

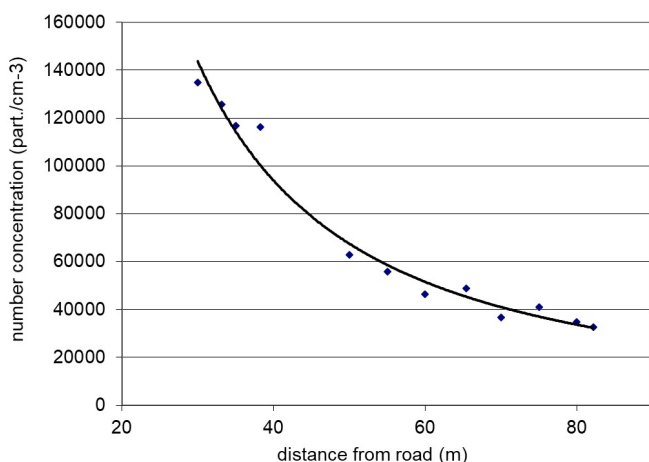
# Feldmesstechnik für Aerosolpartikel

Heinz Burtscher

Institut für Sensoren und Elektronik, FH Nordwestschweiz, Windisch, Schweiz  
Kontakt: heinz.burtscher@fhnw.ch

## Einleitung

Ein Großteil der zur Charakterisierung von Aerosolen entwickelten Geräte sind für den Einsatz im Labor oder in größeren Messstationen vorgesehen und benötigt speziell ausgebildetes Personal zur Bedienung. Daneben gibt es aber viele Anwendungen, bei denen einfache, robuste Messgeräte erforderlich sind. Dafür können Abstriche an Genauigkeit, Auflösung usw. gemacht werden. Dies ist zum Beispiel beim Monitoring an belasteten Orten (z.B. Betriebe, die Nanopartikel herstellen, Verladeterminals usw.) der Fall. Ein weiterer Bereich ist die Erfassung der Exposition mit sehr kleinen Partikeln (unter  $1\ \mu\text{m}$ ). Größere Partikel weisen meist geringe örtliche und zeitliche Variationen auf, können also mit wenigen Messstationen erfasst werden. Dagegen sind diese Variationen bei den ganz kleinen sehr erheblich. So kann zum Beispiel die Partikelkonzentration wenige Meter von einer Straße entfernt bereits um ein Vielfaches kleiner sein als direkt an der Straße (s. Abb. 1). Auch die zeitlichen Änderungen sind sehr groß (z.B. starker Anstieg der Konzentration während der Verkehrsspitzen).



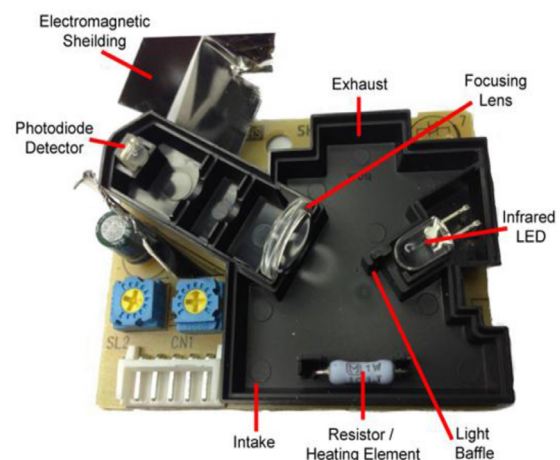
**Abb. 1:** Partikelkonzentration als Funktion des Abstands von der Straße, von [1]

Um dies zu erfassen wird ein engmaschiges Messnetz mit guter zeitlicher Auflösung benötigt. Schon aus Kostengründen ist dies mit Labormessgeräten nicht machbar. Hier kommt die Feldmesstechnik zum Zug. Im Folgenden werden einige Verfahren zur physikalischen Charakterisierung von Aerosolpartikeln kurz vorgestellt. Die wesentlichsten Größen, die gemessen werden sollen, sind Massen-

und Anzahlkonzentration, wobei die Masse eher für größere Partikel von Bedeutung ist, die Anzahl für kleine. Vorwiegend zum Einsatz kommen optische Verfahren (Lichtstreuung, - Absorption und - Extinktion) und elektrische Verfahren (Aufladung der Partikel und Messung als elektrischer Strom).

## Optische Verfahren

Die Lichtstreuung skaliert mit  $d^6$  ( $d$  = Partikeldurchmesser), kommt also in erster Linie für größere Partikel in Frage, da bei kleinen die Streulichtintensität schnell sehr gering wird. Häufig werden Streulichtmessungen eingesetzt, um die Massenkonzentration zu bestimmen. Dabei kann die integrale Streuintensität gemessen werden. Das ist das einfachste Verfahren, sehr viele low cost Sensoren aber auch Rauchmelder beruhen darauf. Abb. 2 zeigt ein Beispiel. Das Licht einer IR-LED wird an Partikeln gestreut, das Streulicht wird über eine Linse auf eine Photodiode geleitet.



**Abb. 2:** Aufbau eines einfachen Streulicht-Sensors (PPD42NS Particle Sensor von Shinyei)

Um die Streuintensität in eine Masse umzurechnen sind Informationen zu Größenverteilung, optischen Daten (Brechungsindex) und Dichte erforderlich. Mehr Information kann erhalten werden, wenn die Streuintensität von Einzelpartikeln gemessen wird (optischer Partikelzähler, OPC). Die Kenntnis des Brechungsindex ist dann immer noch erforderlich, die Größenverteilung kann dann aber aus der Messung bestimmt werden. Die Abhängigkeit vom Brechungsindex kann auch gezielt verwendet werden, um selektiv bestimmte Partikel zu detektieren, ein Beispiel dafür zeigt [2], wo mit einer Streulichtmessung bei zwei Wellenlängen Vulkanasche-Partikel

gemessen werden. Sehr kompakte Zähler sind bereits für wenige 100 Euro erhältlich. Ein Beispiel dafür ist der alphasense OPC-N2 (Abb. 3, rechts).

OPC's sind auch in verschiedensten Ausführungen als hand-held Geräte verfügbar, ein Beispiel ist der Dusttrak von TSI (Abb.3, links). Ein typischer Strahlengang ist in Abb. 4 gezeigt, dabei wird das Streulicht in einem mittleren Winkel von  $90^\circ$  mit einem Öffnungswinkel von  $30^\circ$  gemessen.



Abb. 3: Beispiele für optische Partikelzähler

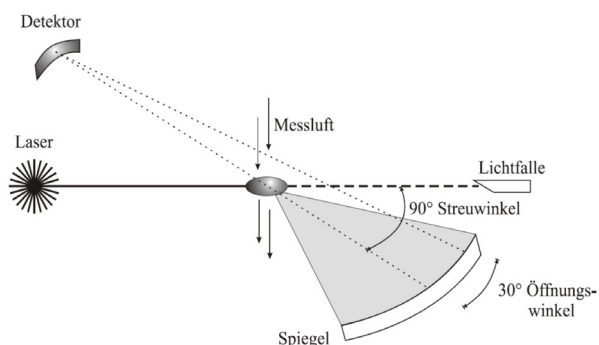


Abb. 4: Strahlengang beim optischen Partikelzähler Grimm R11.

Die Messung der Lichtabsorption wird vor allem zur Elementarkohlenstoffmessung eingesetzt, da dieser in sehr vielen Fällen die Absorption dominiert. Gängige Verfahren in der Feldmesstechnik sind Messung der Filterschwärzung (Mikro-Aethalometer, [www.aethlabs.com](http://www.aethlabs.com)) und auf der Photoakustik beruhende Technologien. Das Grundprinzip der Photoakustik ist in Abb.5 gezeigt. Die Aerosolpartikel werden mit einem gepulsten Laser bestrahlt. Wenn sie Licht absorbieren führt das zu einer Erwärmung, die Wärme wird an das umgebende Gas abgegeben. Wenn dies periodisch passiert entsteht eine Schallwelle, die mit einem Mikrophon detektiert werden kann.

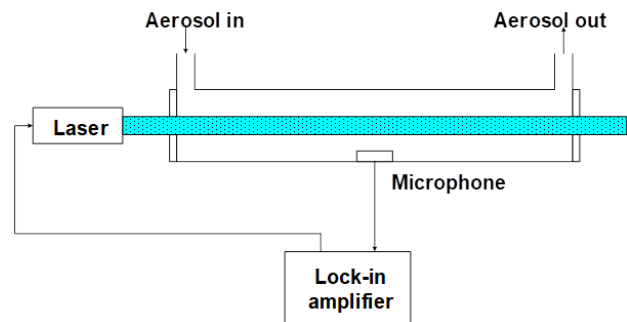


Abb.5: Prinzip der Photoakustik

In Keller et al. [3] wird ein Rauchmelder auf dem Prinzip der Photoakustik gezeigt. Statt die Erwärmung des Gases als Schall zu detektieren kann auch die Dichteänderung und die daraus resultierende Änderung des Brechungsindex gemessen werden, indem die resultierende Laufzeitänderung des Lichtes interferometrisch bestimmt wird (Photothermische Interferometrie) [4]. Bei Partikeln viel kleiner als die Lichtwellenlänge (Rayleigh Bereich) skaliert die Absorption mit dem Volumen, die Partikelgröße muss also nicht bekannt sein, um die Masse zu bestimmen.

## Elektrische Verfahren

Bei den elektrischen Verfahren werden die Partikel in einem ersten Schritt elektrisch aufgeladen. Dies kann durch Anlagerung von Ionen (unipolare oder bipolare Diffusionsaufladung, Abb. 6, unten) oder durch Emission von Elektronen durch Bestrahlung mit UV-Licht (Photoemission, Abb. 6, oben) erfolgen.

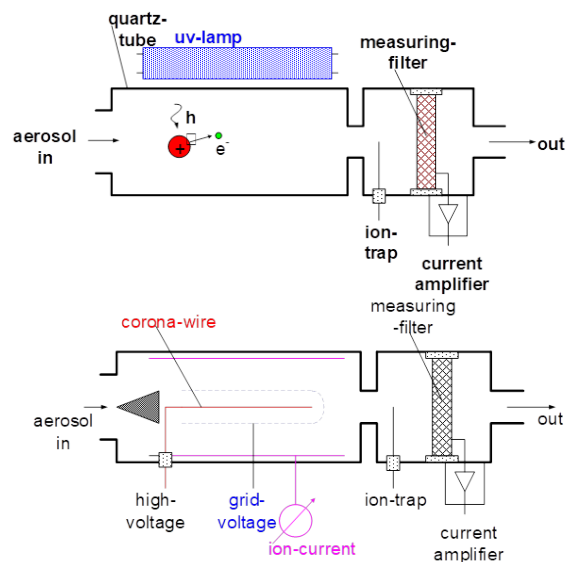
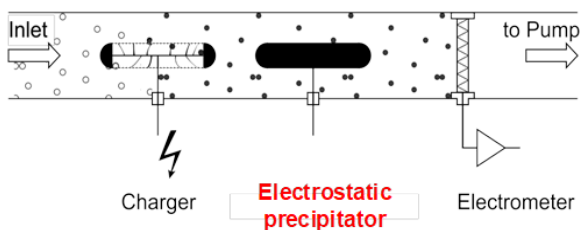


Abb. 6: Partikelaufladung durch Photoemission (oben) und Ionenanlagerung (unten). In beiden Fällen werden die Partikel nach der Aufladung in einem Messfilter abgeschieden und als elektrischer Strom gemessen.

Die Diffusionsaufladung ist im Wesentlichen materialunabhängig und hängt nur von der Partikelgröße und bis zu einem gewissen Grad von der Morphologie ab, bei der Photoemission besteht eine Materialabhängigkeit über die Austrittsarbeit. Bei typischen Umweltaerosolen sind es vor allem Produkte aus unvollständiger Verbrennung, die effizient aufgeladen und so selektiv erfasst werden können [5].

Sind die Partikel einmal aufgeladen, können sie im elektrischen Feld manipuliert (z.B. kann über ihre Beweglichkeit die Größe bestimmt werden) und schlussendlich als elektrischer Strom gemessen werden. So können z.B. kleine Partikel in einem elektrostatischen Abscheider vor der Messung entfernt werden. Messungen bei verschiedenen Spannungen des Abscheiders liefern dann Information zur Größenverteilung. (Abb. 7)



**Abb. 7:** Größenbestimmung mittels elektrostatischem Partikelabscheider vor der Messung

Statt die Partikel zur Messung in einem Filter abzuscheiden, kann auch die Aufladung gepulst werden, die entstehenden „Ladungswolken“ können dann via Influenz gemessen werden. So ist keine Abscheidung (mit den damit verbundenen Ablagerungen im Gerät) erforderlich, was die Wartung vereinfacht [6]. Dieses Prinzip kommt im ‚real driving‘ System von AVL zum Einsatz. Alle Geräte von naneos beruhen darauf. Auch dabei kann durch geeignete Wahl der Spannung an einem Vorabscheider auf den gemessenen Strom in Funktion der Partikelgröße eingegriffen werden. So kann erreicht werden, dass das Messsignal die Partikelanzahl oder die Partikeloberfläche liefert, welche die beste Korrelation zur gesundheitlichen Wirkung der Partikel zeigt [7]. Zusätzlich kann auch Information zur Größe, z.B. in Form des mittleren Durchmessers gewonnen werden.

Sensoren auf der Basis der Diffusionsaufladung können sehr kompakt, einfach und robust sein. Abb. 8 zeigt ein Gerät zur direkten Abgasmessung. Um zu verhindern dass Abgaskomponenten (v.a. Wasser) im Gerät kondensieren wird der ganze Sensor beheizt. Solche Geräte können zum Beispiel für die periodische Abgasmessung, die in verschiedenen Ländern wieder eingeführt wird, eingesetzt werden. Dies ist erforderlich, weil die Flottenemissionen von einem kleinen Teil von Fahrzeugen mit defekten

oder manipulierten Filtern dominiert werden können und die heute vorhandene on-board Diagnostik nicht in der Lage ist dies zu detektieren [8].



**Abb. 8:** DC-basierter Partikelsensor zur Abgasmessung

## Diskussion

Sowohl optische als auch elektrische Verfahren eignen sich gut zum Bau von kompakten, robusten Geräten, die in der Feldmesstechnik eingesetzt werden können. Dabei kommt die Streulichtmessung vor allem zur Messung von größeren Partikeln (>500nm) zum Einsatz, bei denen die Massenkonzentration eine relevante Rolle spielt. Bei den ultrafeinen Partikeln (Durchmesser einzelne nm bis einige hundert nm) sind Metriken wie Anzahl oder Oberfläche wesentlicher als die Masse. Hierfür eignen sich die elektrischen Verfahren. Der steile Abfall der Streuintensität mit kleiner werdendem Durchmesser führt bei kleinen Partikeln zu Problemen mit der Nachweisgrenze. Umgekehrt haben die elektrischen Verfahren Probleme mit größeren Partikeln, weil sich auf diesen eine breite Ladungsverteilung einstellt, was die Auswertung stark erschwert.

Die vorgestellten Verfahren stellen eine kleine Auswahl dar. Der Schwerpunkt liegt bei solchen Verfahren, die sich zum Bau von sehr kleinen Geräten eignen. Ganz ausgelassen wurden die sehr verbreiteten Kondensationskernzähler, von denen es auch hand-held Versionen gibt, die aber zumindest bis heute preislich und bezüglich Robustheit anspruchsvoller sind.

## Literatur

- [1] RUNDELL, K.W. ; CAVISTON, R.M. ; HOLLENBACH, A.M. ; MURPHY, K.: Vehicular air pollution, playgrounds, and youth athletic fields. In: *Inhal. Toxicol.* 18 (2006), S. 541-547
- [2] JURANYI, Z. ; BURTSCHER, H. ; LÖPFE, M. ; NENKOV, M. ; WEINGARTNER, E. : Dual-wavelength light scattering for selective detection of volcanic ash particles in the presence of water droplets. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 8 (2015), S. 5213-5222
- [3] KELLER, A.; RÜEGG, M.; FORSTER, M.; LOEPFE, M.; PLEISCH, R.; NEBIKER, P.; BURTSCHER, H.:

- Open photoacoustic sensor as smoke-detector. In: *Sensors and Actuators B* 104 (2005), S. 1-7
- [4] MOCNIK, G.; VISSER, B.; STEIGMEIER, P.; WEINGARTNER, E.; DRINOVEC, L.: Interferometric Measurements of the Aerosol Optical Absorption Coefficient -- a New Instrument and its Characteristics. In: *European Aerosol Conference EAC 2019*, 25-30 Aug., Gothenburg, Sweden
- [5] SIEGMANN, K.; SIEGMANN, H.: Fast and Reliable "in situ" Evaluation of Particles and their Surfaces with Special Reference to Diesel Exhaust. In: *SAE Technical Paper* (2000) 2000-01-1995
- [6] FIERZ, M.; MEIER, D.; STEIGMEIER, P.; BURTSCHER, H.: Aerosol Measurements by induced currents. In: *Aerosol Science and Technology* 48 (2014) S. 350-357
- [7] SCHMID, O.; STOEGER, T.: Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung. In: *J. Aerosol Science* 99 (2016) S. 133–143
- [8] BURTSCHER, H.; LUTZ, TH.; MAYER, A.: A New Periodic Technical Inspection for Particle Emissions of Vehicles. In: *Emiss. Control Sci. Technol.* 5 (2019) S. 279-287