

Abgaspartikelmessmethoden und Auswirkung der Abgasnachbehandlung auf die Partikelanzahlemissionen

Mario Ivanisin

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG, Liebenauer Hauptstr. 317, 8041 Graz

Oliver F. Bischof, Axel Zerrath, Thomas Krinke

TSI GmbH, Partikelmesstechnik, Neuköllner Str. 4, 52068 Aachen

Bernhard Heiden

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, Inffeldgasse 21a, 8010 Graz,

Abstract

Ausgehend von den Grundlagen der Partikelmessmethoden für Durchmesser, Anzahl und Masse und einer Darstellung der physikalischen Wirkprinzipien werden die wichtigsten Messgeräte zur Bestimmung dieser Partikelemissionen vorgestellt. Im Einzelnen sind dies für die Anzahlverteilungsbestimmung das SMPS, EEPS und das ELPI. Für die Massenbestimmung werden das klassische TEOM und neuere Technologien wie PASS (Ruß) und DMM vorgestellt. Darüber hinaus wird auf die für die Partikelmesstechnik wichtige Abgasprobenverdünnung eingegangen. Anschließend werden einige Anwendungsfälle und die Ergebnisse der Messung der motorischen Partikelemissionen vorgestellt.

Einführung

Die Untersuchung der motorischen Partikelemissionen und einer dafür geeigneten Messtechnik hat in den letzten Jahren, nicht zuletzt durch immer schärfere gesetzliche Bestimmungen für die Partikelanzahlmessung und -regulierung, an Bedeutung dazu gewonnen [1,2,3,4]. Epidemiologische und medizinische Untersuchungen lassen schädliche Auswirkungen der Partikel auf Gesundheit von Menschen, Tieren und auf die Umwelt vermuten [5]

Moderne Dieselmotoren mit effizienten Abgasnachbehandlungssystemen reduzieren die Partikelemission schon heute auf das Niveau der Ende des Jahrzehnts zu erwartenden strengen Grenzwerte, die aller Voraussicht nach weit unter denen von EURO 4 für PKW und EURO V liegen werden. Bei einer weiteren Reduzierung der gegenwärtigen Grenzwerte für die Partikelmassenemission bis zu einem Faktor 10 des heutigen Niveaus [1] erreicht die gravimetrische Massenmessung allerdings ihr Limit vor allem in Bezug auf Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen, während die Partikelanzahlmessung noch weit aus geringere Konzentrationen – bei alleiniger Zählung bis zu 1 Partikel/cm³ – reproduzierbar nachweisen kann. Weitere Möglichkeiten der Partikelanzahlmessung ergeben sich daraus, dass im Gegensatz zur integralen gravimetrischen Massenbestimmung nur über den kompletten Testzyklus mit einigen anzahlbasierenden Methoden eine Echtzeitmessung möglich ist, die Aussagen über die Partikelemission bei veränderlichen Bedingungen wie unterschiedlichen Lastpunkten gibt. Außerdem liegt ein erheblicher Teil der Partikelanzahl, aber eben nicht der Partikelmasse, in jenem Feinstbereich, der nur mit einer Partikelanzahlmessung bewertet werden kann. Die Bedeutung dieses Feinstbereiches lässt sich damit verdeutlichen, dass 1.000.000 Partikel mit einer Größe von 10 nm unter Annahme der Einheitsdichte dieselbe Masse wie ein einzelnes 1 µm großes Partikel besitzen. Hieraus ergibt sich ein höherer Wirkungsbezug der Partikelanzahl auf Gesundheitseffekte. Nur zählende Messverfahren sind in der Lage, diese Partikel mit ausreichender Empfindlichkeit zu erfassen.

Das GRPE *Particle Measurement Programme* (PMP) unter Schirmherrschaft der *United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)* war als Expertengruppe beauftragt einen neuen Ansatz zur Messung der Partikelemission im Fahrzeugabgas auszuarbeiten. Die bisher gültige gravimetrische Methode sollte durch eine neue Metrik ergänzt oder abgelöst werden: „...develop a new measurement system that could replace or complement the existing particulate mass measurement system and to make a proposition to regulatory

authorities, since ultrafine particles should be the primary concern of health impacts“. Im Zeitraum vom März 2001 bis März 2003 wurden dazu 21 Kandidatensysteme zur Messung niedriger Partikelemissionen ausführlich evaluiert und anschließend in einem zweiwöchigen Messprogramm getestet und validiert (PMP Phase 2). Die Partikelanzahlmessung mittels Kondensationspartikelzähler (CPC) zeigte dabei eine sehr hohe Messempfindlichkeit auch für geringste Partikelkonzentrationen nach einem Diesel-Partikel-Filter [6]. Als Ergebnis dieses Messprogramms wurde die Empfehlung ausgesprochen eine modifizierte gravimetrische Messung der Partikelmasse mit einer Partikelanzahlmessung bestehend aus CVS-System, Thermoverdünnung und CPC flankierend zu ergänzen [7].

Die Partikelkonzentrationsmessungen reagieren sehr empfindlich auf die Probenaufbereitung [4,8,9]. Ein wesentliches Problem zur Erreichung guter Wiederholbarkeiten der Messergebnisse stellen die so genannten Nukleationspartikel dar, die im wesentlichen aus flüchtigen Substanzen bestehen und keinen festen Kohlenstoffkern besitzen. Die Anzahl der Nukleationspartikel kann bei entsprechenden Bedingungen um mehr als eine Größenordnung über der Anzahl fester Partikel liegen. Da die Bildung der Nukleationspartikel von vielen Randbedingungen, wie etwa der Abgastemperatur, der Verdünnungsrate, dem Ort der Verdünnung und Probenahme und der Abgaszusammensetzung abhängt, ist das Auftreten von Nukleation heute weder am Prüfstand noch in realen Fahrten in der Atmosphäre sicher vorhersagbar bzw. reproduzierbar. Durch die geeignete bzw. ungeeignete Wahl der Testbedingungen (Probenaufbereitung) kann sich die Partikelanzahl (bedingt durch die Kondensationspartikel) praktisch beliebig verändern [3,4].

Ein gangbarer Weg wäre daher die Eliminierung von Nukleationspartikeln aus dem zu messenden Abgas, da die Anzahl der Festpartikel einen gut reproduzierbaren Wert darstellt und auch gesundheitlich wesentlich relevanter als die Nukleationspartikel sein dürfte [10, 11].

1 Partikel, Partikelentstehung und Russbildung

Partikel sind kleine Teilchen, die suspendiert in einem Trägergas in Erscheinung treten. Sie sind Luftschadstoffe, wenn sie so klein sind, dass sie in Gasen im Schweben bleiben und dem Organismus und der Umwelt schaden können. Je nach Art der Partikel spricht man von Staub (Feststoffpartikel, Faserstäube), Rauch (Feststoffe aus thermischen Prozessen – auch Ruß) oder Nebel (flüssige Stoffe, Kondensate).

Bei motorischen Verbrennungsprozessen entstehen die Partikel im Abgas, die nach ihrer Größe in drei Größenklassen (3-modale Verteilung) unterteilt werden: Nukleations-Modus, Akkumulations-Modus, Grobpartikel:

Nukleationsmodus: Als Nuklei werden Teilchen, die unmittelbar nach der Bildung aus der Gasphase durch Nukleation entstehen, bezeichnet. Sie bestehen im Wesentlichen aus flüchtigen Substanzen und besitzen keinen festen Kohlenstoffkern ($d < 30\text{-}50\text{nm}$). Bei der Messung der Partikelanzahl- und Größenklassenverteilungen treten, z.B. durch Kondensation im Abgas, manchmal sehr ausgeprägte Nukleationsmodi auf. Falls kein ausgeprägter Nukleationsmodus vorkommt, sind wohl auch Partikel in dieser Größenklasse vorhanden, aber es handelt sich in dem Fall nur um Partikel mit festem Kohlenstoffkern, die nicht aus den kondensierbaren Verbrennungsprodukten entstanden sind. Im Falle der dieselmotorischen Verbrennung liegen die Festpartikel im Nukleationsmodus in relativ geringer Anzahl vor.

Akkumulationsmodus: Agglomerate kommen im Abgas in typischen Größen um 40-120 nm vor (typische Rußagglomerate). Sie können an Oberflächen beliebig groß sein. Falls bei der Messung der Partikelgrößenverteilungen der motorischen Verbrennung neben dem Akkumulationsmodus auch ein mehr oder weniger ausgeprägter Nukleationsmodus vorkommt, kann eine solche Verteilung als bimodal bezeichnet werden.

Coarse-Modus: Grobpartikel entstehen bei Verbrennungsprozessen dann, wenn z.B. Rußwandablagerungen von der Abgasanlage wieder in den Abgasstrom gelangen, oder durch Verkokungsprozesse.

Die Partikelgrößenverteilung eines Dieselmotors mit ausgeprägtem Nukleationsmodus zeigt eine hohe Anzahlkonzentration bei geringer Masse bis ca. 40-50 nm und eine hohe Masse bei kleiner Anzahl im Bereich von ca. 100-1000 nm. Eine Korrelation von Anzahl und Masse ist in einem solchen Fall daher nicht möglich.

Bei den Verbrennungsmotoren emittierte Partikel entstehen sowohl während des Verbrennungsprozesses im Brennraum (vor allem Ruß) als auch durch Nukleation im Abgassystem (aus übersättigten Dämpfen).

Die Rußbildung und die Oxidation stehen in engem Zusammenhang mit den komplexen Vorgängen der dieselmotorischen Verbrennung (Kraftstoffeinspritzung und Zerstäubung, Strahlausbreitung, Strahlerfall, Luftzufuhr, Verdampfung, Zündung, vorgemischte Verbrennung, Diffusionsverbrennung). Der Russ wird vermehrt in Form sehr kleiner Koagulationspartikel gebildet. Diese Rußpartikel entstehen aus den auf molekularer Basis generierten Primärpartikeln.

Bei den dieselmotorischen Verbrennungsvorgängen wird der Kraftstoff in die verdichtete Luft eingespritzt. Im Regelfall bildet sich bis zum Zündzeitpunkt ein gasförmiges Kraftstoff-Luft Gemisch.

Die Mechanismen der Rußbildung aus der Gasphase stehen mit sehr komplexen reaktionskinetischen Vorgängen in Verbindung, die nach wie vor noch nicht vollständig geklärt sind.

Bei der Rußbildung kommt es zu verschiedenen, teils gleichzeitigen chemischen und physikalischen Reaktionen. Das Produkt dieser Reaktionen sind die typischen dieselmotorischen Partikel, die im Abgas zu finden sind [12, 13]

Die Rußbildung kann nach der Acetylentheorie [3] in vier wesentliche Prozesse und anschließende, teilweise parallel laufende, Oxidation unterteilt werden [14]:

- 1) Bildung erster polyzyklischer, aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK).
- 2) Planares Wachstum der PAK.
- 3) Rußkeimbildung durch Formung von dreidimensionalen Clustern aus den PAK.
- 4) Wachstum der Rußkeime zu Rußpartikeln durch Oberflächenwachstum und Koagulation.

Parallel zu diesen Mechanismen treten die Reaktionen zur Verbrennung des Kraftstoffs in die Hauptreaktionsprodukte auf. Die Oxidation bereits generierter Rußpartikel, ist ein maßgeblicher Prozess in der zweiten Phase der dieselmotorischen Verbrennung, in der die gebildeten Rußteilchen durch die Vermischung der Verbrennungsprodukte mit Verbrennungsluft in sauerstoffreiche Umgebung transportiert werden. Mehr als 80% der gebildeten Rußpartikel werden während des fortlaufenden Arbeitstaktes im Brennraum wieder oxidiert.

Die bei hohen Temperaturen dampfförmig vorliegenden Verbrennungsprodukte bieten die Möglichkeit (beim Vorliegen eines übersättigten Dampfes) der weiteren Partikelbildung durch Nukleation. Der Massentransfer der kondensierbaren Verbrennungsprodukte von der Gas- zur Partikelphase basiert auf zwei Mechanismen:

Heterogene Nukleation: Üblicherweise kondensieren die in der Dampfphase vorliegenden Moleküle an kleinen Teilchen oder Ionen, die als Kondensationskeime dienen. Die heterogene Nukleation tritt in der Regel viel häufiger auf, da sie bei niedrigeren Übersättigungen einsetzt.

Homogene Nukleation (oder Keimbildung): Nukleation von Dampf in Abwesenheit fremder Substanzen. Zur Bildung von Partikeln durch homogene Nukleation wird ein viel höheres Sättigungsverhältnis benötigt. Begünstigt wird diese Art der Kondensation auch durch das Fehlen von Keimen. Dadurch wird das Einsetzen der heterogenen Nukleation weitgehend unterbunden.

2 Abgaspartikelmeßmethoden

2.1 Gesetzlich vorgeschriebene gravimetrische Verfahren

Unter Partikelemission eines Fahrzeuges versteht man die mit dem Abgas emittierte Gesamt- Partikelmasse. Bei dem gesetzlich vorgeschriebenen gravimetrischen Verfahren (EU-Richtlinie 88/77/EWG) wird das Abgas in einem Verdünnungstunnel verdünnt und abgekühlt. Die Probe wird durch einen Glasfaserfilter mit definiertem Abscheidegrad geleitet. Je nach Abgaszusammensetzung können dabei die Taupunkte flüchtiger Inhaltsstoffe bereits unterschritten und das Ergebnis durch Kondensation beeinflusst werden [15].

Die Bestimmung der Masse erfolgt durch Wägung nach vorgeschriebener Konditionierung (Temperatur, Feuchte). Die nach diesem weltweit gültigen gesetzlichen Verfahren ermittelte Partikelgesamtmasse (PM) ist nicht weiter spezifiziert bezüglich der chemischen Zusammensetzung und der Größenverteilung der Partikel. Sie ist weiter durch das Probenabnahmeverfahren stark beeinflusst durch Kondensationsvorgänge im Abgas, da bei Anwesenheit von Schwefel im Kraftstoff der Säuretaupunkt bereits oberhalb von 100°C unterschritten wird [16].

Die heutige Gesetzgebung in Europa und den USA schreibt für die LKW- und PKW- Zertifizierung die Benutzung einer CVS-Anlage als das Bezugsverfahren für Partikelmassen-Emissionsmessung vor. Unter anderem sind eine konstante Strömungsgeschwindigkeit und eine Temperatur unter 52°C bei der Partikelsammelstelle vorgeschrieben. Die US 2007 Regelung für LKW Motoren [17,18] erfordert eine strengere Einhaltung der Temperatur von $47\pm 5^\circ\text{C}$ an der Partikelsammelstelle. Dies kann zusätzliche Anforderungen an die PM Messpraxis bringen, wie z. B. Steuerung der Verdünnungslufttemperatur.

Die Vorteile der Partikelmassenmessung durch die Verdünnung des Abgases mittels CVS liegen auf der Hand: Abgasverdünnung verringert die Gefahr der Nachreaktionen und der Wasserkondensation in der Probe. Druck- und Temperaturunterschiede des Rohabgases werden ausgeglichen.

Einige Abgaskonditionierungsparameter in der CVS-Anlage können jedoch nicht kontrolliert werden. Vor allem ist das Verdünnungsverhältnis, das das Verhältnis von verdünntem zu unverdünntem Abgas darstellt, nicht regulierbar. Zusammen mit der Temperatur hat das Verdünnungsverhältnis einen wesentlichen Effekt auf die Qualität der angesammelten Probe, weil es das Verhalten der Kondensate (organisches Material, Sulfate Nitrate und Wasser) beeinflusst. Das wurde bereits in einigen wissenschaftlichen Arbeiten dargestellt: eine isotherme Verdünnungsratenzunahme bewirkt, vor allem durch den geringeren Anteil der Kondensate in der Probe, eine geringere Masse der angesammelten Partikel [17,19]. Die Zunahme der Verdünnungsrate von 7:1 bis 29:1 bewirkt eine Filtertemperaturverschiebung von 45°C zu 33°C, was sich mit einer Zunahme der Probenmasse in der Höhe von 25% im mittleren Lastbereich auswirkt [17,20]. So gesehen ist die gesammelte Partikelmasse eine Funktion der Verdünnungsrate. Die Schwankungen in der CVS- Anlage sind für die Partikelmassenunterschiede in der Höhe von bis zu 20% verantwortlich [17,21,22].

So gesehen können unterschiedliche CVS-Anlagen zu Abweichungen in gemessener Partikelmasse führen, selbst wenn sie völlig den Gesetzesanforderungen entsprechen.

Neben den schon erwähnten gibt es zusätzliche Einschränkungen in der Anwendung des CVS- Verfahrens. Insbesondere ist die Ausführung und der Zustand des Verbindungsrohres vom Auspuffausgang zum Verdünnungstunneleingang eine bedeutende Quelle für Messfehler. Solche Messfehler entstehen bedingt durch veränderliche Temperaturbedingungen. Temperaturveränderungen und die Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten können zur Ablösung der Anlagerungen an den Wänden des Verbindungsrohres führen [17,23].

2.2 Wesentliche Messgeräte zur Partikelanzahlmessung

2.2.1 Die Messung der Gesamtanzahl mit Kondensationspartikelzählern (CPC)

Kondensationspartikelzähler (CPC, früher auch: Kondensationskernzähler) ermöglichen die Messung sowohl feinsten Nanopartikel als auch der größeren Partikel im Akkumulationsmodus, die mit anderen, optischen Methoden gar nicht oder nicht zweifelsfrei detektiert werden können. Dazu werden die Partikel im CPC durch Aufkondensieren einer Arbeitsflüssigkeit stark vergrößert und anschließend im Optikkblock mittels Streulichtmessung gezählt. Diese Messmethode findet zur Partikelanzahlmessung in der Atmosphäre bereits seit frühen Studien von J. Aitken im Jahre 1888 ihre Anwendung. Zu diesem Zeitpunkt wurden allerdings noch eine andere Kondensationstechnik und die Detektion mit einem Mikroskop kombiniert [24]. CPC-Messgeräte mit kontinuierlichem Durchfluss haben seit Einführung eines zuverlässig arbeitenden kommerziellen Gerätes [25] im Jahr 1978 breite Verwendung gefunden und werden seitdem im Forschungsbereich auch schon zur Bestimmung der Partikelanzahl im Fahrzeugabgas verwendet [26].

Das genaue Funktionsprinzip von CPCs (Abbildung 1) ist, dass auch feinste Partikel durch entsprechende Sättigungsbedingungen aktiviert und zum Wachsen gebracht werden. Dazu werden die in ihrem Trägergas suspendierten Partikel zunächst in eine beheizte Strecke geleitet, deren Wände mit einem saugfähigen Material ausgekleidet sind, die als Saturator bezeichnet wird. Im Saturator erfolgt die Sättigung mit einer verdampfbaren Arbeitsflüssigkeit, im allgemeinen n-Butanol. In der anschließenden von außen gekühlten Strecke, die man als Kondensator bezeichnet, kondensiert der Dampf auf den Partikeln und bildet aus diesen Tropfen einer charakteristischen Größe im Bereich von einigen Mikrometern Durchmesser. Die Tropfengröße ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Kondensationsstrecke, aber in jedem Falle in einem Bereich in dem eine optische Detektion leicht möglich ist. Die Bestimmung der Partikelanzahl erfolgt über die Zählung der Streulichtimpulse beim Durchgang der einzelnen Tropfen durch ein definiertes Messvolumen. Als Lichtquelle wird zumeist ein einfacher Diodenlaser und als Detektor eine Photodiode verwendet. Zu beachten ist, dass CPC zu den direkten Zählverfahren gehören, die im Alleinbetrieb – also ohne vorgeschaltete Größenklassiereinheit – die Partikelanzahl ohne eine Aussage zur Partikelgröße ermitteln.

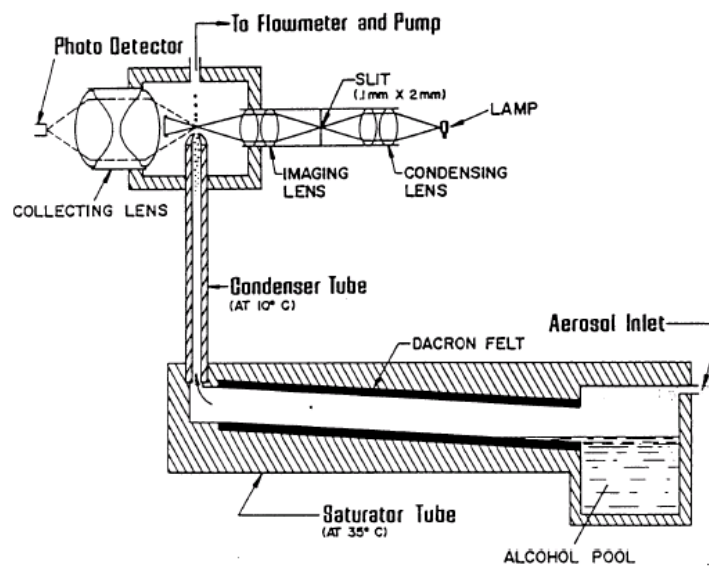


Abbildung 1: Beispiel für den Aufbau eines CPCs [26]

Eine Untersuchung der Genauigkeit von neun CPCs identischer Geräteausführung mit direkter Aerosolführung durch den Befeuchter (CPC 3010, TSI Inc.) unterschiedlichen Baujahrs und Zustandes zeigte hinsichtlich der Partikelanzahlmessung eine Abweichung von +/- 2% zwischen allen bewerteten Geräten [28].

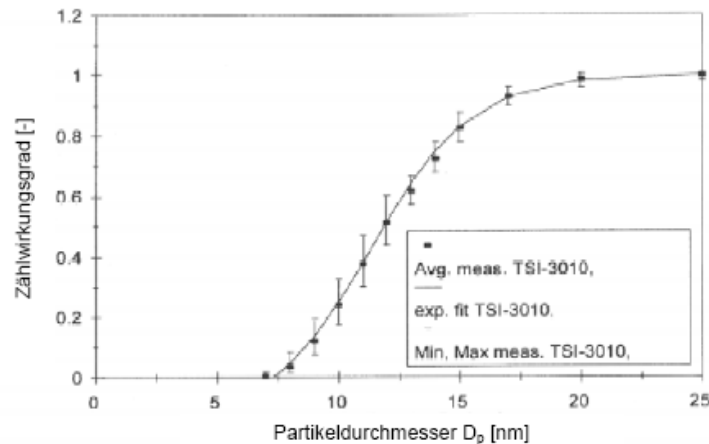


Abbildung 2: Mittelwerte der Zählwirkungsgradkurve für neun CPCs identischer Ausführung (CPC 3010, TSI) mit Fehlerbalken [28]

Die für die Kalibrierung von CPCs verwendete Methode besteht darin mit Hilfe eines Elektrospray-Aerosolgenerators streng monodisperse, einfach geladene Partikel zu erzeugen und diese mit einem Nano-SMPS-System zu verifizieren. Über ein präzises Aerosolektrometer lässt sich die Partikelanzahl bestimmen und mit den Werten des CPCs vergleichen [29].

2.3 Messgeräte zur Bestimmung der Anzahlgrößenverteilung von Abgaspartikeln

2.3.1 Das SMPSTM-System (Elektrisches Mobilitätsspektrometer)

Als *Scanning Mobility Particle Sizer* (bzw. SMPSTM) bezeichnete man vergleichsweise schnell messende elektrische Mobilitätsspektrometer, die eine Messung der Partikelanzahl und von hochaufgelösten Partikelgrößenverteilungen im Bereich von 2,5 bis 1.000 nm ermöglichen. Selbst ein schnell-scannendes Verfahren benötigt für eine komplette Größenbestimmung jedoch minimal 30 bis 60 Sekunden, so dass eine Eignung vor allem für Messungen unter stationären Bedingungen gegeben ist.

Die elektrische Mobilitätsmethode wurde seit den frühen Arbeiten von Rohmann zur Bestimmung der Größenverteilung von Aerosolen verwendet [30]. Liu und Pui waren die ersten die einen sogenannten Differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) mit einem bipolaren Auflader kombinierten [31], was wenig später zum ersten elektrischen Mobilitätsspektrometer führte [32]. Das erste *Differential Mobility Particle Sizer* bzw. DMPS wurde von TSI Incorporated vor 30 Jahren vorgestellt und nach Verfügbarkeit eines schnelleren, scannenden Messmodus 1993 in das SMPS überführt. Die Verwendung von DMPS bzw. SMPS für Forschungszwecke zur Messung der Partikelgröße im Abgas von Fahrzeugen erfolgte jeweils unmittelbar nach deren kommerzieller Einführung [26]. Das SMPS hat die ältere diskontinuierliche, also schrittweise oder sequenziell, messende Methode weitestgehend abgelöst und auch deren Probleme in Bezug auf sehr lange Messzeit, geringe Größenauflösung und lückenhafte Daten vor allem bei geringen Konzentrationen wie nach einem Diesel-Partikel-Filter überwunden. Es ist heutzutage sowohl für wissenschaftliche Studien als

auch für die industrielle Entwicklung beispielsweise zur Charakterisierung von Diesel-Partikel-Filtern unter stationären Bedingungen etabliert.

Das Funktionsprinzip des SMPS beruht darauf, dass die elektrostatische Klassierung zur Größenbestimmung der Partikel mit einem CPC zur Zählung der Partikel je Größenklasse kombiniert wird. Im Einzelnen wird die Partikelemission dem SMPS – bei Abgasmessungen üblicherweise nach einer entsprechenden Probenaufbereitung – ohne lange Verweilzeit zugeführt. Die erste Komponente des Elektrostatischen Klassierers ist ein Vorimpaktor in dem große, außerhalb des Messbereiches liegende Partikel abgeschieden werden. Hiermit wird sowohl der Wartungsaufwand des SMPS minimiert als auch eine definierte, mechanische Messbereichsobergrenze für eine Ladungskorrektur geschaffen. Vom Vorimpaktor werden die Feinstpartikel dem Aerosolneutralisator des Elektrostatischen Klassierers zugeführt in dem sie den Ladungsgleichgewichtszustand mit einer bipolaren Ladungsverteilung erreichen. Dieser elektrostatische Gleichgewichtszustand bedeutet, dass die Partikel jeweils einer Partikelgröße eine naturgesetzlich definierte Anzahlverteilung an Elementarladungen pro Partikel tragen, die unabhängig von ihren Materialeigenschaften ist [33]. Aus dem Aerosolneutralisator werden die Partikel in die eigentliche Klassiereinheit des Elektrostatischen Klassierers, den Differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA), weitergeleitet. Der DMA ist im Wesentlichen ein Zylinder aus elektropoliertem Edelstahl, der extrem geringe Wandrauigkeiten aufweist. In diesem Zylinder befindet sich eine Zentralelektrode, die von gefilterter, partikelfreier Schleierluft laminar umströmt wird. Nach Eintritt an der Außenseite des DMAs folgen alle Partikel zunächst der Strömung ihres Trägergases durch den Zylinder. In Abhängigkeit von ihrer elektrischen Mobilität – die eine Funktion der Partikelgröße ist – legen die positiv geladenen Partikel jedoch nur einen gewissen Weg zurück, bis sie auf Grund der elektrostatischen Anziehung die partikelfreie Schleierluft durchdringen und nach innen zur negativ geladenen Zentralelektrode gelangen. Alle Partikel einer definierten Mobilität bzw. Partikelgröße können durch Änderung der an die Zentralelektrode angelegten Hochspannung in einen kleinen Entnahmeschlitz am unteren Ende der Elektrode gesteuert werden.

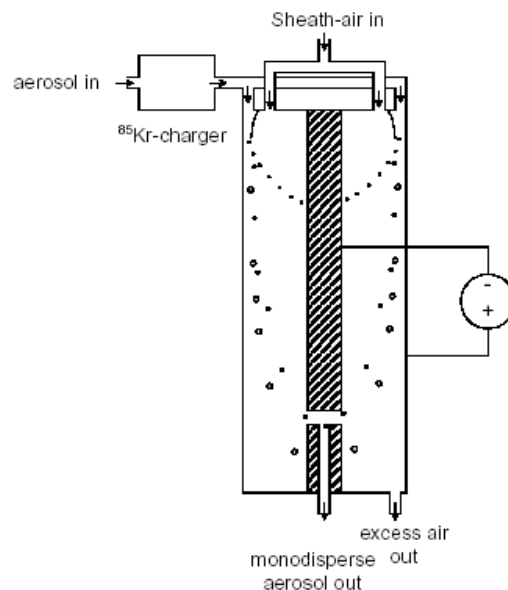


Abbildung 3: Beispiel für den Aufbau eines Elektrostatischen Klassierers (Butscher H. 2001)

Beim SMPSTM-System erfolgt die Messung der Größenverteilungen mittels eines patentierten Scanning-Modus', der die Klassierung und Zählung der Partikel kontinuierlich und ohne Lücken in den Daten synchronisiert. Durch die kontinuierliche Änderung der Spannung wird die Klassierung der Feinstpartikel in

sehr enge Größenklassen realisiert. Mit dem SMPS können Verteilungen mit einer echten Auflösung von bis zu 162 Klassen gemessen werden. Nach der Größenbestimmung werden die Partikel dem CPC zugeführt, in dem die Messung der Partikelanzahl je Größenklasse erfolgt. Wie zuvor beschrieben werden die Feinstpartikel durch Aufkondensieren einer Arbeitsflüssigkeit in einer übersättigten Umgebung optisch vergrößert und anschließend mittels Streulichtfassung gezählt. Die Steuerung von Elektrostatischem Klassierer und CPC erfolgt über einen Computer, der die Messdaten aufnimmt und als Partikelgrößenverteilung darstellt.

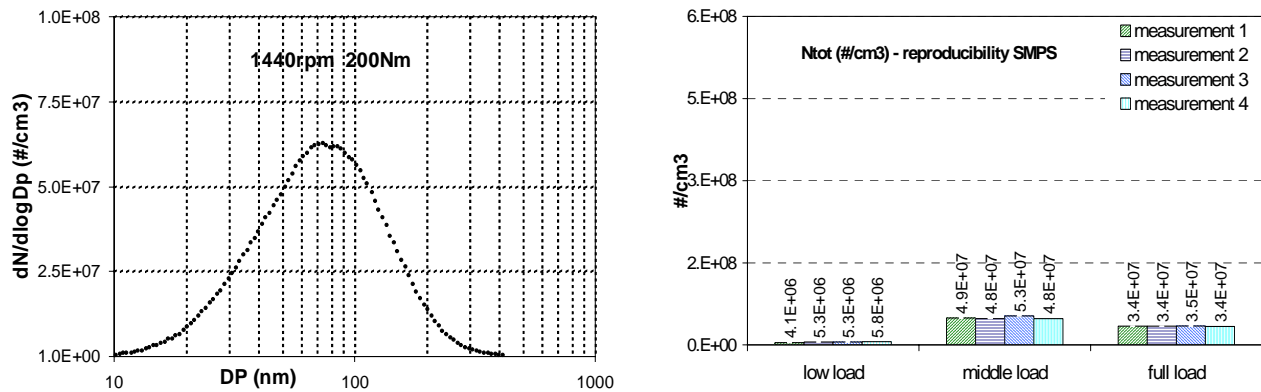


Abbildung 4: Partikelanzahlmessung mittels SMPS, Versuchsträger: LKW EU III 6-Liter-Klasse Motor Nennleistung 150 kW - Klasse: a - hohe Größenauflösung des SMPS durch Scanning-Modus (Lastpunkt 1440 Upm, 200Nm), b - Untersuchung der Messwiederholbarkeit – Totalpartikelanzahl bei Niedriglast, Mittellast, Volllast [34]. Die Werte sind auf unverdünntes Abgas normiert.

Ein wesentlicher Vorteil des SMPS ist, dass mit dieser Methode sowohl sehr geringe Partikelkonzentrationen von wenigen Partikeln pro Kubikzentimeter als auch hohe Konzentrationen von 10 Millionen Partikeln pro Kubikzentimeter gemessen werden können. Hierin liegt auch ein wichtiger Vorteil gegenüber der älteren, schrittweise messenden Methode, die unterhalb von ca. 1.000 Partikeln pro Kubikzentimeter – also durchaus im Abgasbereich nach einem Diesel-Partikel-Filter – kaum reproduzierbare Ergebnisse liefert und für die zudem auch bis zu 10-fach längere Messzeiten zu veranschlagen sind. Das SMPS eignet sich durch seine sehr hohe Größenauflösung vor allem zu Messungen von Konstantfahrten bei unveränderlicher Geschwindigkeit. Neben Anwendungen zur Optimierung der Partikelemission durch innermotorische Maßnahmen oder unterschiedlichen Kraftstoffe wird das SMPS hauptsächlich zur Charakterisierung der Effizienz von Abgasnachbehandlungsmaßnahmen eingesetzt. Effiziente Diesel-Partikel-Filter reduzieren sehr stark die Partikelanzahlen, so dass Massenmessungen kaum noch reproduzierbar durchgeführt werden können, während das SMPS bei der Partikelanzahlmessung im durch DPF gereinigten Abgas, immer noch eine hohe Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit aufweist.

Transiente Größenmessungen können mit dem SMPS durch die minimal erforderliche Messzeit allerdings nicht realisiert werden, weswegen zunächst der elektrische Niederdruckimpaktor (ELPITM) für diesen Einsatzzweck Verwendung fand und später das EEPSTM (Engine Exhaust Particle Sizer) entwickelt wurde. Die Messung einer einzelnen, frei wählbaren Partikelgröße über einen Fahrzyklus ist allerdings auch mit den SMPS-Komponenten in einem Bandpass-Modus möglich, so dass zumindest eine Aussage etwa für den Spitzenwert der Größenverteilung unter transienten Bedingungen mit sekundlicher Zeitauflösung getroffen werden kann [35].

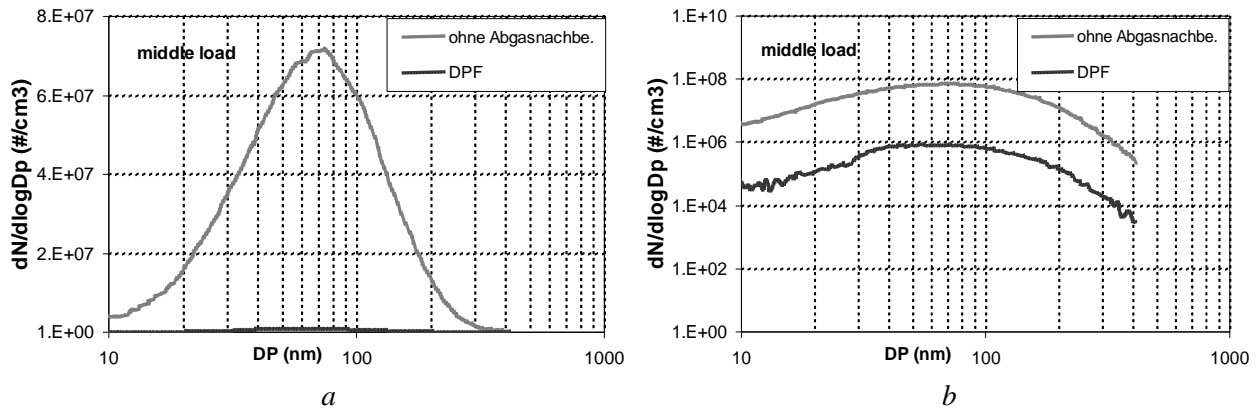


Abbildung 5: Empfindlichkeit des SMPS für Partikelanzahlen vor und nach Diesel-Partikel-Filter: Versuchsträger: LKW EU III 6-Liter-Klasse Motor, Mittellast, b- logarithmische Skalierung. Die Werte sind auf unverdünntes Abgas normiert.

In Bezug auf die Genauigkeit der Größenbestimmung mit dem SMPS wurde vom amerikanischen Amt für Messwesen (NIST) für ideal kugelförmige Latexpartikel (PSL) mit einer Größe von 100 nm ein zufälliger Fehler von 0,1% ermittelt [36]. In einem Ringversuch zur Messung von Feinstpartikeln im September 2000 mit 11 Teilnehmern aus Deutschland, Österreich und der Schweiz wurde die Messabweichung des SMPS bei der Messung der Partikelemission von einem 45 kW-Dieselmotor und einem Rußpartikelgenerator (CAST) bestimmt. Die Messungen mit unterschiedlichen Elektrischen Mobilitätsspektrometern (SMPS und DMPS) verschiedenster Konfigurationen, Softwareversionen, Alters und Wartungszustandes zeigte maximale Streuungen von 7% bis 10% in Bezug auf die Partikelgröße und 7 % in Bezug auf die Partikelanzahl (bei großen Probenahmefflüssen) [37]. Als Hauptursache für diese Messabweichung wurden Ungenauigkeiten der Volumenströme festgestellt, die durch Verifizierung mit einem widerstandsfreien Präzisionsflowmeter korrigiert werden können. Selbst eine 10%-ige Abweichung bei 11 verschiedenen Messgeräten unterschiedlichsten Alters und Zustands kann aber als ausreichend für die Forschung und Entwicklung wie bei Auslegung von Motorparametern zur Minimierung der Partikelemission und Charakterisierung von Diesel-Partikel-Filtern oder zur Verifizierung künftiger Anforderungen betrachtet werden.

2.3.2 Der Elektrische Niederdruckimpaktor (ELPI™)

Während Fahrzyklen mit variabler Geschwindigkeit und variablem Drehmoment auf einem Motor- oder Rollenprüfstand ändert sich die Partikelemission sehr stark, wobei auch Größe und Anzahl der Abgaspartikel eine Funktion der Zeit und der Fahrzyklusparameter sind. Auf Grund der Beschränkungen des SMPS bei transienten Messungen findet seit Mitte der 90-er Jahre der Elektrische Niederdruckimpaktor (ELPI™, Dekati Oy) Einsatz zur Messung von Abgaspartikeln. Mit dem ELPI können zu verschiedenen Zeitpunkten eines Fahrzyklus' Größenverteilungen im Bereich von 0,03 bis 10 µm gemessen werden. Das Konzept eines Impaktors mit elektrischer Erfassung wurde zuerst 1992 vorgestellt [38]. Im Wesentlichen wird dazu ein modifizierter Niederdruckimpaktor mit einer definierten Aufladung der Partikel und einer Messung, wie sie in Aerosolelektrometern genutzt wird, kombiniert.

Das Funktionsprinzip des ELPI besteht im Einzelnen daraus, dass die Abgaspartikel mit einer externen Vakuumpumpe in das Messsystem gezogen werden. Im ELPI erfolgt dann eine Diffusionsaufladung während der die Partikel, durch bei einer Korona-Entladung produzierte Ionen, unipolar aufgeladen werden. Die geladenen Partikel treten danach in den modifizierten Niederdruckimpaktor ein. Die wichtigste Modifikation

im Vergleich zu herkömmlichen Mehrstufenimpaktoren des Berner-Typs besteht darin, dass die 12 Impaktorstufen voneinander elektrisch isoliert sind. Wie in jedem anderen Niederdruckimpaktor werden dort Partikel auf Grund ihrer Massenträgheit auf Prallplatten abgeschieden. Dazu wird von Stufe zu Stufe der Durchmesser der Impaktordüse und der Abstand zur Prallplatte verringert. Die Partikel werden damit nach ihrer aerodynamischen Größe in Stufen fraktioniert. Um auch feinste Partikel abscheiden zu können, muss der Druck in den untersten Impaktorstufen abgesenkt werden. Da es theoretisch nicht möglich ist den Grenzwert für die Abscheidung eines Partikels in der einen oder der anderen Stufe exakt festzulegen, werden derartige Niederdruckimpaktoren mit Referenzpartikeln kalibriert. Jede der 12 elektrisch getrennten Impaktorstufen ist einem Kanal eines Multikanal-Elektrometers zugeordnet. Das Elektrometer misst den durch das Auftreffen der geladenen Partikel in einer Stufe erzeugten Strom unmittelbar und parallel für alle Stufen. Mit der ELPI-Software wird aus dem Stromsignal unter Berücksichtigung von Aufladeeffizienz, Impaktorkalibrierung und Spiegelladung über eine Dateninversion die Konzentration je Impaktorstufe und daraus die Partikelgrößenverteilung ermittelt [38].

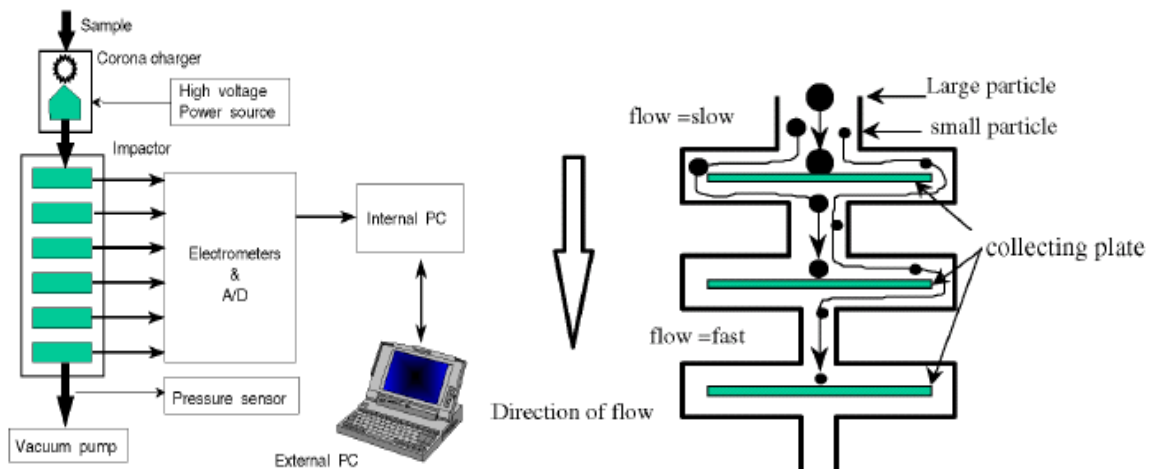


Abbildung 6: Schematische Darstellung des ELPI-Funktionsprinzips [39]

Mit dem ELPI können Partikel im Größenbereich von 30 bis 10.000 nm in 12 Größenklassen mit höherer Zeitauflösung als beim SMPS gemessen werden. Durch die Art der Partikelabscheidung werden die Vorteile eines Impaktors, wie die aerodynamische Trennung in einzelne Fraktionen und das Sammeln der Partikel, übernommen. Mit der elektrischen Messung werden jedoch die wichtigsten Nachteile, wie die langen Impaktor-Messzeiten um eine statistisch ausreichende Partikelmasse zu sammeln und die arbeitsaufwendige Auswertung, vermieden. Die in den 12 Impaktorstufen abgeschiedenen Partikel können im Anschluss an die elektrische Messung zudem ausgewogen werden. Die entsprechende Reinigung der 12 Impaktorstufen und des Aufladers ist in Abhängigkeit von der Einsatzhäufigkeit notwendig.

Bei stationären Messungen ist zudem die Auflösung im Vergleich zum SMPS geringer. Beim SMPS stehen von insgesamt 162 Größenklassen je nach Konfiguration mehr als 60 Größenklassen im Bereich kleiner 100 nm zur Verfügung.

Untenstehendes Beispiel zeigt den Methodenvorschlag zur schnellen Erfassung der Partikelemissionen über dem gesamten Motor-Kennfeld. In Verbindung mit dem dynamischen Motorprüfstand sind die Messungen bei jeweils konstantem Motormoment und langsam sich ändernder Motordrehzahl durchgeführt worden. Dazu wurde ein bestimmtes Motormoment (100Nm, 200Nm, 300Nm, 400Nm) als Sollgröße vorgegeben und

die Drehzahl wurde zwischen Leerlaufdrehzahl und Nenndrehzahl langsam im Laufe von 180 Sekunden rampenförmig variiert. Als Versuchsträger diente ein EURO III 6-Liter-Klasse LKW Motor. In den untenstehenden Abbildungen sind die Ergebnisse der ersten vier ELPI-Stufen dargestellt. Im befeuerten Niedriglast-Betrieb (Abbildung 6.a und 6.b) ist ausgeprägte Nukleation (Kondensationspartikel) zu beobachten. Erst durch den Momentanstieg (Abbildung 6.c und 6.d) wird die Kondensation beseitigt, und es ergeben sich Partikelanzahlverteilungen, die ausschließlich die Abgasfestpartikel darstellen. Die Abbildung 6.e bzw. Abbildung 6.f zeigen die Totalpartikelanzahl ($\#/cm^3$) bzw. stündliche Totalpartikelanzahl ($\#/h$) bei vier Messungen mit unterschiedlichem, jeweils konstant gehaltenem, Motormoment und langsam steigender Drehzahl.

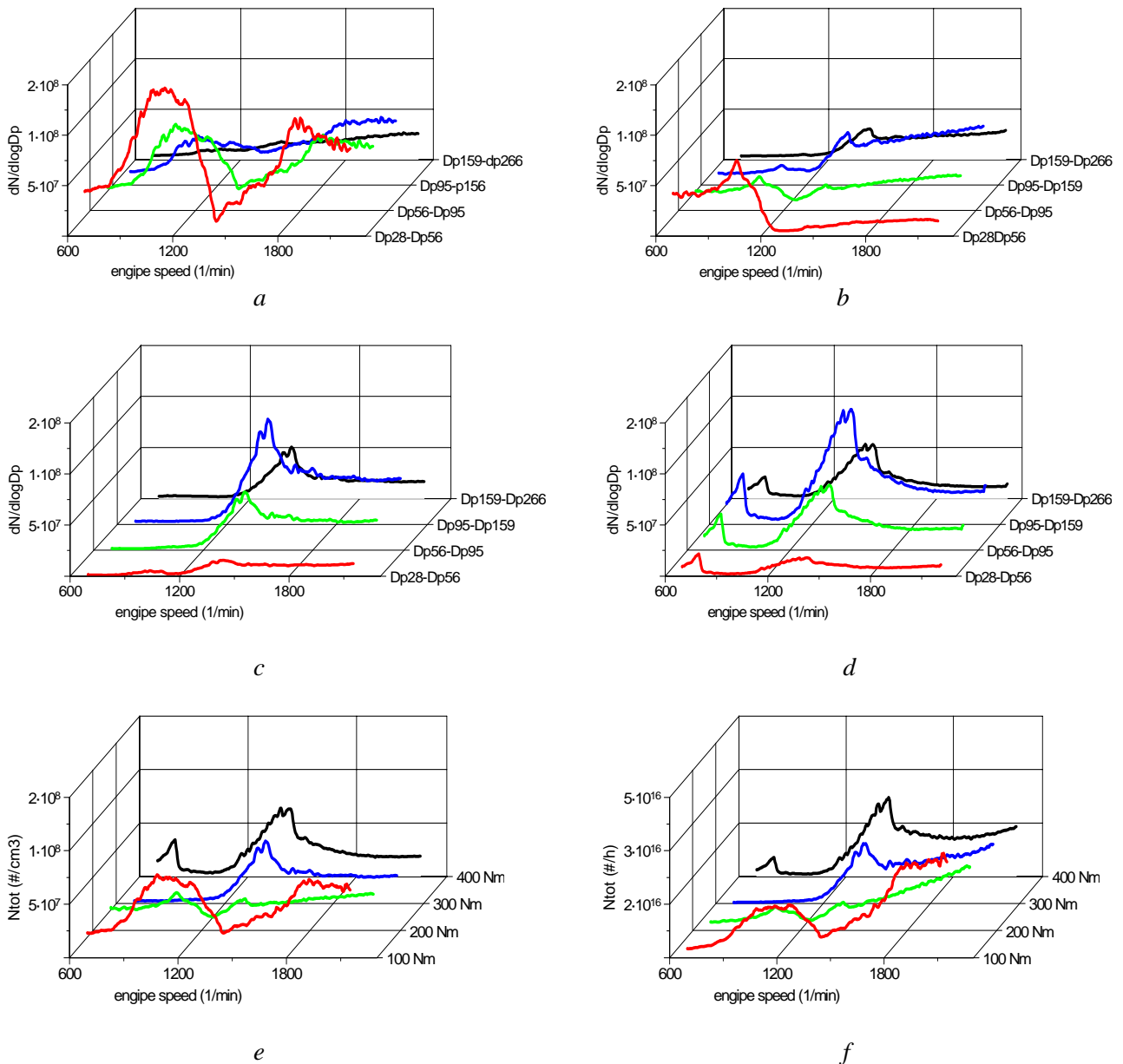


Abbildung 6: a- $dN/dlogDp$ ($\#/cm^3$) Moment konstant 100 Nm, b - $dN/dlogDp$ ($\#/cm^3$) Moment konstant 200 Nm, c- $dN/dlogDp$ ($\#/cm^3$) Moment konstant 300 Nm, d- $dN/dlogDp$ ($\#/cm^3$) Moment konstant 400 Nm, e- N_{tot} ($\#/cm^3$), f - N_{tot} ($\#/h$)

2.3.3 Das EEPS™-Spektrometer für transiente Messungen

Als *Engine Exhaust Particle Sizer™* bzw. EEPS™-Spektrometer bezeichnet man ein neuartiges Partikelmessgerät, das die Messung von Partikelanzahl- und Größenverteilungen mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung von 10 Hz in 32 Größenklassen ermöglicht. Grundlage ist ebenfalls eine elektrische Mobilitätsmethode, die in über 20-jähriger Forschungsarbeit an der Universität Tartu (Estland) entwickelt wurde. Im Gegensatz zur elektrischen Mobilitätsmessung des SMPS werden die Partikel im EEPS jedoch durch einen Koronaauflader höher geladen und im DMA nach außen abgelenkt, wo das Stromsignal an parallelen Elektrometern erfasst wird [40].

In enger Zusammenarbeit mit der Universität Tartu wurde 2003 das *Engine Exhaust Particle Sizer* Spektrometer (EEPS 3090, TSI Inc.) speziell zur Messung von Abgaspartikeln entwickelt um 10-Mal pro Sekunde Partikelgrößenverteilungen im Bereich von 5,6 bis 560 nm zu messen. Im Einzelnen funktioniert das EEPS wie folgt: zur Minimierung von Diffusionsverlusten wird ein vergleichsweise hoher Probenahmestrom von 10 L/min über eine im Messgerät eingebaute Pumpe bei Umgebungsdruck angesaugt. In einem Zyklon am Einlass werden zunächst alle Partikel mit einem Durchmesser über 1,0 µm abgeschieden, um eine Beeinflussung der Messung durch Partikel außerhalb des Messbereichs zu vermeiden und den Wartungsaufwand einzuschränken. In einem zweistufigen Korona-Auflader werden die Partikel definiert elektrisch aufgeladen. In der ersten Stufe werden durch eine negative Korona negative Ionen erzeugt, die durch Diffusion zu den Partikeloberflächen gelangen. Durch den Abbau von positiven Mehrfachladungen auf den Partikeln, die in heißen Abgasen durch Thermoaufladung auftreten können, wird eine Überschussladung im zweiten Aufladeschritt vermieden. In der zweiten Stufe des Aufladers wird dem Abgas durch eine positive Korona eine definierte positive Ladungsverteilung der Partikel aufgegeben. Vom Auflader gelangen die Partikel unmittelbar in den DMA, wo sie von der zylindrischen Zentralelektrode innen zur entsprechenden Gegenelektrode nach außen abgelenkt werden. Dieser Vorgang ist genau umgekehrt zur beschriebenen Konstruktion des SMPS, weshalb beim EEPS auch von einem „invertierten DMA“ gesprochen wird. Die Zentralelektrode hat zudem verschiedene Spannungsstufen und weist gestufte Durchmessermaße auf. Die Außenelektrode ist ringförmig aufgebaut, wobei die einzelnen Sensorringe voneinander elektrisch isoliert sind und der Abstand zwischen diesen minimal gehalten wurde. Durch die gewählte Konstruktion konnte die Länge des invertierten DMAs begrenzt und der Abstand zwischen den Elektrometerringen vereinheitlicht werden. An der Außenseite jedes Sensorrings befindet sich jeweils ein Elektrometerverstärker. Um eine Diffusion der Partikel zu den Sensorringen zu vermeiden, werden diese von einem 4-fach höheren Volumenstrom mit partikelfreier Schleierluft laminar umspült.

Die Abscheidung der Partikel in diesem invertierten DMA erfolgt wie beim SMPS entsprechend ihrer elektrischen Mobilität: je größer das Partikel, desto später bei identischer Ladung die Abscheidung. Beim Auftreffen der definiert geladenen Partikel auf einen Sensorring wird an diesen die Ladung abgegeben. Der erzeugte Strom wird durch ein hochempfindliches Elektrometer verstärkt, digitalisiert und über die Mikroprozessorsteuerung des EEPS ausgelesen, so dass die Messergebnisse unmittelbar auf der eingebauten Anzeige des Gerätes dargestellt werden können. Für die hohe zeitliche Auflösung müssen einige Parameter bei der Dateninversion berücksichtigt werden (Ladung und Spiegel-Ladung, zeitliche Differenz der Elektrometersignale, verschiedene Spannungen am DMA). Der Berechnungsalgorithmus des EEPS trägt diesen miteinander verknüpften Faktoren Rechnung und korrigiert die induzierten fiktiven Ladungssignale und zeitlichen Verzögerungen im DMA. Aus den Elektrometersignalen wird die Partikelanzahl in insgesamt 32 auf einer logarithmischen Skala angeordneten äquidistanten Größenkanälen ausgegeben. Die hohe Zeitauflösung von 10 Größenverteilungen je Sekunde wird durch die integrierte digitale Signalverarbeitung (DSP) realisiert.

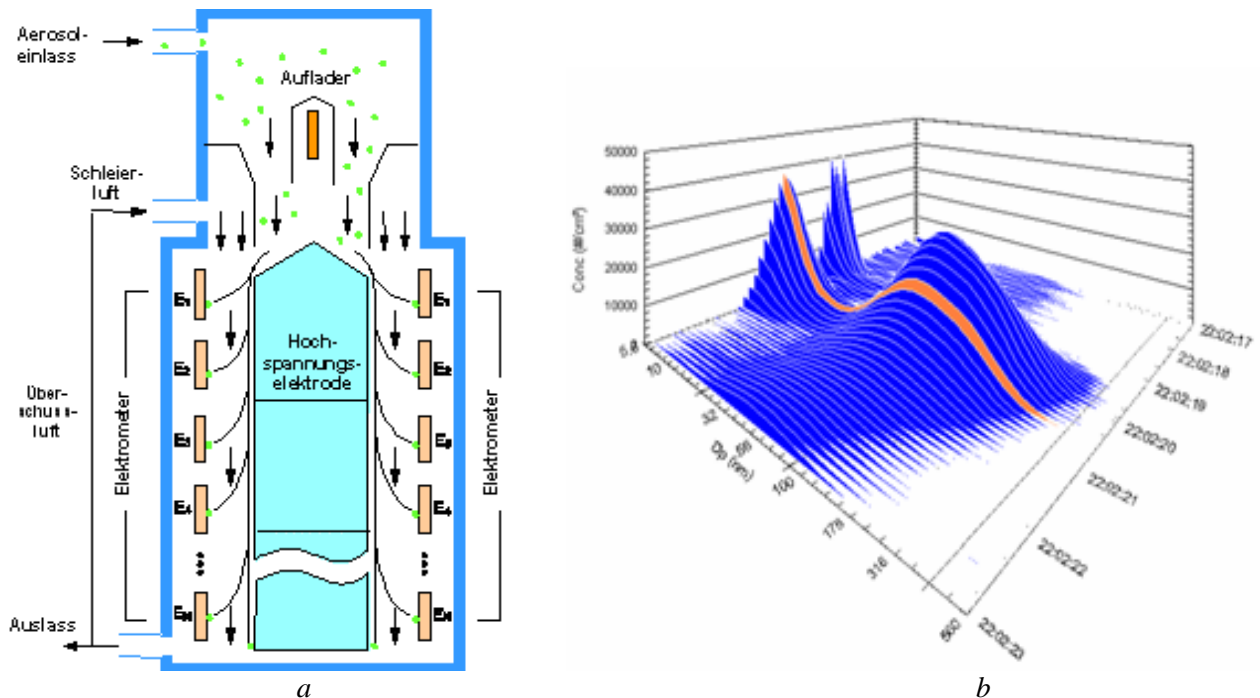


Abbildung 7: EEPS: a-Schematische Darstellung des Funktionsprinzips, b-Messung mit 32 Größenklassen und 0,1 s Zeitauflösung (Lastwechsel 10% auf 75% an einem EURO III LKW Motor)

Durch die kontinuierliche Messung mit hoher Zeitauflösung über komplette Fahrzyklen ermöglicht das EEPS neue Anwendungen, um die Partikelemission auf bestimmte Vorgabewerte zu reduzieren. Dabei liegen die gesamten 32 Größenklassen im für Abgaspartikel relevanten Größenbereich von 5,6 bis 560 nm, so dass bei entsprechend gewählter Probenaufbereitung auch Nukleationspartikel während transienter Messungen bewertet werden können. Aufgrund der in der Software bereitgestellten 3D-Darstellung kann das dynamische Verhalten der Partikelemission z.B. während Lastwechseln oder beim Kaltstart einfach und unmittelbar während des Vorgangs visualisiert werden.

2.4 Probenaufbereitung und Verdünnung bei der Partikelanzahlmessung

Die Probenaufbereitung und Verdünnung ist für Partikelanzahl- und Größenverteilungsmessungen an Fahrzeugabgasen nahezu ebenso wichtig wie die richtige Wahl des Messgerätes, da die Partikelemission nach Entnahme aus dem unverdünnten, heißen Abgas starken Veränderungen unterliegen kann. Insbesondere Veränderungen durch homogene Nukleation bzw. Partikelbildung und heterogene Kondensation von Gaskomponenten bei der Abkühlung des heißen Abgases, aber auch Koagulation und Verluste durch Diffusion und Thermophorese sind hierbei wichtige Einflussfaktoren. Eine genaue Definition der Bedingungen für Probenahme, Probenaufbereitung und Verdünnung ist daher essentiell. Als Bestandteil des Partikelmessprogramms PMP wurden hierzu Vorschläge aufgestellt, die für Partikelanzahl- und Größenverteilungsmessungen von Partikelemissionen empfohlen wurden [41]. Diese Vorschläge beinhalten die Eliminierung von flüchtigen Nukleationspartikeln, deren Anzahl die der festen Partikel leicht um mehrere Größenordnungen übersteigen kann.

Die Probenahme sollte dabei an üblichen CVS-Systemen (*Constant Volume Sampling*) ähnlich zur Bestimmung der Partikelmasse ebenfalls in der Nähe der Mitte des CVS-Tunnels vorgenommen werden, so dass eine repräsentative Probe des Partikelemissions-Verdünnungsluftgemischs erhalten wird. Die

Probenahmesonde (PSP) soll mit ihrer freien Öffnung zur Strömung zugewandt sein. Die Partikelprobe sollte dabei in der Probenahmeleitung eine Temperatur von 450 °C nicht überschreiten. Zwischen Probenahmesonde und Verdünnungseinheit ist eine mechanische Klassiereinheit (PCF) – typischerweise ein Zyklon – vorgesehen, der Partikel oberhalb 2,5 µm abscheidet. Ebenfalls sind maximale Längen von 100 cm Transportleitung (PTT) von der Probenahmesonde bis zum Eintritt in die Verdünnungseinheit und von 250 cm vom Eintritt in die Probenahmesonde bis zum Partikelmessgerät (PNC) einzuhalten um Transportverluste zu minimieren und diese für vergleichbare Messungen in denselben Größenordnungen zu halten. Die Probenaufbereitung erfolgt in einer sekundären Verdünnungseinheit (VPR) und mit thermischer Konditionierung (ET), der so genannten Thermoverdünnung.

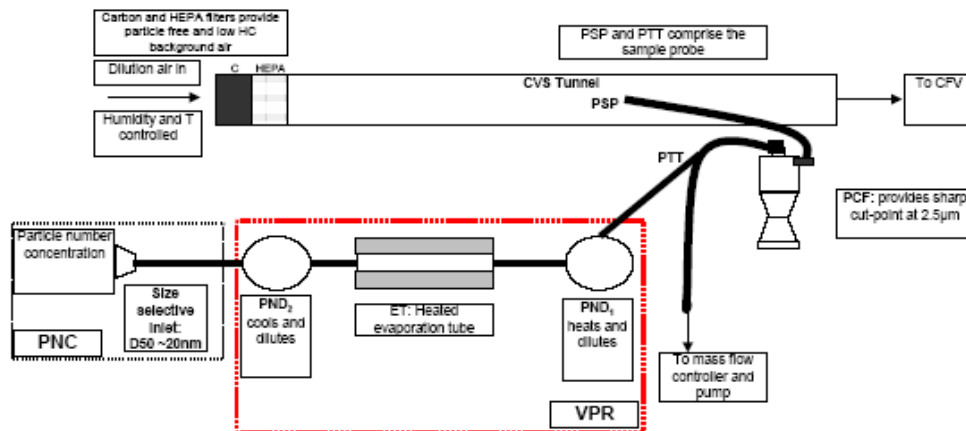


Abbildung 8: Empfohlenes Probenahmesystem und Thermoverdünnung nach PMP [E]

Als Verdünnungseinheit können verschiedene Methoden verwendet werden, wobei auf Grund des variablen und wahlweise hohen Verdünnungsverhältnisses eine Rotationsverdünnung (MD19-2E, Matter Engineering AG, [42, 43]) vorteilhaft erscheint. Deren Funktionsprinzip beruht darauf, dass eine Scheibe mit konusförmigen Hohlräume auf einem Edelstahlblock rotiert. In dem Block befinden sich je ein Kanal für das unverdünnte Aerosol und einer für das Verdünnungsgas. Durch die rotierende Scheibe wird ein definiertes Probevolumen über die Hohlräume in den Verdünnungsgaskanal transportiert. Der Vorteil des Systems besteht darin, dass durch die Variation der Rotationsgeschwindigkeit und die Wahl der Anzahl und des Volumens der Hohlräume Verdünnungsverhältnisse zwischen 1:15 und 1:3000 eingestellt werden können.

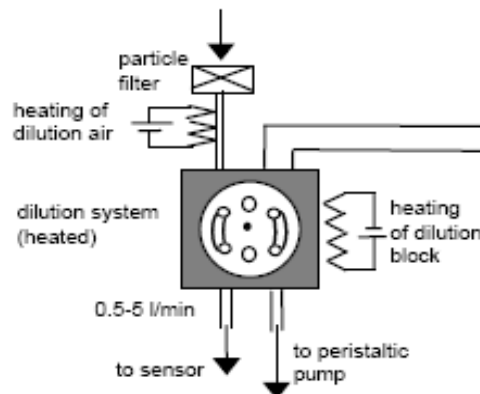


Abbildung 9: Funktionsprinzip der Rotationsverdünnung [43]

Ein anderes flexibles Verdünnungssystem (Teilstromverdünnungssystem) wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz aufgebaut. Dieses wurde teilweise im Rahmen des EU PARTICULATES Programms (Grundauslegung, Komponentenfertigung) und teilweise im Rahmen einer Dissertationsarbeit (Auslegung, Konstruktion, Fertigung einer kompakten Ausführung) entwickelt und gefertigt.

Im Gegensatz zur gesetzlich vorgeschriebenen Messung der Partikelmasse, wo am Ende des Verdünnungstunnels der CVS-Anlage ein Teilstrom entnommen wird, verdünnt dieses System das Abgas sofort nach dem Auspuff (Primärverdünnung). Die Abbildung 10.a zeigt eine Variante dieses Teilstromverdünnungssystems.

Durch das Teilstromverdünnungssystem wird eine kleine Abgasprobe der Hauptabgasströmung entnommen und mit getrockneter (Feuchtigkeit <5%) und gefilterter Luft primär verdünnt. Die Menge der Verdünnungsluft wird durch einen Massendurchflußregler (Mass Flow Controller) fixiert. Durch Messung der CO₂-Konzentration des Rohabgases und des bereits verdünnten Abgases wird die Verdünnungsrate eingestellt.

Abhängig von den Messbereichen der eingesetzten Messgeräte, wird die Probe zusätzlich mittels getrockneter Luft in einem Ejektorverdünner [DEKATI, Tampere, Finnland] sekundär verdünnt.

Die Verdünnungsluft wird durch den Massendurchflußregler konstant gehalten, wodurch sich auch bei dynamischem Motorbetrieb eine relativ konstante Verdünnungsrate ergibt.

Die Vergleichsmessungen der Festpartikelanzahl- und Größenverteilungen bei stationärem Motorbetrieb (Versuchsträger LKW EURO III 6-Liter-Klasse Motor, Nennleistungsklasse 150 kW) zwischen dem Teilstromverdünnungssystem und dem Rotating Disc Diluter ergaben eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Verdünnungssysteme (Abbildung 10.b). Die Kondensation in der Probe wurde bei einer Variante dieses Systems mittels Vollastkonditionierung vermieden. Durch eine Vollastvorkonditionierung werden Nukleationspartikel (Abgaskondensationspartikel) weitgehend vermieden, sodass das Abgas fast nur Festpartikel enthält. Dazu wurde der Versuchsträger im Vollastpunkt ca. 1 bis 2 Minuten betrieben, bevor die Messung in den eigentlich gewünschten Messpunkten, durchgeführt wurde.

scheme of particle sampling system

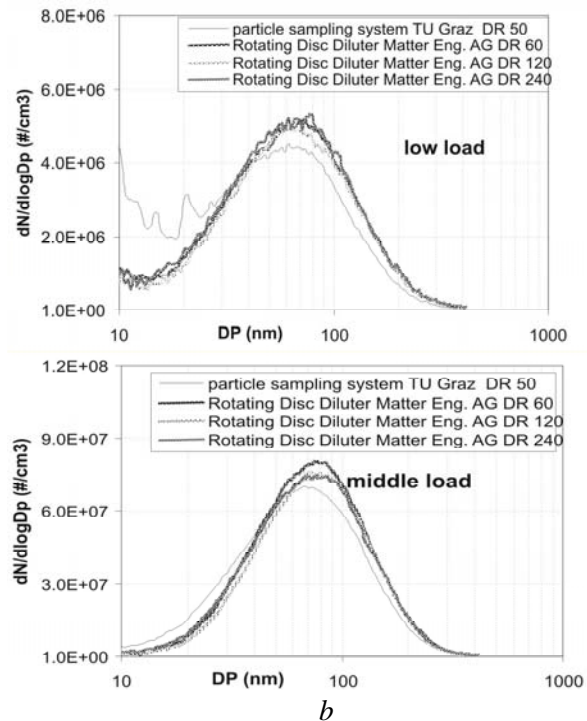
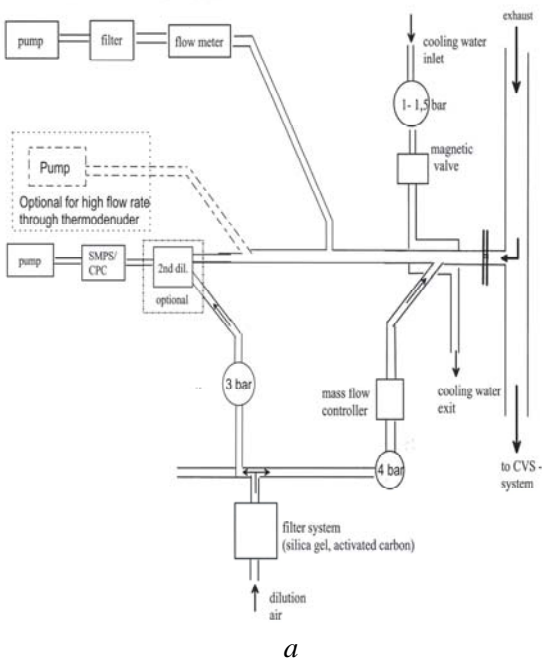


Abbildung 10: Teilstromverdünnungssystem, a- Funktionsprinzip, b- Vergleichsmessungen zwischen Teilstromverdünnungssystem (TU-Graz) und Rotating Disc Diluter [Matter Eng. AG] [34]

Weitere Verfahren sind Ejektorverdünnungen oder Verdünnungen mit poröser Probesonde (Palas GmbH, Dekati Oy). In Ejektorverdünnungen wird die Verdünnung durch die kontrollierte Zugabe trockener, partikelfreier Luft realisiert, wobei durch die Beimischung trockener Luft und eine damit verbundene Erhöhung der Sättigungsrate die Kondensation gasförmiger Bestandteile zumindest minimiert – wenn auch nicht ausgeschlossen – wird. Bei allen Verdünnungssystemen ist entscheidend, dass eine thermische Konditionierung erfolgt um Kondensationseffekte vollständig zu entfernen, die anderweitig zu einer Partikelbildung aus im Abgas enthaltenen gasförmigen Komponenten führen kann. Diese thermische Konditionierung sollte aus einer Verdampfungseinheit bestehen und auf eine Wandtemperatur zwischen 200 °C und 450 °C geregelt werden können. Zudem sollte die Verweilzeit der Probe mindestens 0,5 s betragen. Wichtig ist hierbei, dass in der Verdampfungseinheit eine Reduktion von mindestens 99% der flüchtigen Partikel und eine Penetration von mehr als 90% der festen ultrafeinen Partikel realisiert werden kann [41].

Die Abgasprobenkühlung und Veränderung der Verweilzeiten im unverdünnten Abgaszustand (andere Abnahmestelle in der Abgasanlage) bei schon durch z.B. Volllast vorkonditioniertem Abgas haben keine wesentlichen Einflüsse auf die Ergebnisse der Messungen der Festpartikelanzahl- und Größenverteilungen. Ebenso hat die Verdünnungsrate keinen wesentlichen Einfluss auf die Festpartikel (Abbildung 10.b) [4].

Die Messung der Feststoffpartikel ist, im Gegensatz zu den Nukleationspartikeln, „robust“ gegenüber typischen, prüfstandsbedingten Variationen der Messbedingungen [4].

2.5 PM10 Messtechnik – TEOM Schwebepartikel-Messgerät

Der fachliche Terminus für Feinstaub wird als PM10 bezeichnet. PM10 bezieht sich auf die Massenverteilung von Partikeln unterschiedlichen Durchmessers, wobei 50% der Masse der Partikel kleiner als 10 µm sind. Da 50% der Masse größer als 10 µm sind, die Masse aber mit dem Durchmesser mit der dritten Potenz ansteigt, sind in Bezug auf die Gesamtzahl der Partikel wesentlich mehr als 50% im PM10 enthalten. Die Zahl 10 kann durch eine beliebige Zahl ersetzt werden. So gibt es beispielsweise Messungen für PM₁, und PM_{2,5}.

Das TEOM basiert auf dem Messprinzip der Partikelabscheidung auf einem Filter bei konstantem Volumenstrom mit kontinuierlicher Mikrowägung zur Bestimmung der Filtermasse und einer Massenkonzentrationsbestimmung in „Quasi“-Echtzeit. Das physikalische Prinzip besteht aus Trägheitsimpaktion und Schwingungsmessung. Es ist somit ein gravimetrisches Messverfahren zur Partikelmassenbestimmung.

Während des Messvorganges gelangt die schwebepartikelbeladene Probeluft in den Probenahmekopf (TSP (Gesamtstaub) PM10, PM 2.5). Die Partikel der Probeluft werden auf einem, mit Teflon beschichteten Glasfaserfilter abgeschieden. Dieses Filter wird regelmäßig durch Messung der Änderung der Schwingfrequenz gewogen. Das Verhältnis des Massenflusses zum Volumenstrom (normiert auf den Wert des Volumenstromes in m³/s unter Normalbedingungen) ergibt schließlich den Wert der Massenkonzentration in g/m³ bzw. in µg/m³.

2.6 Wichtige andere neue Abgaspartikelmessmethoden

Die im Folgenden kurz beschriebenen Verfahren liefern im Vergleich zur Gravimetrie zeitlich höher aufgelöste Aussagen zur Partikelmassenemission bei durchaus auch niedrigen Partikelkonzentrationen, lassen diese aber ebenfalls nur als Integral über alle Partikelgrößen zu, weshalb auch hier eine gleiche Bewertung von hohen Anzahlen feinsten Partikel und wenigen, größeren Partikeln nicht vermieden werden kann. Es

bieten sich auch für diese Verfahren Einsatzmöglichkeiten für Forschung und Entwicklung. Diese Messgeräte wurden hier messtechnisch nicht bewertet.

2.6.1 Photoakustischer Rußsensor (PASS, *Photo Acoustic Soot Sensor*)

Der Photoakustische Rußsensor (PASS) wurde vor ca. 10 Jahren an der TU München für dynamische Messungen von Rußkonzentrationen entwickelt und ist inzwischen kommerziell erhältlich (AVL List GmbH). Dieses Gerät misst ein Signal das die integrale Rußmasse als Funktion der Zeit ausdrückt. Im Wesentlichen werden die Abgaspartikel dazu in der Messkammer von einem modulierten IR-Laserstrahl thermisch angeregt. Die am stärksten das laserlichtabsorbierende Komponente ist dabei Ruß. Die Erwärmung der Partikel erzeugt eine modulierte Gasausbreitung die zu Druckschwankungen führt. Diese werden von einem Mikrofon in einem akustischen Resonator als Schallwelle aufgenommen. Mittels einer entsprechenden Vorverstärkung und Signalfilterung wird damit die Rußkonzentration ausgedrückt. Beim PASS wird also nicht die gesamte Partikelmasse direkt bestimmt, sondern anders als bei der Gravimetrie, nur Ruß bewertet.

2.6.2 Massenmonitor (DMM, *Dekati Mass Monitor*)

Der im Jahr 2002 vorgestellte Massenmonitor [DMM, Dekati Oy] zählt ebenfalls zu den neueren massenbasierenden Partikelmessmethoden. In diesem Gerät werden zwei Messprinzipien miteinander kombiniert: die elektrische Mobilität und die Trägheitsabscheidung. Die aerodynamische Trägheitsabscheidung erfolgt in einem neuartigen 6-stufigen Kaskadenimpaktor im Bereich von 30 bis 2.500 nm, dessen elektrisches Messsignal mit dem aus einer elektrischen Mobilitätsanalyse abgeglichen wird. Der Vergleich dieser beiden Messungen liefert eine ‚mittlere effektive‘ Partikeldichte, die unter Annahme einer monomodalen, symmetrischen Größenverteilung zur Berechnung der Partikelmasse mit hoher zeitlicher Auflösung verwendet wird.

Anders als beim PASS wird auf Grund der ‚effektiven‘ Dichte beim DMM nicht nur Ruß alleine sondern die gesamte Partikelmasse ermittelt. Eine gute Übereinstimmung mit der Gravimetrie sollte also gegeben sein, wobei eine höhere Empfindlichkeit im Vergleich zu anderen massenbasierten Methoden zu erwarten ist.

2.6.3 Weitere neue Messmethoden für Abgaspartikel

Neben den zuvor kurz beschriebenen Verfahren gibt es weitere neue Messmethoden die ebenfalls zur Messung bestimmter Parameter von Abgaspartikeln eingesetzt werden oder hierfür Potenzial bieten. Gegenwärtig am weitesten verbreitet ist vermutlich die Laserinduzierte Inkandescenz (LI²SA®, Esysytec GmbH [44]), mit der die Primärpartikelgröße und Konzentration des elementaren Kohlenstoffs bestimmt werden kann. Mit der sehr kompakten Elektrischen Diffusionsbatterie (EDB, Matter Engineering AG [45]) können 5 Größenkanäle und die Partikelanzahl mit 1 s Zeitauflösung ermittelt werden, wobei gewisse Annahmen zur Form der Verteilung zu treffen sind. Die Quarzkristall-Mikrowaage (QCM, Booker Systems Ltd. [46]) bestimmt die Partikelmasse über elektrische Abscheidung auf dem Piezoelektrischen Element einer Mikrowaage. Hierbei wird die Gesamtmasse kleiner 2,5 µm ohne Korrekturen für Partikelform oder optischen Eigenschaften bestimmt.

3. Einsatzbeispiele für Partikelmesstechnik: Motorischen Partikelemissionen

3.1 Anwendungsfall I - Vergleich der Partikelanzahlemissionen beim Einsatz verschiedener Kraftstofffahrten und Abgasnachbehandlungssysteme

Im Rahmen des 5. EU Teil-Programms PARTICULATES sind die Messungen der Partikelemissionen für LKW und Busse am Rollenprüfstand des Instituts für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik der Technischen Universität Graz durchgeführt worden. Die dargestellten Ergebnisse basieren zum Teil auf dem PARTICULATES Abschlussbericht der TU Graz [47] und dem PARTICULATES Voruntersuchungsbericht der TU Graz [48].

Neben den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten (CO, HC, NOx, Partikelmasse) sind die Partikelzahl- und Größenverteilung gemessen worden. Im Folgendem wird ein Teil der Messergebnisse, vor allem die Auswirkungen der unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssysteme und der unterschiedlichen Kraftstoffe auf die Partikelanzahlemissionen, dargestellt. Es wurden die Ergebnissen stationärer Messungen (Leerlauf, 20 km/h, 60 km/h) dargestellt.

Für hier dargestellten Messungen wurden folgende Fahrzeuge als Versuchsträger eingesetzt:

- EURO III 12-Liter-Klasse Stadtbus
- EURO III 12-Liter-Klasse Stadtgasbus

Bei den Messungen am EURO III 12-Liter-Klasse Stadtbus wurden neben der Standardvariante (Seriensstand) auch noch zwei weitere Abgasnachbehandlungsvarianten vermessen:

- Oxidationskatalysator (oxidation catalyst), integriert in den Standardschalldämpfer
- Partikelkatalysator - PM Catalyst [Hersteller I], integriert in den Standardschalldämpfer

Für die Partikelanzahlmessung wurde das Verdünnungssystem der TU-Graz zusammen mit dem SMPS eingesetzt.

Um einen Vergleich der Ergebnisse der Festpartikelanzahlemissionen zu ermöglichen ist es notwendig, die Gesamtpartikelzahl(konzentration) N ($\#/cm^3$) ohne Einbeziehung des Nukleationsmodus (Abbildung 11.a) darzustellen.

Zum Zweck des Vergleiches des Kraftstoffeinflusses auf die Festpartikelanzahlemissionen zeigt die Abbildung 11 einen Vergleich der Totalpartikelanzahl bei N_{tot} ($\#/cm^3$) $>10nm$, $>60nm$, $>100nm$ und $>150nm$. Erst bei einer Partikelgröße von ca. $>50-60nm$ (abgesehen vom Gasbus bei 60 km/h) ist keine ausgeprägte Kondensation vorhanden und dadurch keine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Kondensationströpfchen gegeben.

Bei Seriensstand (Standard Schalldämpfer) zeigt sich, dass Biodiesel niedrigere Festpartikelanzahlemissionen als fossile Kraftstoffe aufweist (Abbildung 11.b).

Der Festpartikelanzahlemission-Vergleich der zwei fossilen Kraftstoffe zeigt, dass der schwefelarme Kraftstoff D-4 (9ppm Schwefel) eine leicht höhere Festpartikelanzahlemission aufweist als D-2 (265ppm).

Ab einem Partikeldurchmesser von 150nm haben, je nach Lastpunkt, die beiden Dieselmotorkraftstoffe sehr ähnliche Festpartikelanzahlemissionen (Abbildung 11.d)

Der Gasbus weist bei einer Partikelgröße ab ca. 60 nm einen ca. um den Faktor 100 bis 200 niedrigeren Wert an Partikelanzahlemissionen auf.

Unabhängig davon ab welcher Partikelgröße oberhalb von 60nm das Summieren der Gesamtpartikelanzahl durchgeführt wird, ergeben sich immer ähnliche Verhältnisse beim Vergleich der unterschiedlichen Dieselmotorkraftstoffe und des Gas-Kraftstoffes beim jeweiligen Lastpunkt (Abbildung 11.b bis 11.d).

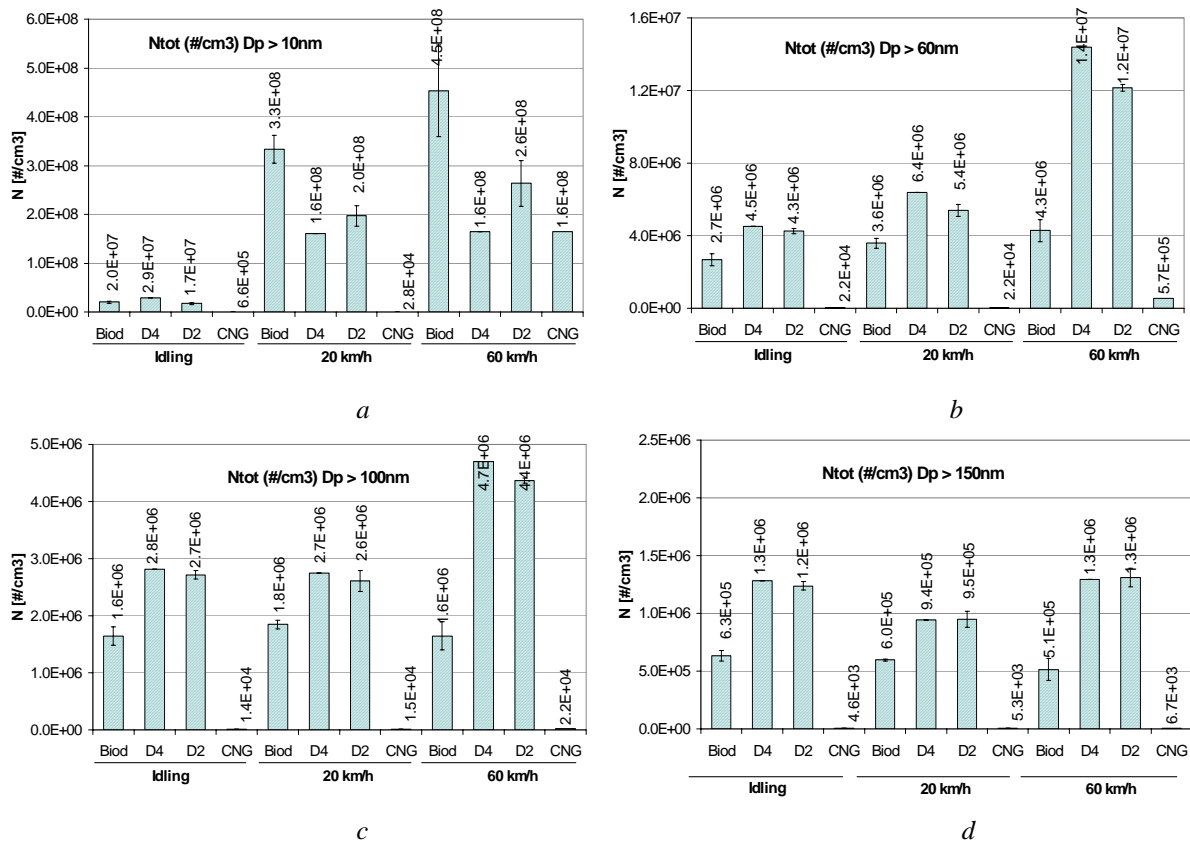


Abbildung 11: Totalpartikelanzahlkonzentration beim Vergleich der unterschiedlichen Dieseldieselkraftstoffe und des Gas-Kraftstoffes, EURO III 12-Liter-Klasse Stadtbus und EURO III 12-Liter-Klasse Stadtgasbus, a- Gesamtpartikelanzahlsumme ab der Größenklasse 10nm, b- Gesamtpartikelanzahlsumme ab der Größenklasse 60nm, c- Gesamtpartikelanzahlsumme ab der Größenklasse 100nm, d- Gesamtpartikelanzahlsumme ab der Größenklasse 150nm

Beim Vergleich der unterschiedlichen Abgasnachbehandlungsstrategien hat die Kondensation wiederum einen so starken Einfluss (Abbildung 12.a), dass ein sinnvoller Vergleich der Abgasfestpartikel erst ab der Partikelgröße > 60 nm möglich ist.

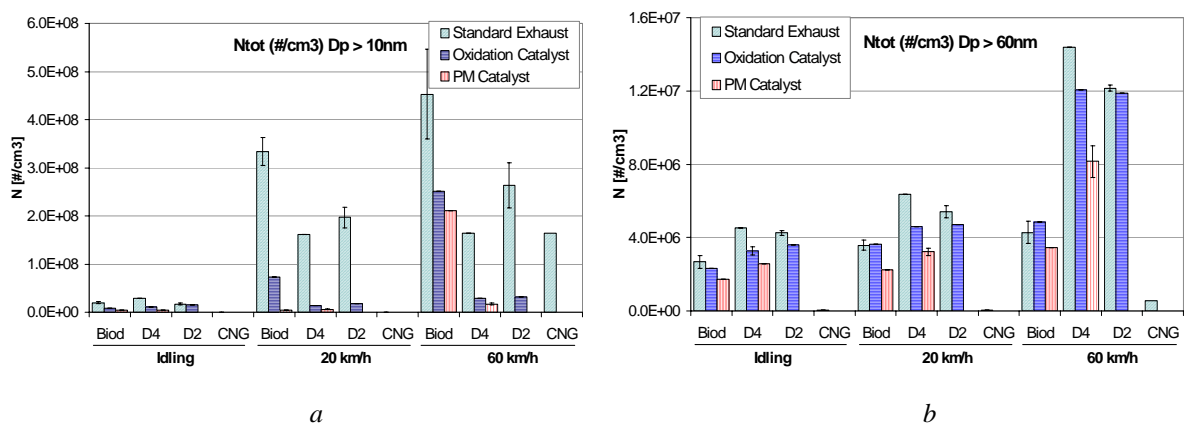


Abbildung 12: Totalpartikelanzahlkonzentration beim Vergleich der unterschiedlichen Dieseldieselkraftstoffe und dem Gas-Kraftstoff - ohne und mit Abgasnachbehandlung, EURO III 12-Liter-Klasse Stadtbus und EURO III 12-Liter-Klasse Stadtgasbus, a- Gesamtpartikelanzahlsumme ab Größenklasse 10nm, b- Gesamtpartikelanzahlsumme ab Größenklasse 60nm

Beim Oxidationskatalysator ergibt sich eine Reduktion der Festpartikelanzahl in der Größenordnung von ca. 20% in Abhängigkeit vom verwendeten Kraftstoff und dem Lastpunkt.

Beim Partikelkatalysator ergibt sich eine Reduktion der Festpartikelanzahl in der Größenordnung von ca. 30% bis 40% in Abhängigkeit vom verwendeten Kraftstoff und dem Lastpunkt (Abbildung 12.b).

3.2 Anwendungsfall II - Vergleich der Partikelanzahlemissionen beim Einsatz vom Partikelkatalysator und Dieselpartikelfilter

Um die Wirksamkeit der einzelnen Abgasnachbehandlungssysteme auf deren Partikelanzahlreduktion zu untersuchen, wurden zwei Varianten der Abgasnachbehandlung getestet. Die Ergebnisse der Messungen, wurden anschließend mit den Partikelanzahlmissionen beim Motorserienstand verglichen. Als Versuchsträger diente ein LKW EURO III 6-Liter-Klasse Motor. Die Messungen wurden am transienten Motorprüfstand durchgeführt. Das Abgas wurde mit dem Teilstromverdünnungssystem (TU Graz) verdünnt und anschließend wurden die Partikelanzahl- und Größenverteilungen mit SMPS [TSI] und ELPI [DEKATI] gemessen. Zur Abgasnachbehandlung wurden ein Partikelfilter und Partikelkatalysator [Hersteller II] eingesetzt. Die Regeneration des Partikelfilters erfolgte mit Hilfe der Kraftstoffadditivierung.

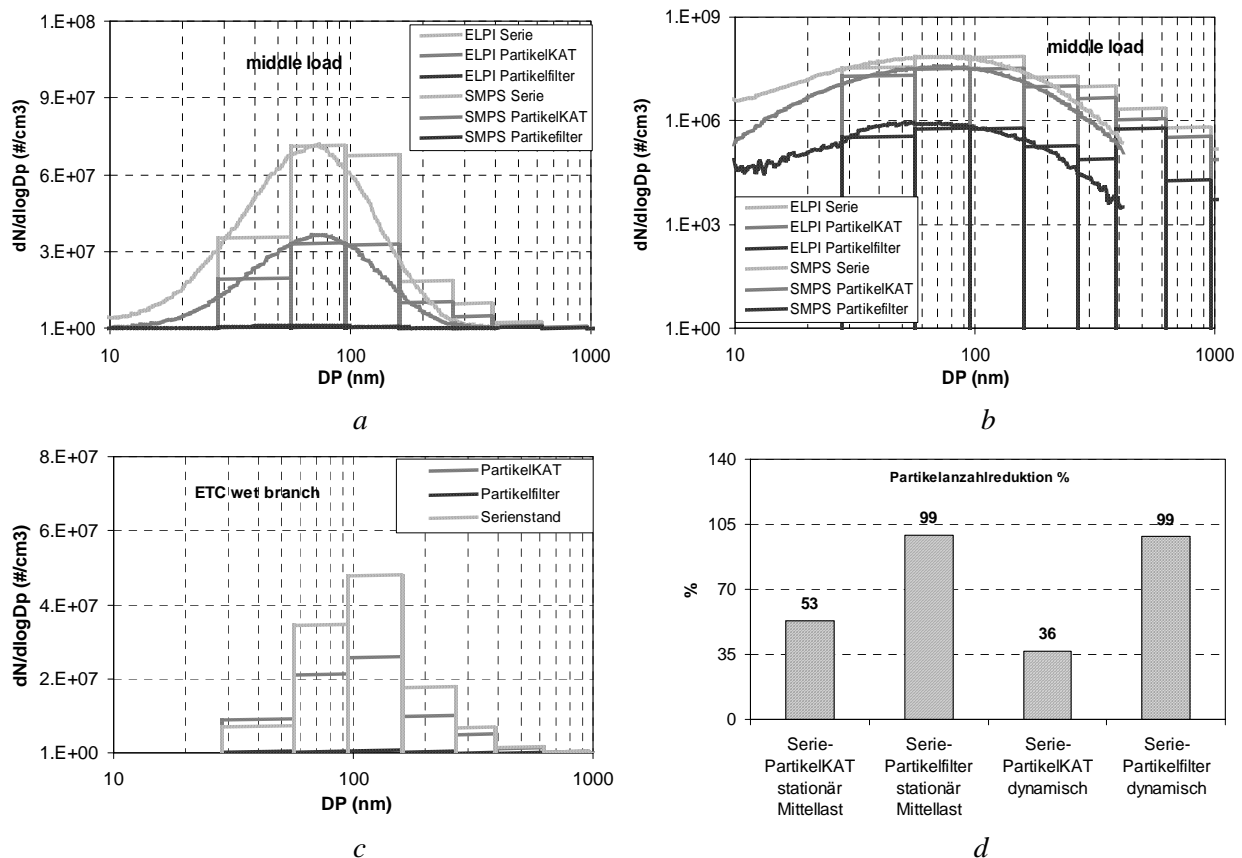


Abbildung 13: Partikelanzahl -und Größenverteilungen, Abgasnachbehandlung mit Partikelfilter und Partikelkatalysator, Versuchsträger LKW EURO III 6-Liter-Klasse Motor: a- Mittellast gemessen mit SMPS und ELPI, b- Mittellast gemessen mit SMPS und ELPI – logarithmische Skalierung der y-Achse, c- Mittelwert der Partikelemissionen bei ETC – Zyklus gemessen mit ELPI, d- Partikelanzahlreduktion

Stationärer Motorbetrieb: Die Partikelanzahlreduktionsraten beim Partikelfilter (geschlossenes System, Applikation am LKW Motor) im stationären Motorbetrieb waren sehr zufriedenstellend und betragen je nach Lastpunkt zwischen 97 und 99 % (Abbildungen 13.a und 13.b). Beim Partikelkatalysator wurden, in Abhängigkeit vom Lastpunkt, Reduktionsraten in der Größenordnung von bis zu 61% festgestellt.

Dynamischer Motorbetrieb: Im dynamischen Motorbetrieb wurde zur Messung der Partikelanzahlemissionen am transienten Motorprüfstand nur das ELPI (DEKATI) eingesetzt. Als Testzyklus wurde der ETC gewählt. Es ergaben sich den Messungen beim stationären Motorbetrieb ähnliche Reduktionen der Partikelanzahl beim Dieselpartikelfilter (ca 99%): Beim Partikelkatalysator wurde eine Reduktion in der Größenordnung von ca. 35% festgestellt (Abbildung 13,c).

3.3 Vergleich der Partikelanzahlemissionen (Festpartikel) zwischen einem Otto-Motor und einem Dieselmotor mit DPF

Es wurden Messungen der Partikelanzahl- und Größenverteilungen an einem 5-Liter-Klasse PKW Otto-Motor und einem LKW EURO III 6-Liter-Klasse Motor bei dem Einsatz des Teilstromverdünnungssystem (TU Graz) durchgeführt.

Um die ausgeprägte Nukleation (Kondensation) bei der Messung mit dem Otto Motor zu unterdrücken, wurde im Teilstromverdünnungssystem ein Thermodenuder eingesetzt (dementsprechend auch beim Dieselmotor).

Die Festpartikelanzahlemissionen vom Otto-Motor (Abbildung 14.a) liegen etwa in der Größenordnung der Festpartikelanzahlemissionen von einem Dieselmotor mit Partikelfilterabgasnachbehandlung (Abbildung 14.b).

Die Festpartikel-Größenverteilungen des Otto-Motors sind vom Verlauf (Form) den Größenverteilungen des Dieselmotors ähnlich.

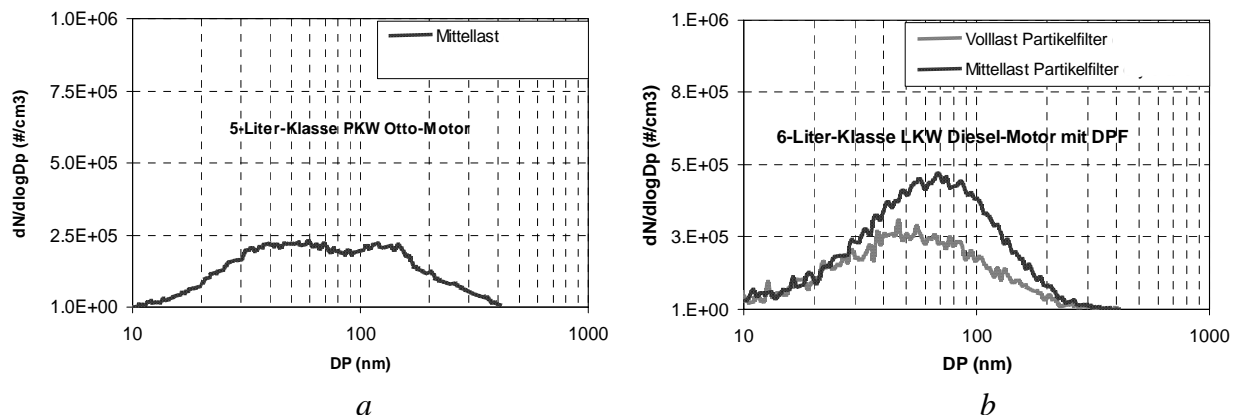


Abbildung 14: Partikelanzahl- und Größenverteilung: a - 5-Liter-Klasse PKW Otto-Motor, b - 6 Liter-Klasse LKW Diesel-Motor

3.4 Ein Beitrag in der Diskussion über die Nukleationspartikelherkunft

Die Abbildungen 15.a bzw 15.b zeigen die Totalpartikelanzahl ($\#/cm^3$) bei jeweils konstantem Moment von 100 Nm bzw. 400 Nm und langsam steigender Drehzahl eines LKW EURO III 6-Liter-Klasse Motor. Die Abbildung 16.c bzw 16.d zeigen NO_x -Emissionen (ppm) bei jeweils konstantem Moment von 100Nm bzw. bei 400Nm und langsam steigender Drehzahl.

Aus dem Vergleich der Abbildungen 16.b und 16.d beim 400 Nm Motormoment ergeben sich nicht übereinstimmende Verläufe dieser zwei Abgaskomponenten. Bedingt durch die hohe Abgastemperatur handelt es sich bei den gemessenen Partikeln um Festpartikel.

Bei niedrigerem Motormoment (100 Nm) ergeben sich sehr ähnliche Verläufe der zwei Abgaskomponenten (Abbildungen 16.a und 16.c). Bedingt durch die niedrigere Abgastemperatur handelt es sich bei den gemessenen Partikeln vorwiegend um Kondensationspartikel.

Diese Messungen zeigen als Arbeitshypothese, dass NO_x möglicherweise stark an der Bildung der Nukleationspartikel beteiligt ist. In welcher Weise das erfolgt, ist die Frage mit welcher sich zukünftige Untersuchungen beschäftigen werden.

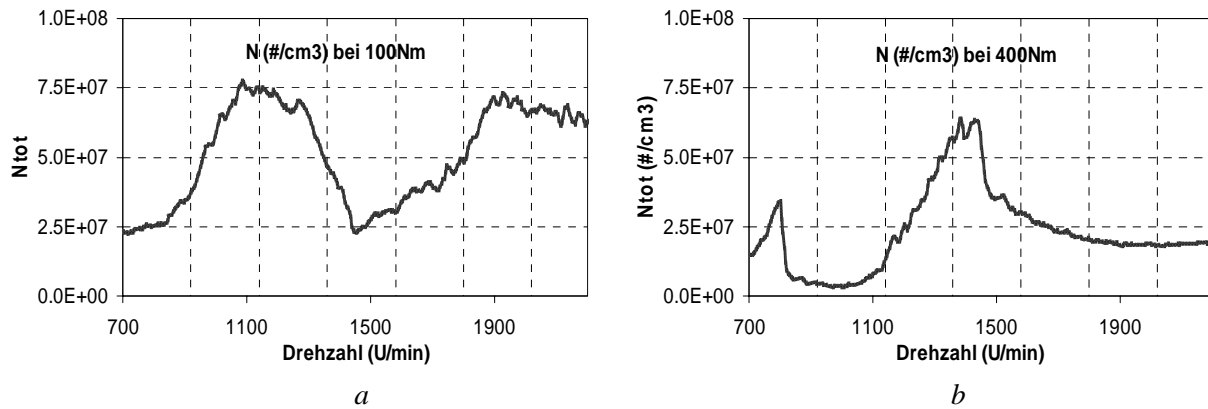


Abbildung 15: Versuchsträger: LKW EU III 6-Liter-Klasse Motor, N_{tot} ($\#/cm^3$) konstantes Moment: a-100Nm, b-400 Nm

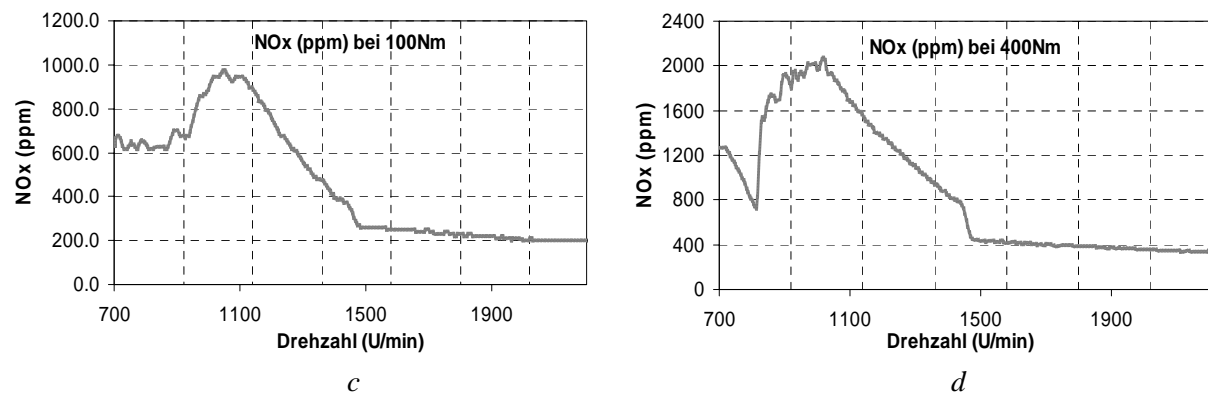


Abbildung 16: Versuchsträger: LKW EU III 6-Liter-Klasse Motor, NO_x (ppm) konstantes Moment: a-100Nm, b-400 Nm

Literatur

- [1] Rodt, S.: Future Diesel. Abgasgesetzgebung PKW, leichte Nfz und LKW – Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen. Umweltbundesamt Berlin, Juli 2003
- [2] Cartus T., Dofrer F., Schindler W, Reischl, Messverfahren und Bewertung von Partikelemissionen VDA Kongress Frankfurt, 1999
- [3] Bechman O., Carli S., Engler W., Garbe T., Lach G., Ryan L., Schindler K., Partikelemission und -messung aus Sicht des Anwenders: heute und morgen, Volkswagen AG, Wolfsburg, 2002

- [4] Ivanisin M., Hausberger S., Schindler W., Messung von Partikelanzahl- und Größenverteilung an Motoren - Effekte der Probennahme auf Fest- und Nukleationspartikel, Tagungsband: 3. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, Sinsheim, 14-15 September 2004
- [5] Brüske-Hohlfelder I., Cyrus J., Peters A., Dockery D.W., Auswirkung der Luftverschmutzung auf die Gesundheit: Ergebnisse epidemiologischer Studien, Tagungsband: Minimierung der Partikelemissionen von Verbrennungsmotoren, München, 22-23 Juni 2004
- [6] Mohr, M., Lehmann, U.: Comparison Study of Particle Measurements Systems for Future Type Approval Application. EMPA research report No 202779, Dübendorf, Mai 2003
- [7] GRPE Particle Measurement Programme (PMP), Government Sponsored Work Programmes: Progress Report. Informal document No. 16, 46th GRPE, 19-23 May 2003, agenda item 2
- [8] Burtscher H., Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines done for the Particle Measurement Programme (PMP), 2001
- [9] Ivanisin M, Dissertationsarbeit: Messtechnische Untersuchung der Partikelanzahlemissionen moderner Fahrzeugmotoren, Graz, 2004
- [10] Ferin, J., Oberd. orster, G., Penny, D.P., Pulmonary retention of ultrafine and fine particles in rats American Geophysical Research Letters 28, 4191-4194, 1992
- [11] Donalds, K., Li, X.Y., MacNee, W, Ultrafine (nanometer) particle mediated lung injury Journal of Aerosol Science 29, 553-560, 1998
- [12] Bockhorn H., Soot Formation in Combustion, Springer Verlag Berlin, Berlin, 1994
- [13] Geringer B., I., Weissler W., Reischl G. P., Wopelka T., Charakterisierung der Partikelemissionen bei ottomotorischen Brennverfahren, Tagungsband: 13. Aachener Kolloquium, Aachen, 04-06 Oktober 2004
- [14] Schubiger R. A. , Untersuchungen zur Russbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie, Diss., Technische Wissenschaften, ETH Zürich, Nr. 14445, Zürich, 2002
- [15] PM10 Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen, und Massnahmen, Abteilung Luftreinhaltung und NIS, Sektion Grundlagen, <http://www.umweltschweiz.ch/imperia/md/content/luft/fachgebiet/d/463.pdf>
- [16] Lexikon Verbrennungsmotor Partikel, Vorschlag Technik Thermische Maschinen TTM, CH-5443 Niederrohrdorf: <http://www.akpf.org/pub/lexicon10-3-2000.pdf>
- [17] Federal Register, Volume 66, Number 12, Rules and Regulations "Control of Emissions from New and In-Use Highway Vehicles"
- [18] Ntziachristos L., Giechaskiel B, Pistikopoulos P., Samaras Z., Mathis U., Mohr M., Ristimäki J., Keskinen J., Mikkanen P., Casati R., Scheer V., Vogt R. (2004): Performance Evaluation of a Novel Sampling and Measurement System for Exhaust Particle Characterization, SAE Paper 2004 04FL-115
- [19] MacDonald J.S., Plee S.L., D'Arcy J.B., Schreck R.M. (1980): Experimental Measurements of the Independent Effects of Dilution Ratio and Filter Temperature on Diesel Exhaust Particulate Samples, SAE Paper 800185
- [20] Khalek I.A., Ulman T.L. Shimpi S.A., Jackson C.C. Dharmawardhana B., Silvis W.M., Kreft N., Harvey R.N., Munday D.; Yamagishi Y., Graze R.; Smitherman, J., Adkins, J. (2002): Performance of Partial Flow Sampling Systems Relative to Full Flow CVS for Determination of Particulate Emissions under Steady-State and Transient Diesel Engine Operation, SAE Paper 2002-01-1718
- [21] Silvis W.M., Marek G., Kreft N., Schindler W. (2002): Diesel Particulate Measurement with Partial Flow Sampling Systems: A New Probe and Tunnel Design that Correlates with Full Flow Tunnels, SAE Paper 2002-01-0054
- [22] Khalek I.A., Kittelson D.B., Graskow B.R., Wei Q., Brear F. (1998): Diesel Exhaust Particle Size: Measurement Issues and Trends SAE Paper 980525.

- [23] Maricq M.M., Chase R.E., Podsiadlik D.H., Vogt R. (1999): Vehicle Exhaust Particle Size Distributions: A Comparison of Tailpipe and Dilution Tunnel Measurements, SAE Paper 1999-01-14613
- [24] Aitken, J.: On a Simple Pocket Dust Counter. Proc. Royal Soc. Edinburgh, Vol. XVIII, 1890-1891
- [25] Agarwal, J.K., G.J. Sem: Continuous Flow Single-Particle-Counting Condensation Nuclei Counter. J. Aerosol Sci., Vol. 11, No. 4, pp. 343–357, 1980
- [26] Dolan, D.F., Kittelson, D.B., Pui, D.Y.H.: Diesel Exhaust Particle Size Distribution Measurement Techniques, SAE Paper 800187, Presented at SAE Conference and Exposition, Cobo Hall, Detroit, February 25-29 and contained in SAE Proceedings P-86, Diesel Combustion and Emissions, 1980
- [27] Burtcher H., “Literature Study on Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines”, Fachhochschule Aargau, University of Applied Science, CH 5210 Windisch, Switzerland, done for the Particle Measurement Programme (PMP) for BUWAL/GRPE, 2001
- [28] Wiedensohler, A., et al.: Intercomparison Study of the Size-Dependent Counting Efficiency of 26 Condensation Particle Counters, Aerosol Sci. Technology, 27 pp. 224/242, 1997
- [29] Liu, W., Osmondson, B.L., Bischof, O.F., Sem, G.J.: Calibration of Condensation Particle Counters, SAE-Paper 2005-01-0189, SAE International, 2005
- [30] Rohmann, H., Z. Phys. 18:188, 1923
- [31] Liu, B.Y.H., Pui, D.Y.H.: Electrical Neutralization of Aerosols. J. Aerosol Sci., 5:465–472, 1974
- [32] Knutson E.O., Whitby, K.T.: Aerosol Classification by Electric Mobility: Apparatus Theory and Applications, J. Aerosol Sci., 6:443, 1975
- [33] Wiedensohler, A.: An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range, J. Aerosol Sci., Vol. 19, No. 3, 387–389, 1988
- [34] Ivanisin M., Hausberger S.: Experimental Study on Particle Number Emissions of Modern Vehicle Engines; SAE 2005-01-0191, 2005
- [35] Bischof, O.F., Horn, H.-G.: Zwei Online-Messkonzepte zur physikalischen Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Motorabgasen am Beispiel von Dieselemissionen, MTZ Motortechnische Zeitschrift 60, 4, 1999
- [36] Kinney, P.D., Pui, D.Y., Mulholland, G.W., Bryner, N.P.: Use of the Electrostatic Classification Method to Size 0.1 μm SRM Particles - A Feasibility Study, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 96, 147, 1991
- [37] Schlatter, J.: Internationaler Ringversuch mit Partikelgrößenmessgeräten, Bericht Eidgenössisches Amt für Messwesen, Nr. 2000-230-436, Dezember 2000
- [38] Keskinen, J., Pietarinen, K., Lehtimäki, M.: Electrical Low Pressure Impactor, J. Aerosol Sci., Vol. 23, No. 4, 1992
- [39] Tsukamoto J., Goto Y., Odaka., Continuous Measurement of Diesel Particulate Emissions by an Electrical Low-Pressure Impactor, SAE Paper 2000-01-1138, 2000
- [40] Mirme, A., Noppel, M., Peil, I., Salm, J., Tamm, E., Tammet, H.: Multi-channel electric aerosol spectrometer, In 11th Int. Conf. On Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei, Budapest, 2, pp. 155 – 159, 1984
- [41] Proposal for A Draft Amendment To The 05 Series of Amendments to Regulation No.83 (Emissions of M1 and N1 categories of vehicles), Informal document No. 48-11, 48th GRPE, 1 - 4 June 2004, agenda item 2
- [42] Hüglin, Ch., Scherrer, L., Burtcher, H.: An Accurate, Continuously Adjustable Dilution System (1:10 to 104) for Submicron Aerosols, J. Aerosols Sci., 28, No. 6, pp.1049-1055, 1997
- [43] Matter Engineering AG: Raw Gas Dilution for Aerosols and Gases, Type MD19-2E, Produktbroschüre SKM 970128-5d, Wohlen, Januar 2003
- [44] Will, S., Schraml, S., Bader, K., Leipertz, A.: Performance characteristics of soot primary particle size measurements by time-resolved laser-induced incandescence. Appl. Opt. 37, 5647-5658, 1998

- [45] Fierz, M., Scherrer, L., Burtscher, H.: Real-time measurement of aerosol size distributions with an electrical diffusion battery. *J. Aerosol Sci.*, Vol. 33, 1049-1060, 2002
- [46] Booker, D., Gautam, M, Carder, D., Gautam, S.: Real-Time Particle Characterization of Diesel and Gasoline Particulate Mass, 5.th ETH Conference on Nanoparticle Measurement, Zurich, August 2001.
- [47] Hausberger S. II ,PARTICULATES Lab Report, TU-Graz, Draft, 18.11.2003, Number of the Proposal:GRD1-1999-11091,2003
- [48] Bukvarevic E., Engler D., Hausberger S. (2002): Results from the Pre-Tests on a HDV at the Chassis Dynamometer at TU-Graz, Internal report for PARTICULATES, Draft Version – 9/2002

SMPS™, *Engine Exhaust Particle Sizer*™, EEPS™ und TSI® sind Warenzeichen von TSI Inc., St. Paul, MN (USA). ELPI™ ist ein Warenzeichen von Dekati Oy, Tampere (Finnland). LI²SA® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Esyttec GmbH, Erlangen (Deutschland).