

Graz, 11.4.2004

Messtechnik zur Charakterisierung der Partikelemission im Fahrzeugabgas für Forschung / Entwicklung

Bernhard Heiden

Abstract

Health effects of „Fine Dust“ and their physical causes

A theoretical proof is shown in three steps for the evidence of the direct number dependency of fine dust instead of the currently mass dependent limitation legislation, based on Fick's law of diffusion. Some outlook is given for practical application and verification in medical devices to be built or yet available.

Feinstaub Grundlagen – Massenmessung vs. Anzahlmessung

Der fachliche Terminus für Feinstaub wird als PM_{10} bezeichnet. PM_{10} bezieht sich auf die Massenverteilung von Partikeln unterschiedlichen Durchmessers, wobei 50% der Masse der Partikel kleiner als $10\ \mu\text{m}$ sind. Da 50% der Masse größer als $10\ \mu\text{m}$ 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 PM_{10} enthalten. Der Grund für die Verwendung dieser technischen Einteilung liegt in der *Trägheitsabscheidung* der Partikel. Typischerweise wird zur Massenbestimmung ein Impaktor¹ verwendet. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer scharfen Umlenkung des Fluidstromes und einer Prallplatte (Impaktor). Schwere Partikel beschleunigen langsamer als leichte und prallen im Gegensatz zu diesen auf die Prallplatte und werden somit aus dem Fluidstrom abgeschieden. Um eine Wiederaufwirbelung der anhaftenden Partikel zu vermeiden werden die Prallplatten „eingefettet“. Dieser Trennvorgang ist zufallsverteilt wobei es in Bezug auf die Masse einen mittleren Durchmesser gibt. Wählt man die Strömung so, dass in Bezug auf die Masse der mittlere Durchmesser $10\ \mu\text{m}$ beträgt spricht man von PM_{10} . Die Zahl 10 kann nun durch eine beliebige Zahl ersetzt werden. So gibt es beispielsweise Messungen für PM_1 , und $PM_{2.5}$.

Entsprechend den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen in der EU sind die Grenzwerte für PM_{10} (Feinstaub) einzuhalten. Diese sind für Österreich nach dem IG-L (Immisionsschutzgesetz für Luft) derzeit $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Tagesmittelwert bei maximal 35 Überschreitungen pro Jahr und $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Jahresmittelwert. Diese Grenzwerte beziehen sich auf (normal) gesunde Erwachsene. Bei damit in Zusammenhang stehenden Erkrankungen insbesondere Atemwegserkrankungen und bei Kindern sind selbst diese Grenzwerte als zu hoch einzustufen.

Gesundheitliche Effekte und deren physikalische Ursachen

Der Grund für partikelbedingte Erkrankungen ist im Spektrum breit gefächert. Ein wichtiger Punkt im Zusammenhang mit der Trägheitsabscheidung ist, dass der Körper durch die Atemwege Feinstpartikel aufnimmt. Die Abscheidung von PM_{10} findet erst im feinverästelten

¹ Diese kommen z.B. bei Kaskadenimpaktoren wie dem ELPI aber auch in der Probenahme des SMPS und bei den Probenahmeköpfen des TEOM vor.

Lungensystem (Bronchialbaum) statt, das sich aufgrund seiner fraktalen Struktur immer mehr verzweigt. Die Luftgeschwindigkeit v und der Durchmesser d der Luftröhrchen nimmt in Richtung Alveolen ab ($v \sim d$) [1]. Die Minimierung des Luftwiderstandes sowie die Erhöhung der Verweilzeit der Partikel in den tiefsten Röhren des Luftsystems führt zu einer *Diffusionsabscheidung* im Gegensatz zur oben erwähnten Trägheitsabscheidung, eine späte Abscheidung der Luftpartikel ist die Folge. Das ELPI hingegen, das nach dem Prinzip der Trägheitsabscheidung funktioniert, scheidet die kleinsten Partikel von ca. 30 nm mit nahezu Schallgeschwindigkeit ab. Welche Rolle spielt nun dieser Effekt der Diffusionsabscheidung in der Lunge?

Bei der Diffusion spielen die Trägheitskräfte (Massenkräfte) und damit die Masse eine untergeordnete Rolle. Der Transportstrom von n_p Feinstaubteilchen ist nach dem Fickschen Gesetz (Glg. 1.) proportional dem Diffusionskoeffizienten D . Für den Stokes-Einstein Koeffizienten für Diffusion [2] bedeutet dies, dass D umgekehrt proportional zum Partikeldurchmesser d_p ist ($D \sim 1/d_p$). Der Diffusionstransport \dot{n}_p und damit die Abscheidewahrscheinlichkeit steigt also für kleinere Partikel noch an, während die Tendenz zur Trägheitsimpaktion abnimmt. Setzt man Glg. 1 [3] sowie eine konstante Geometrie (d), Zähigkeit und Temperatur voraus, folgt dass die Abscheidebelastung (\sim Diffusionstransport) in der Lunge proportional der Anzahlkonzentration der Partikel und umgekehrt proportional zu ihrem Durchmesser ist (Glg. 2).²

$$\dot{n}_p = \frac{-D}{V_L} \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} \cong \frac{-D \cdot 6}{d^3 \cdot \pi} \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} \quad \text{Glg. 1}$$

$$\rightarrow \dot{n}_p \approx \frac{n_p}{d_p \cdot d^4} \rightarrow \dot{n}_p \approx \frac{n_p}{d_p} \quad \text{Glg. 2}$$

Insgesamt kann man daher aus physikalischen Gründen schließen, dass für *gesundheitliche Effekte* die Anzahl der Feinstaubpartikel³ von entscheidender Rolle ist.

PM10 Messtechnik – TEOM Schwebestaub-Messgerät

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 Messvorgangs gelangt die schwebestaubbeladene Probeluft in den Probenahmekopf (TSP (Gesamtstaub) PM10, PM 2.5). Die Partikel der Probenluft 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 m^3/s unter Normalbedingungen) ergibt schließlich den Wert der Massenkonzentration in g/m^3 bzw. in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

² Darüber hinaus lässt sich erklären wieso Kinder stärker von der Feinstaubbelastung betroffen sind. Da die Lunge kleiner sind, sind somit auch die Durchmesser der Lungenröhrchen kleiner. Aus Glg. 2 folgt aber wenn $d_{\text{Kind}} < d_{\text{Erwachsener}}$ das $\dot{n}_{p\text{Kind}} > \dot{n}_{p\text{Erwachsener}}$. Damit ergibt sich, dass Kinder von Feinstaub stärker belastet werden und dass auf Babys die schlimmsten Auswirkungen zu erwarten sind.

³ darüber hinaus auch deren Oberflächenaktivität

Das TEOM (u.a.) wird zur flächendeckenden Messung der Feinstaubbelastung auf der Immissionsseite eingesetzt. In der Forschung wird es auch vereinzelt für Fahrzeugmessungen verwendet, obschon es für Belastungssituationen in der Umwelt konzipiert wurde und daher ein häufiger Filterwechsel notwendig ist. Die minimale Zeitauflösung liegt im Minutenbereich, da immer eine Einschwingzeit notwendig ist, weshalb es für dynamische Messungen nur eingeschränkt verwendbar ist.

Eine typische Messung von PM_{10} für den NEDC Zyklus ist in Abbildung 1 angegeben. Die Wiederholbarkeit der Messungen ist durchaus vorhanden wie man aus zweimaliger Messung ohne Filter 1-2 sieht. Die Massenverteilung des Abgases lässt sich mit einer Verzögerung messen, resultierend aus der notwendigen Einschwingzeit. Insbesondere ist dies an der Verschiebung der Spitzenmassen mit den Spitzenlasten (v_{max}) ersichtlich.

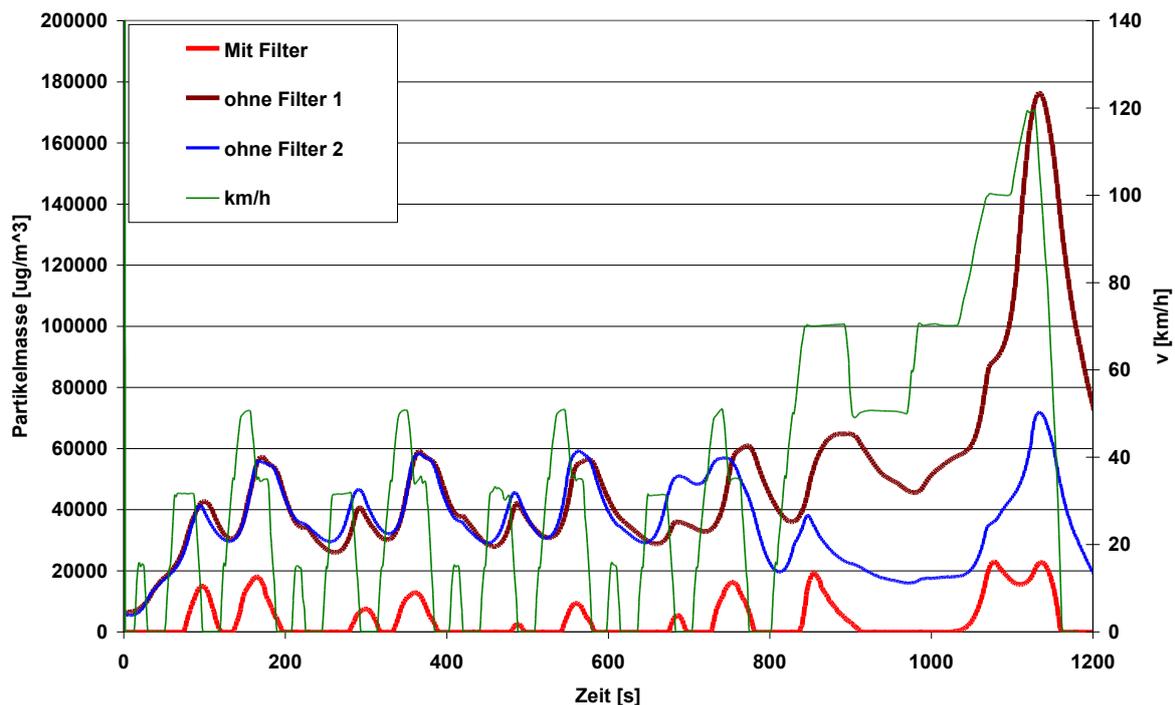


Abbildung 1 an der TUGraz gemessener NEDC Zyklus mit gleichzeitiger Massenbestimmung.

- [1] Mandelbrot, B. B. (1987). Die fraktale Geometrie der Natur, Birkhäuser Verlag, Basel, S.169f.
- [2] Pflügl, M. (2000). Stoffaustausch 4. Aufl., Vorlesungsskriptum, Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik, TU Graz, Graz, S.106
- [3] Pflügl, M. (2000). Stoffaustausch 4. Aufl., Vorlesungsskriptum, Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik, TU Graz, Graz, S.89