersen Aerosol aus einer kontrollierten Verbrennung.
<i>Auftraggeber</i>	BUWAL Papiermühlestrasse 172, CH-3063 Ittigen
<i>Rückverfolgbarkeit</i>	Die angegebenen Messresultate sind auf nationale Normale und damit auf international abgestützte Realisierungen der SI-Einheiten rückverfolgbar.
<i>Datum der Kalibrierung</i>	09.06.2004
<i>Kennzeichnung</i>	metas-Kalibriermarke 09.06.2004

Wabern, 23. Juni 2004

Für die Messungen



Dr. Jürg Schlatter

Sektion Analytische Chemie



Jean-François Perrochet, Sektionschef

Dieses Dokument darf nur in vollständiger Form weitergegeben werden.

Seite 1 von 4

metas
Lindenweg 50, CH-3003 Bern-Wabern
Telefon +41 31 32 33 111, Telefax +41 31 32 33 210
www.metas.ch

Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung
Office fédéral de métrologie et d'accréditation
Ufficio federale di metrologia e di accreditamento
Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation

Eidg. Justiz- und Polizeidepartement
Département fédéral de justice et police
Dipartimento federale di giustizia e polizia
Federal Department of Justice and Police



Kalibrierzertifikat

Nr. 235-10008

<i>Gegenstand</i>	Partikelzähler : Condensation Particle Counter Hersteller : TSI Inc., MN, U.S.A. Modell : CPC 3010 (EMPA) Serie-Nr. : 70410281
<i>Auftrag</i>	Kalibrierung der Partikelkonzentration mit einem mono-dispersen Aerosol aus einer kontrollierten Verbrennung.
<i>Auftraggeber</i>	BUWAL Papiermühlestrasse 172, CH-3063 Ittigen
<i>Rückverfolgbarkeit</i>	Die angegebenen Messresultate sind auf nationale Normale und damit auf international abgestützte Realisierungen der SI-Einheiten rückverfolgbar.
<i>Datum der Kalibrierung</i>	9.06.2004
<i>Kennzeichnung</i>	metas-Kalibriermarke 09.06.2004

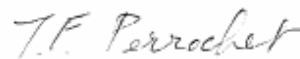
Wabern, 23. Juni 2004

Für die Messungen



Dr. Jürg Schlatter

Sektion Analytische Chemie



Jean-François Perrochet, Sektionschef

Dieses Dokument darf nur in vollständiger Form weitergegeben werden.

Seite 1 von 4

metas
Lindenweg 50, CH-3003 Bern-Wabern
Telefon +41 31 32 33 111, Telefax +41 31 32 33 210
www.metas.ch

Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung
Office fédéral de métrologie et d'accréditation
Ufficio federale di metrologia e di accreditamento
Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation

Eidg. Justiz- und Polizeidepartement
Département fédéral de justice et police
Dipartimento federale di giustizia e polizia
Federal Department of Justice and Police

D Zeitverläufe Partikelanzahlmessungen NEDC

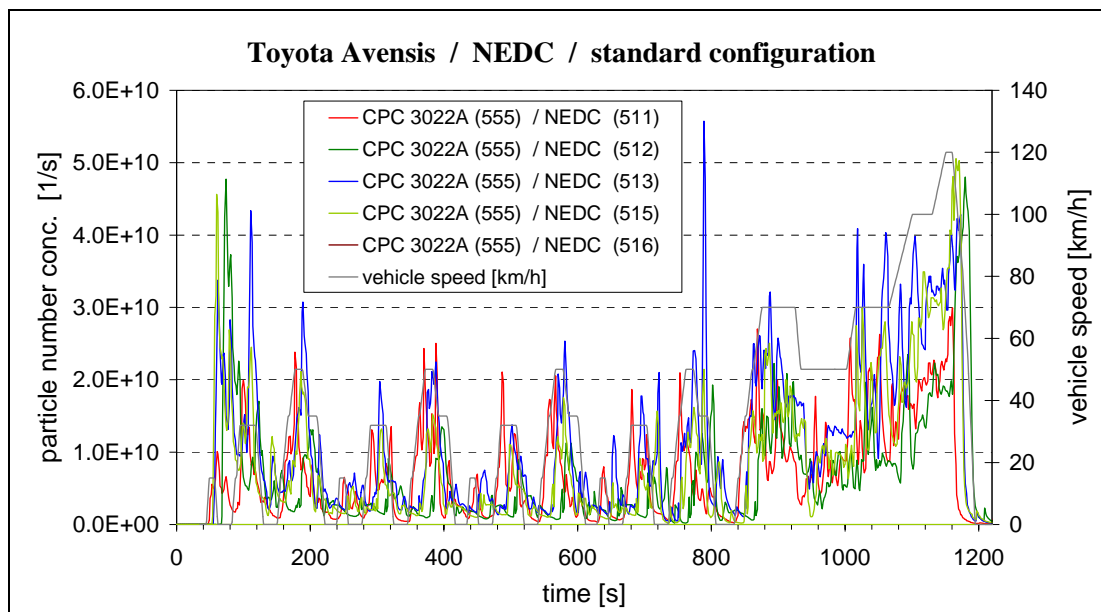


Abbildung 44: Sekundendaten Toyota Avensis

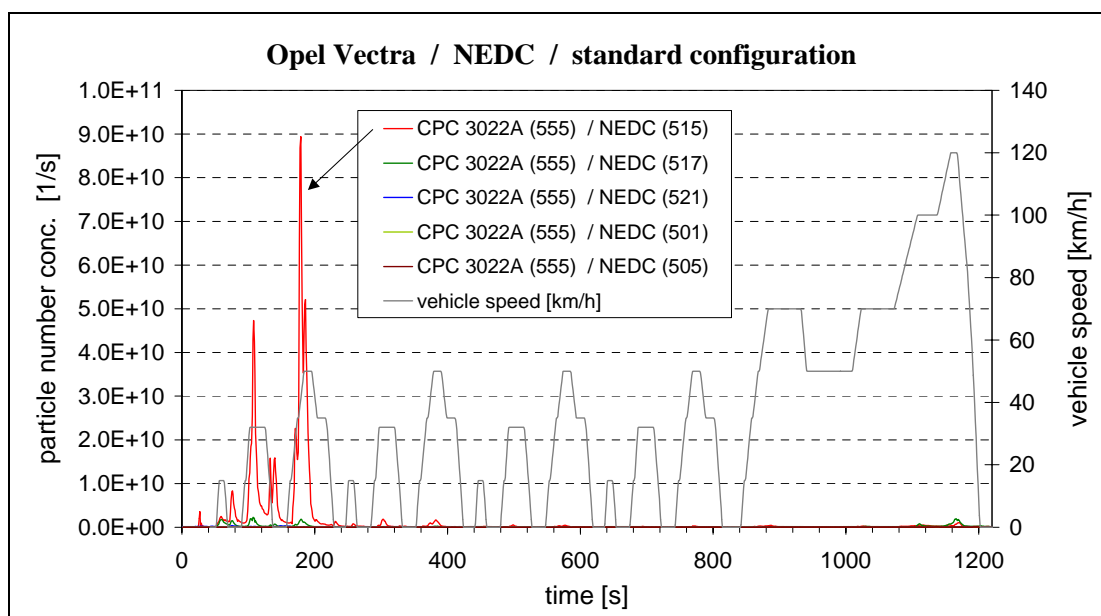


Abbildung 45: Sekundendaten Opel Vectra

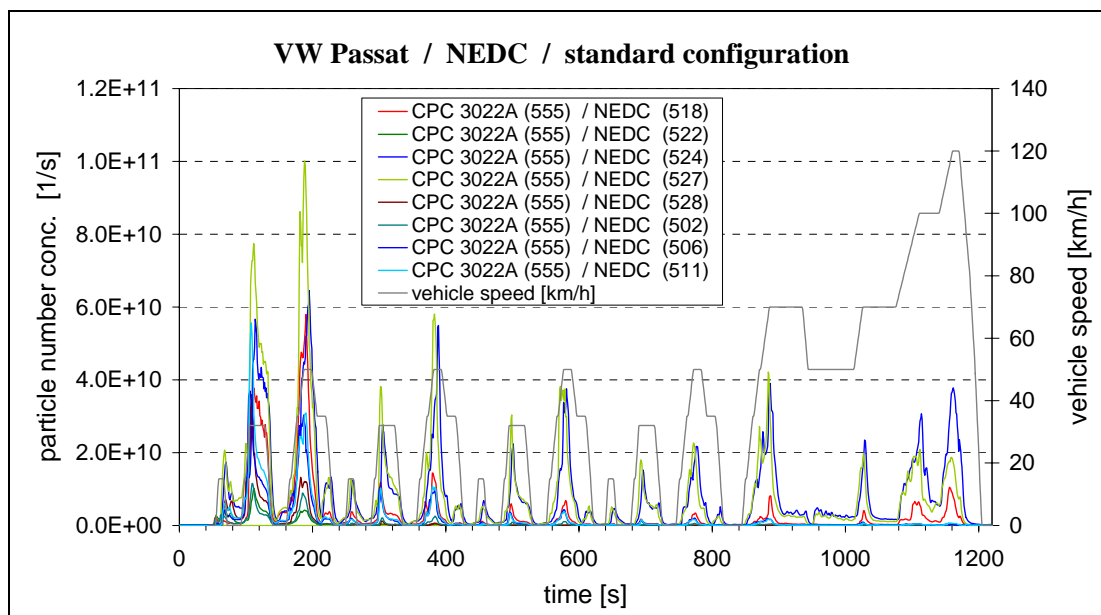


Abbildung 46: Sekundendaten VW Passat

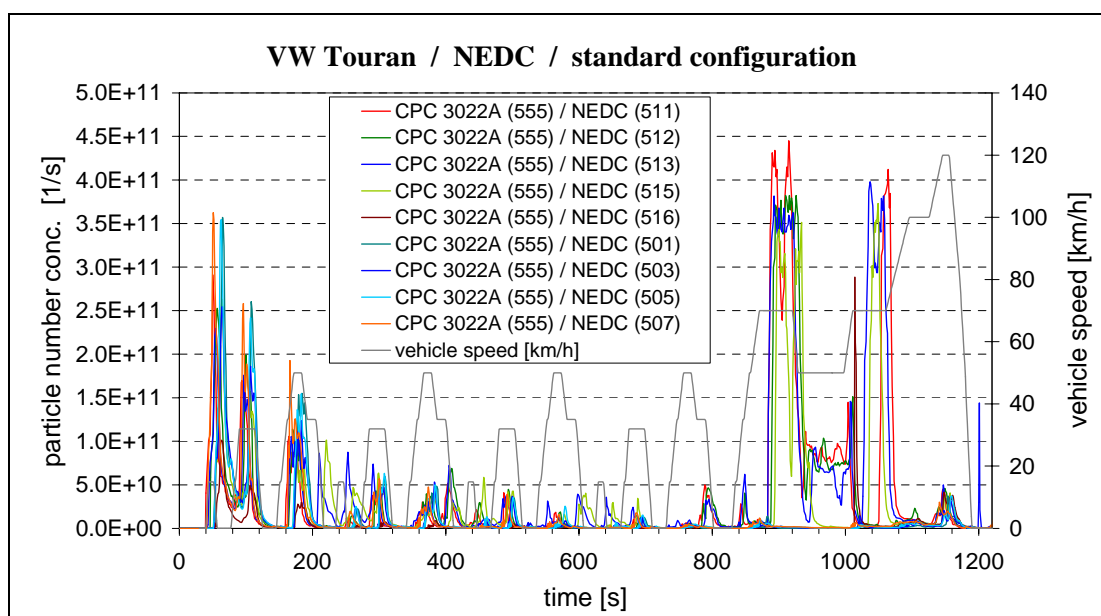


Abbildung 47: Sekundendaten VW Touran FSI

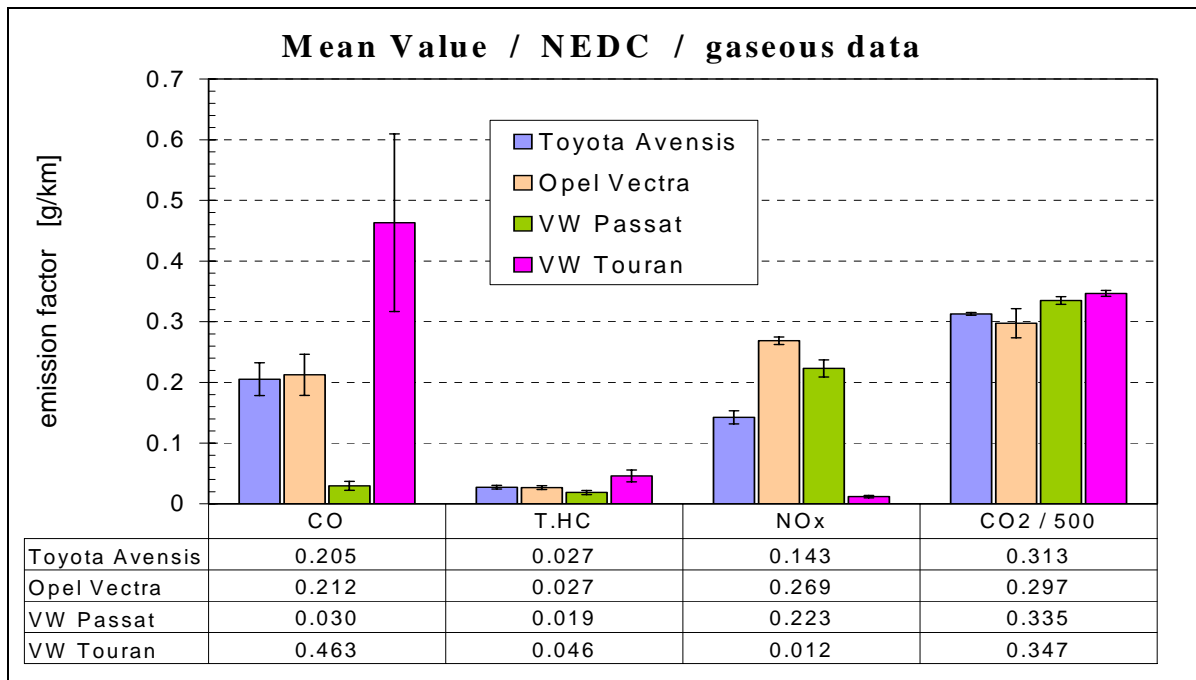
E Mittelwerte der gasförmigen Abgaskomponenten

Abbildung 48 : Mittelwerte der gasförmigen Abgaskomponenten

F Verordnungsentwurf BUWAL

**Verordnung über die Bestimmung der Partikelanzahl
an Personenwagen mit Selbstzündungsmotoren**

Entwurf vom 1.03.2004

Vorwort

Der vorliegende Verordnungsentwurf über die Bestimmung der Partikelanzahl an Personewagen mit Selbstzündungsmotoren wurde vom BUWAL unter Einbezug von interessierten Bundesstellen und Experten erarbeitet. Er lehnt sich an die ersten Ergebnisse der ECE-GRPE-Expertengruppe „Particle Measurement Programme (PMP)“ an. Die Praxiserprobung des Prüfverfahrens sowie ein schweizerischer Ringversuch sollen im Frühling und im Sommer 2004 stattfinden. Anschliessend soll der Entwurf überarbeitet werden.

Kontaktstelle im BUWAL

Sektion Verkehr

Dr. Manon Delisle
Leiterin Sektion Verkehr
Abt. Luftreinhaltung und NIS
CH-3003 Bern
Tel.: +41 31 323 15 05
Fax: +41 31 324 01 37
e-Mail: manon.delisle@buwal.admin.ch

Felix Reutimann
Sektion Verkehr
Abt. Luftreinhaltung und NIS
CH-3003 Bern
Tel.: +41 31 322 54 91
Fax: +41 31 324 01 37
e-Mail: felix.reutimann@buwal.admin.ch

Beteiligte Bundesstellen und Experten

Kurt Meyer, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Abteilung Strassenverkehr

Heinz Berger, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Abteilung Strassenverkehr

Dr. Jürg Schlatter, Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Analytische Chemie

Christian Bach, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Abteilung Verbrennungsmotoren und Feuerungen

Dr. Martin Mohr, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Abteilung Verbrennungsmotoren und Feuerungen

Dr. Jan Czerwinski, Hochschule für Technik und Informatik Biel (HTI Biel), Abgasprüfstelle

Dr. Heinz Burtscher, Fachhochschule Aargau (FH Aargau), Institut ISS, Windisch

Andreas Mayer, Firma Technik Thermische Maschinen (TTM), Niederrohrdorf

Dr. Markus Kasper, Matter Engineering AG, Wohlen

Verordnung über die Bestimmung der Partikelanzahl an Personenwagen mit Selbstzündungsmotoren

Entwurf

Zweck

Diese Verordnung legt das Verfahren zur Bestimmung der Partikelanzahl an Personenwagen mit Selbstzündungsmotoren fest und führt einen Partikelanzahl-Grenzwert von $10^{11}/\text{km}$ im Grössenbereich von 20 bis 500 nm ein. Dieser Grenzwert ergänzt den bestehenden Partikelmasse-Grenzwert der Richtlinie 70/220/EWG³⁾ bzw. dem ECE-Reglement Nr. 83 ab dem 1.1. 2006, bis die EU einen EURO 5-Grenzwert zur Partikelmasse und zur Partikelanzahl einführt.

Anwendungsbereich und Vorgehen

Dieses Verfahren gilt für alle Fahrzeuge der Klasse M1⁴⁾ mit Selbstzündungsmotoren und einem Gesamtgewicht bis 3,50 t.

Die Fahrzeuge werden durch eine schweizerische oder ausländische Prüfstation geprüft, welche für Abgasprüfungen gemäss den ECE-Reglementen oder EG-Richtlinien zuständig ist. Alle ausländischen Prüfberichte werden von einer anerkannten schweizerischen Stelle auf die Einhaltung des neuen Grenzwertes geprüft und mittels Zertifikat beglaubigt. Die Zulassung in der Schweiz wird nur aufgrund der Bescheinigung einer anerkannten schweizerischen Prüfstation gemäss Anhang 2 TGV⁵⁾ erteilt.

Begriffsbestimmungen

Die empirische⁶⁾ Messgrösse *TPN* (total particle number) ist die fahrstreckenbezogene Partikelanzahl gemäss dem hier beschriebenen Verfahren.

Die *Penetration P* durch ein Bauteil bezeichnet das Verhältnis zwischen der Partikelkonzentration hinter (c_a) und jener vor (c_i) dem Bauteil: $P = c_a / c_i$.

Der *Verdünnungsfaktor DF* bezeichnet das Verhältnis zwischen der Konzentration der Partikel vor (c_i) und jener hinter (c_a) der Verdünnung: $DF = c_i / c_a$

Der Durchmesser des Partikel bezeichnet den nach dem elektrostatischen Verfahren bestimmten Mobilitätsdurchmesser des Partikel.

³⁾ Richtlinie Nr. 70/220/EWG des Rates vom 20.3.1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Massnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen, zuletzt geändert durch die Richtlinie Nr. 2003/76/EG.

⁴⁾ Gemäss Anhang II Abschnitt A der Richtlinie 70/156/EWG des Rates vom 6.2.1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger, zuletzt geändert durch die Richtlinie Nr. 2001/116/EG.

⁵⁾ Verordnung vom 19. Juni 1995 über die Typengenehmigung von Strassenfahrzeugen (TGV).

⁶⁾ EURACHEM / CITAC Guide CG 4 (2000): Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition; Chapter 5, Step 1: Specification of the Measurand.

Durchführung der TPN-Messung

Die Messung der TPN erfolgt parallel zu der Messung der Partikelmasse gemäss Richtlinie 70/220/EWG anhand folgender Methodik:

Das Messsystem für die TPN besteht aus einem Verdünnungstunnel, einer Probenahmesonde, einer Verdünnungseinheit, einer Verdampfungseinheit und einem Partikelzähler.

Alle Teile des Messsystems vom Auspuff bis zum Messgerät, die in Kontakt mit dem unverdünnten und verdünnten Aerosol sind, müssen so ausgelegt sein, dass die Ablagerung von Partikeln minimiert wird.

Die einzelnen Komponenten des Messsystems dürfen für die Messungen nur mit den Einstellungen für Aerosolfluss, Gasfluss, Betriebstemperatur Verdampfungseinheit und Verdünnungsfaktor eingesetzt werden, für die sie kalibriert worden sind. Für Fahrzeuge mit kontinuierlich regenerierenden Abgasnachbehandlungssystemen muss ein Zyklus gemessen werden. Für Fahrzeuge mit periodisch regenerierenden Abgasnachbehandlungssystemen müssen mindestens zwei Messungen durchgeführt werden: Eine mit Regeneration und eine ohne Regeneration. Die Resultate der Messung bei Regeneration werden mit der vom Hersteller angegebenen Anzahl Zyklen zwischen zwei Regenerationen gewichtet.⁷⁾

a) Probenahme

Die Probenahme für die Bestimmung der TPN erfolgt auf gleicher Höhe wie die Probenahme für die Bestimmung der Partikelmasse⁸⁾ und ebenfalls in der Nähe der Tunnelmitte. Um eine gegenseitige Beeinflussung dieser beiden Probenahmestellen zu verhindern, muss der Abstand zwischen beiden mindestens 5 cm betragen. Der Abstand beider Entnahmestellen zu der Tunnelwand muss ebenfalls mindestens 5 cm betragen.

Die Probenahme muss so erfolgen, dass ein für den CVS-Tunnel repräsentativer Probenfluss des Aerosol-Verdünnungsluftgemischs erhalten wird.

Die Sonde muss aus einem Rohr mit einer zur Strömung zugewandten freien Öffnung bestehen. Es dürfen keine Bauteile (z.B. Blenden) die freie Anströmung behindern. Der Innendurchmesser des Rohrs muss mindestens 4 mm sein.

b) Probenaufbereitung

Die Abgasprobe für die Bestimmung der TPN wird mit einem konstanten Volumenstrom über eine Verdünnungseinheit und anschliessend über eine Verdampfungseinheit in das Messgerät geführt. Alle Flächen des Messsystems, die in Kontakt mit dem Aerosol sind, müssen aus elektrisch leitenden und geerdeten Material bestehen (mit Ausnahme des Adsorptionsmaterials im optionalen Adsorptionsteil). Die Abgasprobe darf in der gesamten Probenahmeleitung die Temperatur von 723 K (450 °C) nicht überschreiten.

Die Verbindungsleitung zwischen Eintritt der Partikel in die Probenahmesonde bis Eintritt Verdünnungseinheit hat eine Länge von höchstens 1000 mm und zwischen Eintritt in die Probenahmesonde bis zum Eintritt in das Messgerät eine Länge von höchstens 2500 mm.

⁷⁾ Für die Massenmessung bei Fahrzeugen mit periodisch regenerierendem System gilt ECE Reglement Nr. 83, Anhang 13; Rev.1/Add.82/Rev.2./Amend.1.

⁸⁾ Richtlinie 70/220/EWG, Anh. III, Ziffer 2.4, Anl. 5.

Die berechnete Verweilzeit zwischen Eintritt in die Probenahmesonde bis zum Eintritt in das Messgerät darf nicht länger als 10 s betragen.

Verdünnungseinheit

Die Verdünnungseinheit verdünnt das Abgas mit partikelgefiltrierter trockener Luft (HEPA-Filter, $RH < 10\%$). Der Verdünnungsfaktor beträgt mindestens 1 und höchstens 1000. Er muss konstant bleiben. Die empirische Streuung (*Standardabweichung der Sekundenwerte*) über die Dauer einer TPN-Messung darf 10 % des Verdünnungsfaktors nicht übersteigen.

Verdampfungseinheit

Die Verdampfungseinheit besteht aus einem beheizten Rohr mit einer Länge von mindestens 350 mm und einem freien inneren Durchmesser von mindestens 6 mm oder einer freien Querschnittsfläche von mindestens 80 mm^2 für konzentrische Rohre. Über die ganze Länge des Rohrs muss die Wandtemperatur geregelt sein und mindestens 473 K (200 °C) und höchstens 723 K (450 °C) betragen, gemessen 50 mm nach Eintritt, in der Mitte und 50 mm vor Austritt. Bei den Betriebsbedingungen für Temperatur und Aerosolfluss muss die Verweilzeit des Aerosols mindestens 0.5 s betragen.

Die Verdampfungseinheit kann zusätzlich mit einem Adsorptionsteil ergänzt werden. Die Leitung vom Heizteil zum Adsorptionsteil besteht aus einer maximal 50 mm langen, elektrisch leitenden Leitung ohne Ventile, Regler, usw. mit direktem Eingang in den Adsorptionsteil. Der Adsorptionsteil muss aus einem geraden Rohr mit einem freien inneren Durchmesser von mindestens 6 mm oder einer freien Querschnittsfläche von mindestens 80 mm^2 für konzentrische Rohre bestehen. Die Verdampfungseinheit einschliesslich des optionalen Adsorptionsteils muss während den Messungen unter Bedingungen arbeiten, die eine Reduktion von mindestens 99% von C40-Partikeln (Tetracontan) mit 30 nm im Durchmesser und einer Konzentration von mindestens 1000 cm^{-3} gewährleisten. Bei den gleichen Betriebsbedingungen muss die Penetration von Festpartikeln mit Durchmessern von 30, 50 und 100 nm gleich oder grösser als 90% betragen.

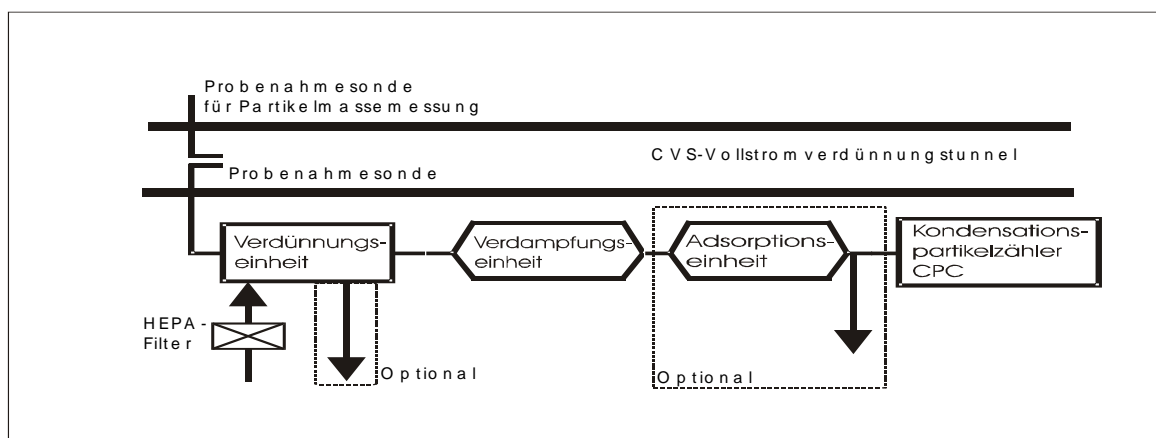


Abb. 1: Messaufbau zur TPN-Messung

c) Partikelzähler

Die Messung der Partikelkonzentration erfolgt mittels Kondensationspartikelzähler (CPC)⁹. Das Aerosol wird in diesem Gerät durch ein übersättigtes Alkoholdampfbad (n-Butanol) geleitet, um die Partikeln durch Kondensation des Dampfes auf der Oberfläche zu vergrössern. Anschliessend werden die Partikeln mittels einer optischen Detektion gezählt (Laser-Diode). Die für die TPN-Messung verwendete Alkoholfüssigkeit muss vor der Messung am Testtag neu eingefüllt werden.

Der CPC muss folgende Spezifikationen erfüllen:

Partikel mit einem Durchmesser von 10 nm oder grösser müssen zu mindestens 50%, Partikel grösser als 20 nm und kleiner 500 nm müssen zu mindestens 90% detektiert werden.

Messbereich: 0.1 bis 10⁴ Partikel/cm³

Die Messung muss nach dem Einzelpartikelzählverfahren erfolgen.

Ansprechzeit t₁₀ bis t₉₀: < 15 s

Messfrequenz: ≥ 0.5 Hz

Die automatische Datenverarbeitung des Gerätes darf nur eine Datenmittelung (gleitender Mittelwert) und Korrekturen zu Messtotzeit und Koinzidenz enthalten.

d) Auswertung der TPN-Messung

Die Auswertung der Messung der TPN erfolgt durch Aufsummierung der Messwerte des CPC nach folgender Formel:

$$TPN = \frac{V_{mix}}{d} \times DF \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=t1}^{tn} C_{CPCi}$$

Hierbei bedeuten:

TPN: Partikelanzahl, ausgedrückt in Partikel/km

V_{mix}: Volumen der verdünnten Abgase, ausgedrückt in L/Prüfung und korrigiert auf Normaltemperatur und Normaldruck (273.15 K; 101.325 kPa).

C_{CPC i}: gemessene Partikelanzahlkonzentration des CPC im Zeitintervall i bei Normalbedingungen (273.15 K; 101.325 kPa).

DF: Verdünnungsfaktor der Verdünnungsstufe.

d: dem Fahrzyklus entsprechende Strecke

t₁...t_n: Prüfzeit aufgeteilt in n Zeitintervalle (die Zeitintervalle müssen gleich lang sein und sich über 2 s oder eine kürzere Zeitspanne erstrecken).

n: Anzahl der Messwerte

⁹ VDI 3489 (1995) Messen von Partikeln; Methoden zur Charakterisierung und Überwachung von Prüfaerosolen; Kondensationskernzähler mit kontinuierlichem Durchfluss.

Periodische Kalibrierung des Messsystems

a) Kondensationspartikelzähler (CPC)

Der CPC muss auf ein nationales Normal¹⁰⁾ rückverfolgbar¹¹⁾ sein.

Der CPC muss alle 12 Monate kalibriert werden.

In der Regel erfolgt die Kalibrierung mit Feststoffpartikeln¹²⁾ mit einem Durchmesser von nominal 30 nm, 50 nm, 100 nm und 300 nm für mindestens fünf Konzentrationen, die möglichst gleichmässig über den Messbereich des CPC verteilt sind.

Die Fehlergrenzen¹³⁾ des CPC beziehen sich auf einen Mittelwert über mindestens 20 Messwerte. Sie haben bis zu einer Partikelkonzentration von 50 Partikel/cm⁻³ einen Wert von 5 Partikel/cm⁻³ und bei höheren Konzentrationen einen Wert von 10 % der Anzeige.

Die empirische Standardabweichung des CPC darf 20 % des Mittelwerts nicht übersteigen.

Verdünnungseinheit

Die Kalibrierung der Verdünnungseinheit muss mit einem rückverfolgbaren Kalibriergas und einem rückverfolgbaren Konzentrationsmessgerät durchgeführt werden.

Die Kalibrierung darf am Tag der Testmessung höchstens 6 Monate zurückliegen.

Die Kalibrierung muss durch eine Konzentrationsmessung am Auslass der Verdünnungseinheit erfolgen, während das Kalibriergas am Einlass zugeführt wird und die Konzentration des gemessenen Gases in der Verdünnungsluft vernachlässigbar ist.

Verdünnungseinheiten mit variablem Verdünnungsfaktor müssen bei mindestens fünf Verdünnungsraten kalibriert werden, die möglichst gleichmässig über den Bereich verteilt sind. Die gemessenen Verdünnungsraten müssen innerhalb $\pm 10\%$ der Nennwerte der Verdünnungseinstellungen liegen.

c) Verdampfungseinheit

Die Überprüfung der Penetration von Festpartikeln durch die Verdampfungseinheit darf höchstens sechs Monate zurückliegen. Die Überprüfung muss bei den gleichen Betriebsbedingungen für Temperatur und Aerosolfluss erfolgen wie bei der TPN-Messung. Es müssen drei Aerosole mit Feststoffpartikeln mit Durchmessern (häufigster Wert) von 30, 50 und 100 nm und einer minimalen Konzentration von 1000 Partikel/cm³ verwendet werden. Die Penetration muss durch die Messung der Partikelkonzentration vor und nach der Verdampfungseinheit einschliesslich der optionalen Adsorptionseinheit bestimmt werden und mindestens 90% für alle getesteten Partikelgrössen sein.

¹⁰⁾ International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM) (1993) ISO: Ziffer 6.1 (deutsche Übersetzung: Internationales Wörterbuch der Metrologie (1994), Beuth Verlag).

¹¹⁾ International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM) (1993) ISO: Ziffer 6.10.

¹²⁾ Als Feststoffpartikel werden oft NaCl-Partikel verwendet. Die Angabe von Durchmessern bezeichnen Beweglichkeitsdurchmesser.

¹³⁾ International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM) (1993) ISO: Ziffer 5.21.

Prüfungen vor der TPN-Messung

a) Am Tag der Messung

Am Tag der TPN-Messung muss die Funktion des CPC überprüft werden. Das Aerosol für die Prüfung muss aus Feststoffpartikeln mit einem häufigsten Durchmesser zwischen 30 und 150 nm¹⁴⁾ bestehen. Die Prüfung muss mit einer stabilen Konzentration zwischen 5'000 und 10'000 Partikel/cm³ ausgeführt werden.

Die Prüfung erfolgt nach einem der beiden folgenden Verfahren:

Der CPC muss durch einen Vergleich mit einem zweiten, rückverfolgbaren Partikelzähler mit gemäss dieser Vorschrift gleichen Spezifikation überprüft werden. Die gemessenen Konzentrationen dürfen nicht mehr als 20% von einander abweichen. Die CPC wird mit einem rückverfolgbaren Aerosol-Normal verglichen. Die Unsicherheit des Aerosol-Normals darf 10 % (Standardabweichung) nicht übersteigen. Die Abweichung zwischen der Messung mit dem CPC und dem Aerosol-Normal darf 20 % des Messwerts nicht übersteigen.

Am Tag der TPN-Messung muss die Funktion des Partikelmesssystems überprüft werden. Das Partikelmesssystem bestehend aus der Verdünnungseinheit, der Verdampfungseinheit und dem CPC muss eine Konzentration von weniger als 1 Partikel/cm³ messen, wenn ein HEPA-Filter am Einlass von der Verdünnungseinheit montiert ist. Dabei muss die Temperatur der Verdampfungseinheit mindestens 50°C höher sein als die während des Emissionstests eingestellte Temperatur.

b) Vor jeder TPN-Messung

Folgende Funktionstests müssen vor jeder Messung durchgeführt werden:

Das Partikelmesssystem bestehend aus der Verdünnungseinheit, der Verdampfungseinheit und dem CPC muss eine Konzentration von weniger als 1 Partikel/cm³ messen, wenn ein HEPA-Filter am Einlass von der Verdünnungseinheit montiert ist. Die Verdampfungseinheit muss dabei auf Betriebstemperatur sein.

Der CPC muss eine Konzentration von mehr als 1'000 Partikel/cm³ messen, wenn ein entsprechendes Aerosol zugeführt wird.

Die Flussrate des CPC muss überprüft werden.

Anhang

HEPA-Filter: Filter, der die TPN eines 0.3 µm Dioctylphthalate-Aerosols um mindestens 99.87% reduziert.

HEPA-Filter: Filter mit einer Abscheiderate von mindestens 99.95% im Minimum der partikelgrössenabhängigen Abscheidekurve.

HEPA-Filter: Filter der Klasse H13 der EN1822 oder besser.

¹⁴⁾ Von der Gesamtanzahl der Partikel müssen > 90 % innerhalb des Durchmesserintervalls liegen.