

Feinpartikel-Messverfahren und -Geräte

1. Überblick

Verschiedene gesetzlich noch nicht festgelegte Mess- und Charakterisierungsverfahren der Nanopartikel werden verwendet. Fig. 1 zeigt mögliche Anordnung der Probenahme und prinzipielle Zeit- und Grössenauf- lösung dieser Verfahren.

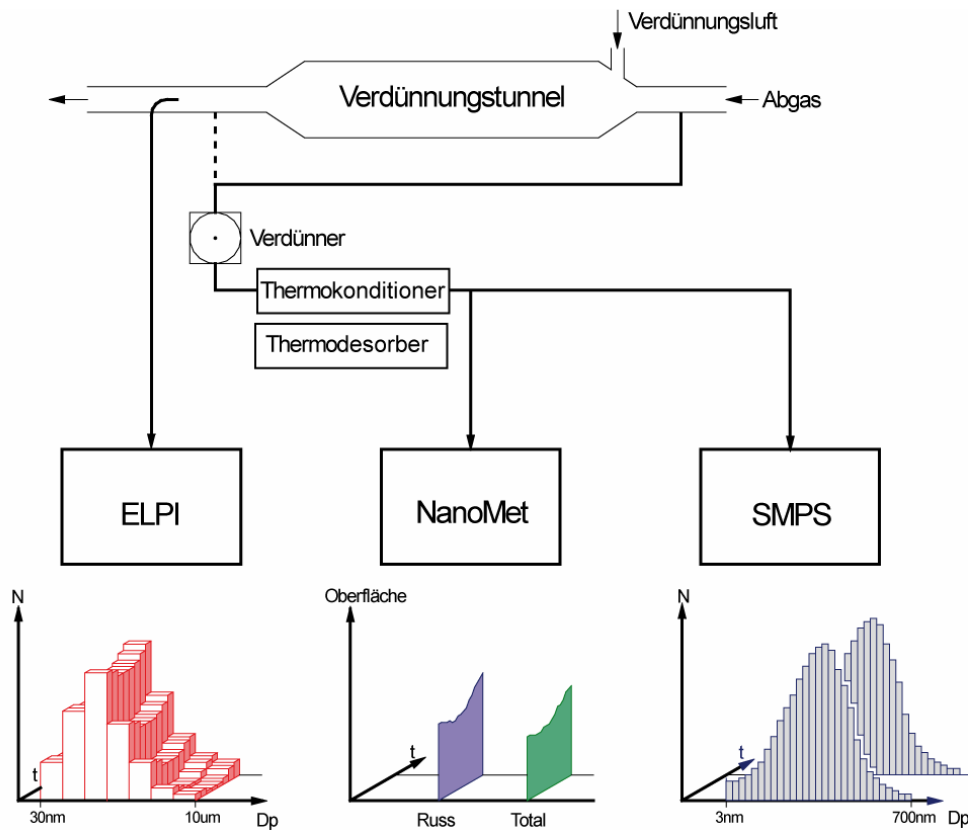


Fig. 1 Nanopartikel- Messverfahren, Partikel-Charakterisierung und Zeitauflösung

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

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

Tabelle 1 zeigt die ausgesuchten Eigenschaften der in den Tests gebrauchten Messausrüstung. Genauere Beschreibungen befinden sich im Kap. 2.

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

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

2. Detailbeschreibung der Messgeräte und-Systeme

ELPI

Das ELPI (**E**lectrical **L**ow **P**ressure **I**mpactor), dargestellt im Blockdiagramm Fig. 2, ist ein 12-stufiger Kaskaden-Impaktor, der die Partikel-Anzahlkonzentration in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmesser misst.

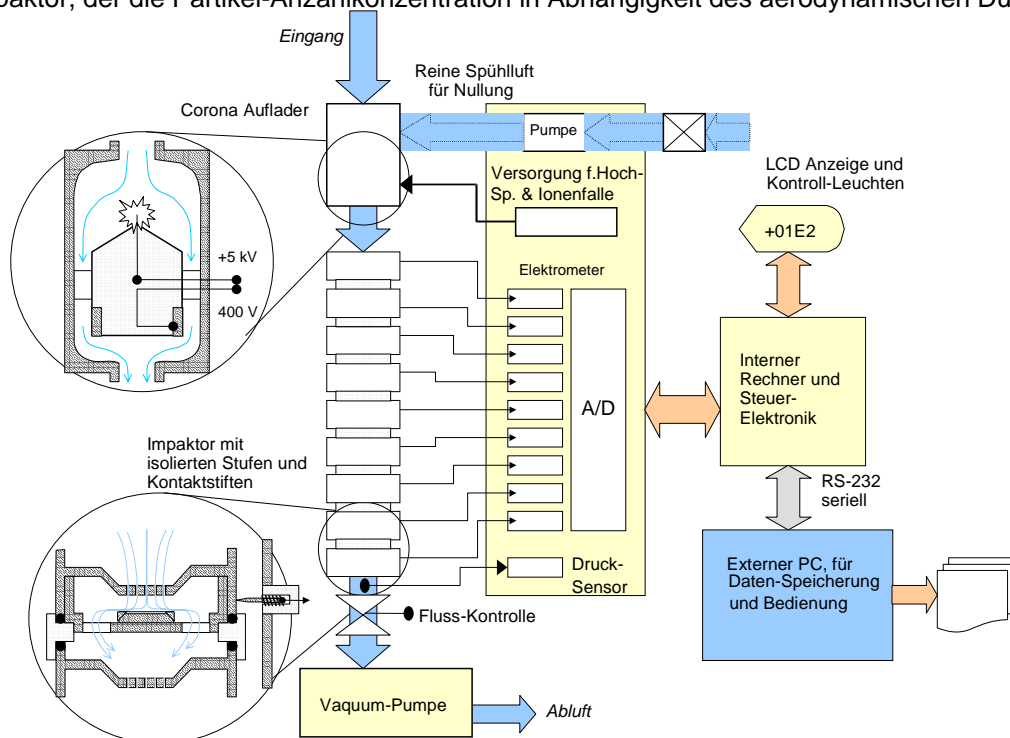


Fig. 2: ELPI Block-Diagramm

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

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

Nach dieser Klassierung wird die Menge der in jeder Stufe abgeschiedenen Partikel quantifiziert. Im klassischen Impaktor geschieht dies durch gravimetrische Bestimmung der Partikelmasse in jeder Stufe. Diese Methode hat zwei wesentliche Nachteile. Sie ist unempfindlich, da hohe Partikelkonzentrationen oder lange Sammelzeiten für eine hinreichende Genauigkeit notwendig sind und sie erlaubt keine kontinuierliche Messung. Die folgenden Massnahmen erweitern das ELPI zu einem sowohl kontinuierlich wie über grössenklassierte gravimetrische Filteranalysen arbeitenden System: Die Partikel werden nach dem Eintritt vor den Impaktorstufen über eine Diffusionsaufladung elektrisch unipolar aufgeladen. Jede isoliert montierte Impaktorstufe ist mit dem Eingang eines Elektrometer-Verstärkers verbunden. Die einzelnen Impaktorstufen nehmen die Ladung der abgeschiedenen Partikel auf, welche im dazugehörigen Elektrometerverstärker mit einer Zeitauflösung im Sekundenbereich verstärkt und weiterverarbeitet wird. Aus der bekannten mittleren Ladung pro Partikel in Abhängigkeit der Partikelgrösse lassen sich die 12 elektrischen Signale in eine Anzahl-Konzentration-Grössenverteilung in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers von 30 nm bis 10 μm umrechnen (Fig. 3).

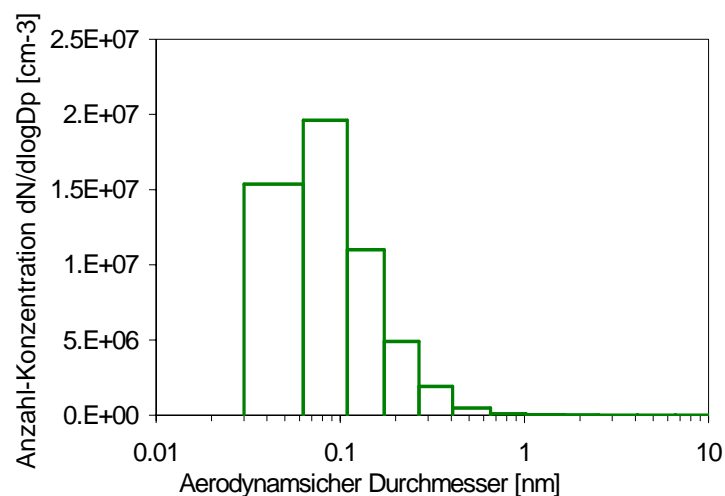


Fig. 3: Typische ELPI-Grössenverteilung. Die Verteilung wurde im Abgas eines Diesel PKW mit Common Rail-Motor bei 70 km/h auf dem Rollenprüfstand gemessen

SMPS

SMPS (**Scanning Mobility Particle Sizer**) dargestellt im Blockdiagramm Fig. 4, ist ein Mess-System zur Bestimmung von Partikel-Größenverteilungen in Abhängigkeit des Mobilitäts-Durchmessers [19]. Es setzt sich zusammen aus einem bipolaren Auflader, einem differentiellen Mobilitäts Analysator (DMA), einem Kondensationskern Partikelzähler (CPC) und einer PC-Software für die Steuerung des Systems.

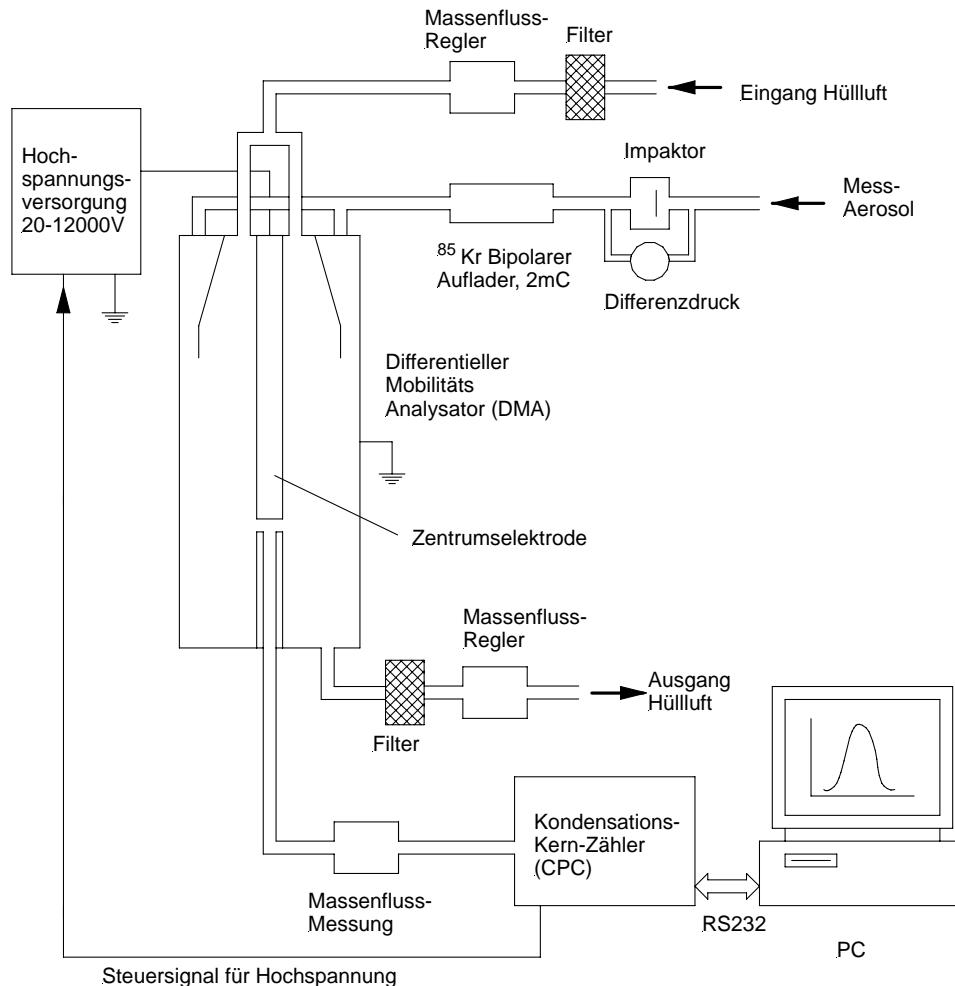


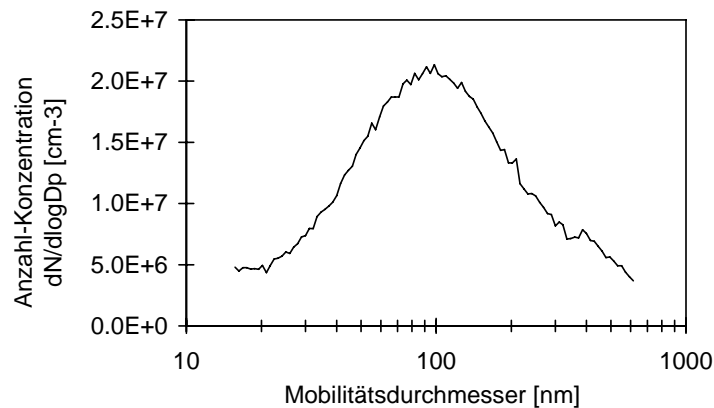
Fig. 4: Blockdiagramm von SMPS

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

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

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

SMPS beinhaltet eine PC-Steuersoftware, die in wählbaren Scan-Zeiten die Hochspannung des DMA variiert und die im CPC gemessene Anzahlkonzentration dem entsprechenden Mobilitätsdurchmesser zuordnet. Unter Berücksichtigung aller Parameter wie DMA-Geometrie, Gasflüsse, Ladungsverteilung nach dem Neutralisator und Scan-Zeiten wird über die Software eine Grössenverteilung berechnet, die als Anzahl-, geometrische Oberflächen- oder Volumen-Konzentration darstellbar ist. [Fig. 5](#) zeigt eine solche Verteilung als Anzahl-Konzentration.



[Fig. 5](#): Typisches SMPS-Grössenspektrum für Russpartikel aus einem Dieselmotor bei niedriger Drehzahl und hoher Last

NanoMet

NanoMet ist ein modulares Messsystem für die online Charakterisierung von Aerosolen, bestehend aus einem Miniverdünner, einem Verdampfungsrohr, zwei Sensoren und verschiedenem Zubehör für den Einsatz im Feld, in Prüfeinrichtungen wie auch im Labor, [2, 3].

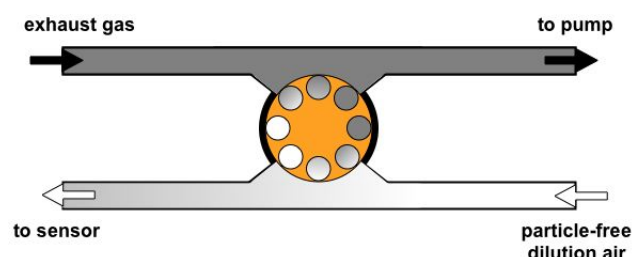
Im vorliegenden Messprogramm kamen folgende NanoMet-Komponenten zum Einsatz:

- Ein Miniverdünner, der direkt an das Auspuffsystem angeschlossen, die Partikelkonzentration auf ein Niveau innerhalb der Sensor-Nennbereiche verdünnt.
- Ein Thermokonditioner (ein Verdampfungsrohr) um die nach dem Verdünner verbleibenden Tröpfchen aus flüchtigem Material zu verdampfen.
- Zwei online messende Sensoren, der Diffusions-Aufladungs-Sensor (DC) für die aktive Partikel-Oberfläche und der photoelektrische Aerosol-Sensor (PAS) für die Russ-Oberfläche

MD19-Miniverdünner

Der Miniverdünner [8], ist eine Komponente des beschriebenen NanoMet Feinpartikel-Messsystems. Als Typ MD19 ist er ein eigenständiges kompaktes Gerät für die Probenahme aus dem Rohgas und dessen Verdünnung. Im Rahmen des maximal verfügbaren Messgasflusses von 5 l/min können ihm auch andere Messgeräte für Feinpartikel oder Gase nachgeschaltet werden.

Die herausragenden Vorteile dieses Verdünners sind seine kompakte Konstruktion und einfache Bedienung, die kontinuierliche Einstellung des Verdünnungsverhältnisses über 2 Dekaden und der schnelle Anschluss des Probenahmekopfes an geschlossene Systeme mit unverdünntem Abgas. Der Aufbau ist in [Fig. 6](#) dargestellt.



[Fig. 6](#): Schema des MD19 Rotationsdisk-Miniverdünners

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

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

Verdampfungsrohr (Thermokonditioner)

Der Filtrationswirkungsgrad eines DPF ist definitionsgemäss auf feste Partikel bezogen. Zusätzlich zu den festen Russ- und Aschepartikeln beinhaltet jedoch das Motorenabgas mehrere Substanzen, welche den DPF dampfförmig passieren: Kohlenwasserstoffe (HC), Sulfate und Wasser. Wenn das Abgas abkühlt bis zur Umgebungstemperatur können diese Stoffe zu Nanotröpfchen nukleieren und kondensieren. Um aussagekräftige Messungen über DPF- Wirkungsgrad auszuführen müssen die zwei Fraktionen (fest und flüchtig) getrennt werden, da die meisten Messinstrumente zwischen Tröpfchen und Feststoffen nicht unterscheiden können.

Die direkteste Methode, um die flüchtigen Tröpfchen aus der Abgasmessprobe zu entfernen, ist diese in einem beheizten Rohr zu verdampfen, [3]. Wenn das Gas jedoch die flüchtigen Stoffe in sehr hoher Konzentration beinhaltet, werden diese nach dem beheizten Rohr wieder zu Tröpfchen kondensieren und es ergibt sich kein Vorteil aus der thermischen Behandlung. Wenn das Gas jedoch verdünnt ist, bevor es in das Verdampfungsrohr eintritt, die Konzentration des flüchtigen Stoffs wird tief genug sein, um diese in der Dampfphase auch nach der beheizten Strecke zu halten. Diese Methode nennt sich „post-dilution thermo conditioning“ (PDTC).

PDTC entfernt die flüchtigen Substanzen nicht aus dem Abgas, erhält sie jedoch in Dampfphase, statt in Partikelform.

Fig. 7 zeigt das Schema von PDTC bestehend aus Rotationsdisk-Miniverdünner MD19 und Verdampfungsrohr (Thermokonditioner).

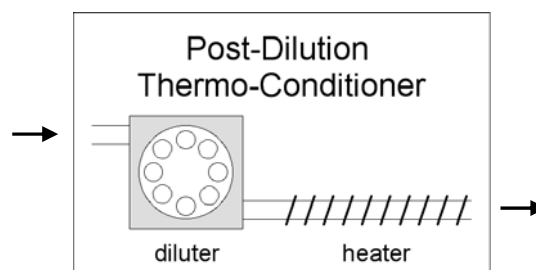
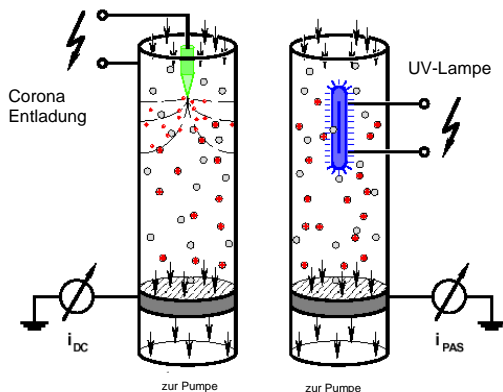


Fig. 7: Post-dilution thermoconditioning (PDTC) – Minidiluter + Verdampfungsrohr

PAS- und DC-Sensor

Die beiden Partikelsensoren laden die Partikel elektrisch auf, bevor sie in einem hoch isolierten Partikelfilter aufgefangen werden. Das Funktionsprinzip ist in Fig. 8 dargestellt.



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

Fig. 8: Prinzipschema von PAS- und DC-Sensor

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

Für die Charakterisierung der Partikel werden zwei verschiedene Aufladungsmethoden angewendet. In beiden Methoden wird ein Elektrometer verwendet. Dieser Elektrometer-Verstärker erzeugt aus der integrierten Partikel-Ladung ein Gleichspannungs-Signal mit einer Ansprechzeit, die bis 0.5 Sek. optimiert werden kann. Der gemessene Strom ist proportional zur Wahrscheinlichkeit, mit der die Partikel aufgeladen werden.

Im DC-Sensor erhalten die Partikel ihre Ladung über eine Diffusions-Aufladung von unipolaren, in einer Corona-Entladung erzeugten Gasionen. Die Ladungs-Effizienz ist abhängig von der nach der Mobilität definierten Grösse und weitgehend unabhängig von der chemischen Zusammensetzung. Das mit der Diffusions-Aufladung gemessene Signal aus dem Elektrometer-Verstärker ist ein Mass für die aktive Oberfläche und wird auch als Fuchs Oberfläche bezeichnet.

Für kleine Partikel-Durchmesser unterhalb der freien Weglänge λ des Trägergases ($\lambda = 66 \text{ nm}$), d.h. im Bereich der freien molekularen Bewegung des Partikels entspricht die aktive Oberfläche der geometrischen Oberfläche $\pi (D_p)^2$. Für grosse Partikel, die sich im laminaren Trägergas nach dem Stokes Gesetz bewegen, ist die aktive Oberfläche proportional zu D_p . Der Zwischenbereich wird interpoliert durch eine Exponentialfunktion, dessen Exponent sich kontinuierlich von 2 im molekularen auf 1 im Stokes Bereich ändert.

Die Berechnung der aktiven Oberfläche beruht auf der in Keller et. al. [9] hergeleiteten Beziehung, wonach das Produkt aus Mobilität und Massentransfer-Koeffizient für Gasionen eine von der Partikelgrösse unabhängige Konstante ist. Diese grössenunabhängige Relation ermöglicht eine Kalibrierung des DC-Sensors mit Standard Partikel-Messgeräten. Der Kalibrationsfaktor berechnet sich aus dem Vergleich des DC-Signals mit der Anzahlkonzentration, wenn DC-Sensor und CPC parallel die monodispersen Partikel einer bekannten Mobilität resp. Grösse aus einem DMA messen.

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

Für verschiedene Verbrennungsaerosole findet man eine gute Korrelation des PAS-Signals zur Konzentration der an die Partikel gebundenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PPAH) [10]. Bei Russpartikel von Dieselmotoren in Emissionen wie auch quellennahen Immissionen korreliert das PAS-Signal zudem mit der coulometrisch gemessenen Konzentration des elementaren Kohlenstoffs (EC) [11]. Andere in Verbrennungsabgasen auftretende Partikel, z.B. im Verdünnungsprozess entstehende flüchtige Nanopartikel oder mineralische Nanopartikel aus Treibstoff-Zusätzen sowie auch Gase lassen sich vom UV-Licht nicht aufladen. Mit dieser selektiven, chemieabhängigen Aufladungseffizienz wird PAS zum idealen selektiven Russdetektor mit geringer Querempfindlichkeit zu andern Stoffen.

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

- Das PAS/DC-Signal-Verhältnis hat charakteristische, sich von einander deutlich unterscheidende Werte für die Partikel aus verschiedenen Verbrennungsquellen (siehe Fig. 9). Bei Kenntnis möglicher Verbrennungsquellen erlaubt dies in beschränktem Umfang eine Quellenzuordnung.
- Bei der Messung von Dieselmotor-Emissionen erkennt man aus dem PAS/DC-Signal-Verhältnis, ob das Abgas sich ausschliesslich aus Russpartikeln oder weiteren Partikeln wie flüchtigen oder mineralischen Nanopartikeln zusammensetzt.

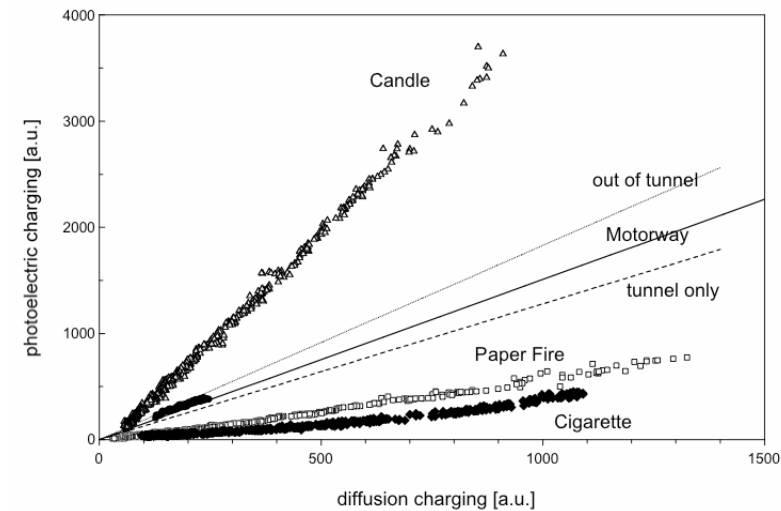


Fig. 9: PAS/DC-Signal-Verhältnis für verschiedene Verbrennungsaerosole

Thermodesorber

Die Funktion des Thermodesorbers ist die Unterscheidung von flüchtigen und nichtflüchtigen Partikeln in einem Aerosolgemisch. Diese Flüchtigkeit bezieht sich auf eine Verdampfungs-temperatur der Partikel, die in der Heizzone des Thermodesorbers bis 330 °C eingestellt werden kann. Der in Fig. 10 schematisch dargestellte, in den Messprogrammen eingesetzte Thermodesorber ist ein Eigenbau des Lab. für Festkörperphysik der ETH-Zürich.

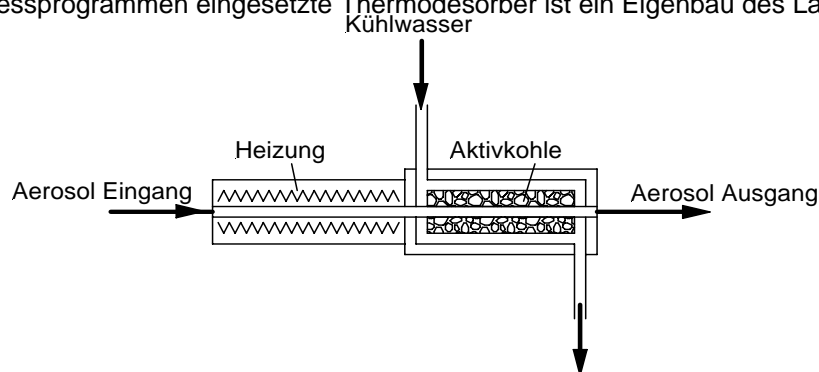


Fig. 10: Blockschaema des Thermodesorbers

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

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

Fig. 11 zeigt eine SMPS-Grössenverteilungs-Mess-Serie am Dieselpfprüfstand hinter einem Sintermetall-Partikelfilter der einen Wirkungsgrad von etwa 99 % für die Abscheidung von Feinpartikel hat. Beim Start der SMPS-Messungen wird die auf etwa 330 °C eingestellte Heizung des Thermodesorbers abgeschaltet. Während der Abkühlphase werden mit einer Scan-Zeit von 2.5 Min entsprechend einem Temperaturraster von 20-30 °C laufend Grössenspektren gemessen. In diesem Thermogramm sieht man in der Verteilung oberhalb 204 °C nur die für nichtflüchtige Dieselpartikel typische monomodale Verteilung mit dem Maximum bei etwa 100 nm. Unterhalb 200 °C treten Nanopartikel im Grössenbereich von etwa 20 nm auf, deren Anzahlkonzentration um mehr als 2 Dekaden höher als jene der Dieselpartikel liegt. Die Anzahlkonzentration steigt durch dieses Phänomen auf höhere Werte als die totale Anzahlkonzentration ohne Partikelfilter. Es ist inzwischen bekannt, dass, vor allem beeinflusst durch katalytisch wirkende Abgas-Nachbehandlungselemente, Gase im Verdünnungsprozess spontan zu solchen Nanopartikeln nuklieren können. Ein häufig beobachteter Prozess nach solchen katalytischen Elementen ist die Aufoxidierung von SO₂ in SO₃, was im Verdünnungs- und Abkühlprozess zur Bildung von wässrigen Schwefelsäuretröpfchen im Grössenbereich von wenigen 10 nm führt.

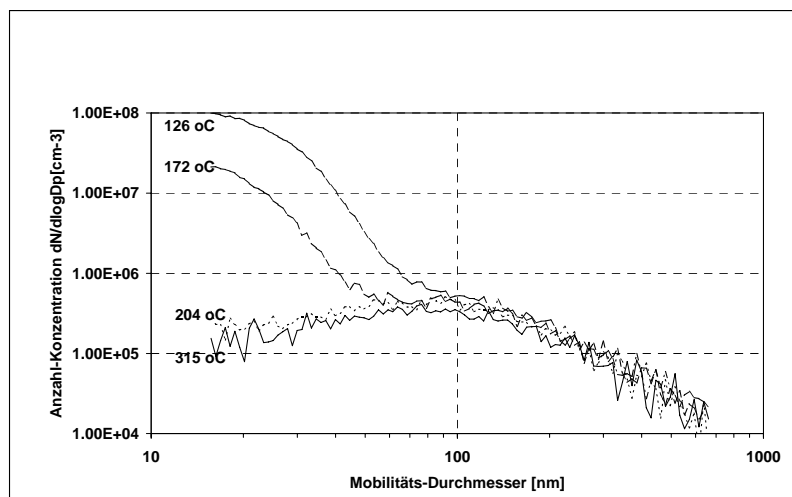


Fig. 11: Thermogramm mit SMPS-Grössenverteilungen von Dieselpartikel-Emissionen hinter einem Sintermetall-Partikelfilter

3. Schrifttum

1. Mayer, A, Czerwinski, J, Legerer, F, Wyser, M (2002) VERT Particulate Trap Verification. SAE 2002-01-0435
2. Kasper, M, Matter, U, Burtscher, H, Bukowiecki, N, Mayer, A (2001) NanoMet, a New Instrument for On-line Size- and Substance-Specific Particle Emission Analysis. SAE 2001-01-0216
3. Kasper, M. (2004) The Number Concentration of Non-Volatile Particles Design Study for an Instrument According to the PMP Recommendations, SAE 2004-01-0960
4. Wang, S C, Flagan, R C (1990) Scanning Electrical Mobility Spectrometer, Aerosol Sci. Technol. 13, 230-240
5. Hinds, W C (1999) Aerosol Technology, 2nd ed., J. Wiley & Sons New York
6. Adachi, M., Kousaka, Y., and Okuyama, K. (1985) J. Aerosol Sci. 16, 109
7. Knutson, E.O. and Whitby, K.T. (1975a) J. Aerosol Sci. 6, 443, and (1975b) J. Aerosol Sci. 6, 453
8. Hueglin, Ch., Scherrer, L., Burtscher, H. (1997) An Accurate, Continuously Adjustable Dilution System (1:10 to 1:104) for Submicron Aerosols, J. Aerosol Sci. 28/6, 1049-1055
9. Keller, A., Fierz, M., Siegmann, K., Siegmann, H.C., Filippov, A. (2001) Surface Science with Nanosized Particles in a Carrier Gas, J. Vac. Sci. Technol. A19(1)
10. Burtscher, H., Siegmann, H.C. (1994) Monitoring PAH-Emissions from Combustion Processes by Photoelectric Charging, Combust. Sci. Tech. 101, 327-332
11. Matter, U., Siegmann, H.C., Burtscher, H. (1999) Dynamic Field Measurement of Submicron Particles from Diesel Engines, Environ. Sci. Tech. 33, 1946-1952