

Kontinuierliche Feinstaubpartikelklassierung – von Emissionsüberwachung zu Prozessanwendungen

Dr. rer. nat. Alexander Schladitz

SICK Engineering GmbH, Bergener Ring 27, 01458 Ottendorf-Okrilla

Zusammenfassung

Der Vortrag beschreibt ein sich in der Entwicklung befindliches Messgerät (Funktionsmuster) zur kontinuierlichen Feinstaubpartikelklassierung. Es überwindet die in der behördlichen Emissionsmessung notwendige Kalibrierung gegenüber einem Standardreferenzverfahren durch die direkte Ausgabe der Staubmassenkonzentration und darüber hinaus ihrer Feinstaubanteile $PM_{2.5}$ und PM_{10} . Das beschriebene Verfahren verhält sich unabhängig von Staubart und Größe der Partikel und kann im Bereich der Prozessüberwachung als auch in einer verkleinerten Version im Bereich der Arbeitsschutzüberwachung, z.B. in Montagehallen, Anwendung finden.

Keywords: Feinstaub, Prozessüberwachung, PM_{10} , Emission, optische Messverfahren

Problemstellung Emission

Durch den Einsatz hocheffizienter Filtertechniken, z.B. Elektrofilter bei Braunkohlekraftwerken und Gewebefilter bei Müllverbrennungsanlagen sinkt die Gesamtstaubmassenkonzentration industrieller Anlagen immer weiter. Gleichzeitig bestehen die internationalen, europäischen und nationalen Interessensgemeinschaften auf die Durchsetzung strengerer Emissionsgrenzwerte. So betrug 2007 der Emissionsgrenzwert für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe nach 13. BImSchV. noch 20 mg/m^3 , während er mittlerweile auf 10 mg/m^3 abgesenkt wurde. Bei den Abfallverbrennungsanlagen nach 17. BImSchV. wurde der Grenzwert im gleichen Zeitraum ebenfalls um die Hälfte auf mittlerweile 5 mg/m^3 abgesenkt. Es ist daher absehbar, dass die von den Anlagenbetreibern einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte weiter sinken. Hinzu kommt sinkende Margen aufgrund der Energiewende und damit steigender Kostendruck auf die Anlagenbetreiber. Staubmessgeräte für Emissionsanwendungen sind nach dem heutigen Stand der Technik noch nicht in der Lage ein Staubmassenkonzentrationswert direkt zu messen. Stattdessen wird die Lichtschwächung im Kamin (Transmissometer, Opazimeter) durch Vergleich der Intensität des gesendeten und empfangenen Lichtstrahls bestimmt (siehe Abb. 1).

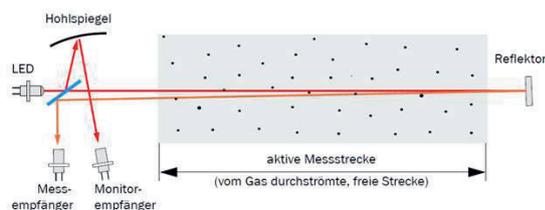


Abb. 1: Prinzipskizze des Transmissionsverfahrens

Alternativ wird die Streuung von Laserlicht an Partikeln mit einem Detektor in Vorwärts- oder

Rückwärtsrichtung erfasst (siehe Abb. 2).

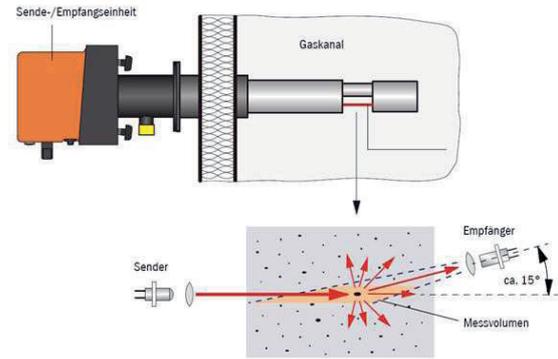


Abb. 2: Prinzipskizze des Streulichtverfahrens

Beide Verfahren geben nur ein relatives Signal (meist in mA) aus, die der Menge des Staubgehaltes im Kamin entspricht. In der Praxis ist es daher notwendig diese sogenannten automatischen Messeinrichtungen (AMS) gegenüber dem gravimetrischen Standardreferenzverfahren (SRM) nach [1] zu kalibrieren (siehe Abb. 3). Aufgrund der Staubkonzentrationen hinter der Abgasreinigungsanlage in der Nähe von Null ein schwieriges und langwieriges und damit teures Unterfangen für den Anlagenbetreiber. Dabei werden enorme Anstrengungen unternommen, z.B. durch das Eindüsen von zusätzlichem Staub oder durch Verringerung der Effizienz der Abgasreinigungsanlage, die Staubkonzentration künstlich zu erhöhen, um so den SRM-Messwert über die Bestimmungsgrenze zu bringen. Alternativ erlaubt der Gesetzgeber die Erhöhung der Probenahmedauer des SRM zur besseren Quantifizierung sehr geringer Staubmassenkonzentrationen oder die Verwendung sogenannter Ersatzstoffe deren Partikelgrößenverteilung ähnlich dem des Abgases entspricht. Dies sind unserer Ansicht nach Übergangslösungen für einen neuen Technologieschritt, da sie nicht Lösungen für das eigentliche Problem liefern sondern im Gegenteil die Kosten für die Anlagenbetreiber für die Erstkalibrierung oder jährliche Funktionsüberprüfung nach [2] unnötig in die Höhe treiben.

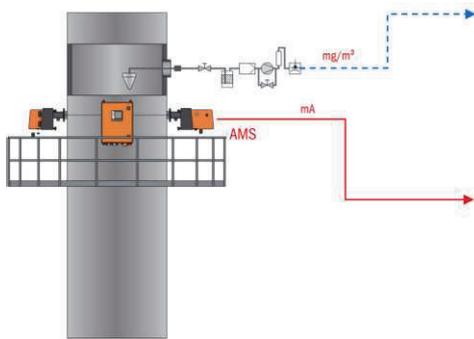


Abb. 3: Kalibrierung des AMS gegenüber dem SRM am Abgaskamin einer Anlage.

Studien von [3] zeigen das beim Großteil der untersuchten Anlagen, darunter zählen Kraftwerke auf Basis von Kohle, Öl und Holz, Zementindustrie, Schmelzen, Glasproduktion, Chemiebetriebe und Anlagen zur Abfallverbrennung, der Anteil von PM_{10} am Gesamtstaub 90% oder höher liegt (siehe Abb 4). Für $PM_{2.5}$ (siehe Abb. 5) liegt der Anteil am Gesamtstaub bei 50 – 90%. Der entscheidende Unterschied am Anteil zwischen den Anlagen wird durch den Prozess selbst bestimmt, d.h. wurde etwas thermisch verbrannt, so sind die Partikel kleiner oder wenn es sich um einen mechanischen Prozess oder eine Mischung aus beidem handelt, ruft dies größere Partikel hervor. Eine zweite Studie von [4] durchgeführt an einem finnischen Kohlekraftwerk mit Rauchgasentschwefelung und Taschenfilter weist einen PM_1 Anteil von 62% auf, wobei das Maximum der Volumengößenverteilung bei $0.68 \mu m$ liegt. Dabei wurde eine PM_{10} Massenkonzentration im Mittel von gerade einmal $0.12 mg/Nm^3$ gemessen.

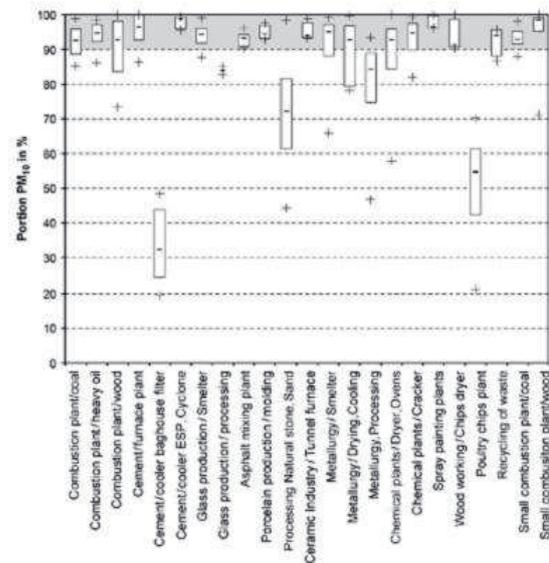


Abb. 4: Anteil von PM_{10} am Gesamtstaub für untersuchte Anlagen (entnommen aus [3]).

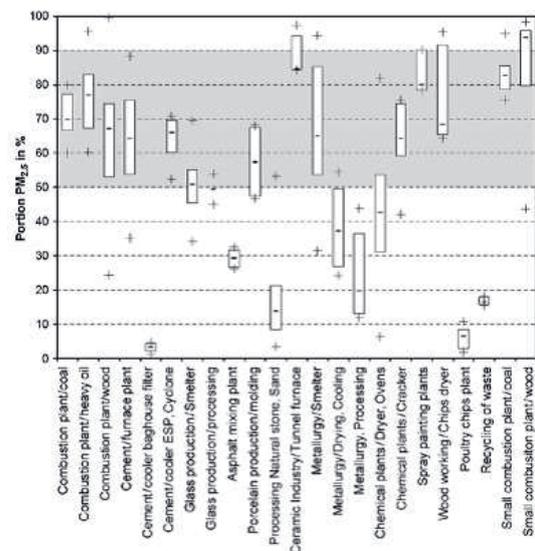


Abb. 5: Anteil von $PM_{2.5}$ am Gesamtstaub für untersuchte Anlagen (entnommen aus [3]).

Dies verdeutlicht wie wichtig es ist, neben der Gesamtstaubemission, zusätzlich die Fraktionen PM_{10} , $PM_{2.5}$ oder gar PM_1 zu bestimmen.

Darüber hinaus gibt es Anfragen von Kunden und Anlagenbetreibern neben der Gesamtstaubmassenkonzentration ebenfalls kontinuierlich die Partikelgrößenverteilung, z.B. in den Fraktionen PM_{10} , $PM_{2.5}$ und PM_1 messen zu wollen, um die Produktions- und Verbrennungsprozesse bzw. die Abgasreinigung weiter zu optimieren. Dies trägt auch zu einer Reduzierung der

Immissionsbelastung in den umliegenden Gebieten dieser Anlagen bei. Zur Ermittlung der PM_{10} - und $PM_{2.5}$ -Fraktionen in den Emissionen stationärer Quellen nach [5] oder im Rahmen der Ursachenermittlung für Immissionen von PM_{10} und $PM_{2.5}$ ist es notwendig, Feinstäube auch in den Abgasen industrieller Anlagen zu messen. Letztendlich leistet die kontinuierliche Überwachung der PM -Fraktionen einen wertvollen Beitrag für die Gesundheit des Menschen und damit einen individuellen Mehrwert. Es ist eine Frage der Zeit, wann sich auch in der Emissionsmessung Grenzwerte zu den genannten Fraktionen durchsetzen werden, sofern es eine Technologie gibt, die diese einfach und verlässlich bestimmen kann.

Problemstellung Prozessüberwachung und andere Anwendungen

Bei Veränderung der Brennstoffart, Filterbruch oder Fahrweise der Anlagen ändert sich meist die Partikelgrößenverteilung mit. Aufgrund der oben beschriebenen Kalibrierung ist jedoch das automatische Messsystem mit der Kalibrierkurve an eine bestimmte Brennstoffart, Fahrweise der Anlage und somit Partikelgrößenverteilung gekoppelt. Das Problem ist exemplarisch in Abb. 6 dargestellt.

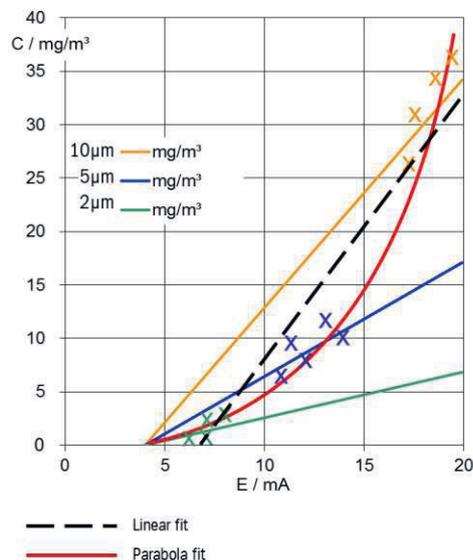


Abb. 6: Verschiedene Kalibriergeraden zwischen gravimetrischen Verfahren (y-Achse) und automatischen Messsystem (x-Achse) je nach Abhängigkeit der Partikelgröße ($2\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$).

Ändert sich bei einem Filterbruch die mittlere Partikelgröße von $2\ \mu\text{m}$ auf $10\ \mu\text{m}$ und die Kalibriergerade wurde bei $2\ \mu\text{m}$ mittlerer Partikelgröße bestimmt, kommt es zu einer

Unterschätzung der wahren Staubmasse, da das automatische Messsystem diesen Zuwachs in der Partikelgröße nicht erfassen kann.

Weiterhin existieren verbindliche Grenzwerte für Staub im Bereich Arbeitsschutz oder in der Halbleiterindustrie die überwacht werden müssen. Durch ebenfalls herabgesetzte Grenzwerte, z.B. im Bereich des Arbeitsschutzes von $3\ \text{mg/m}^3$ auf $1.25\ \text{mg/m}^3$ für aveolengängigen Staub (A-Staub) [6] oder der Ausweitung von zu messenden Partikelklassen in der Halbleiterindustrie [7], ergeben sich neue Anforderungen an die Messverfahren. Beispielsweise ist die Bestimmungsgrenze für optische Größenspektrometer aufgrund der Verwendung von Laserdioden im sichtbaren Bereich bei $\sim 0.2\ \mu\text{m}$ Partikelgröße begrenzt. Im Bereich des Arbeitsschutzes werden z.T. heute noch tragbare diskontinuierliche Messgeräte eingesetzt, die auf der Trägheitsabscheidung von Partikeln auf Sammelplatten und anschließender Wägung basieren. Eine Messmethode die zum einen kontinuierlich arbeitet und zum anderen auch Partikelgrößen bis $< 0.1\ \mu\text{m}$ analysiert würde in diesem Bereich ein Fortschritt erzielen.

Lösungsvorschlag und wissenschaftlich-technischer Fortschritt

Die Fa. SICK verfügt mit dem PSD-Prototyp bereits über einen kontinuierlich messenden Feinstaubpartikelanalysator, der o.g. messtechnische Anforderungen erfüllt. Es handelt sich hierbei um ein extraktives System mit genauer Absaug-Volumenstrommessung. Dies ist insbesondere im Bereich der Emissionsmessung notwendig, da hier eine isokinetische Probenahme entsprechend der geltenden Richtlinien gefordert wird. Nach erfolgter Probenahme wird das Messgas mit den enthaltenen Partikeln in eine optische Messkammer hindurchgeführt bei der eine optische Detektion der Partikel erfolgt (siehe Abb. 7).

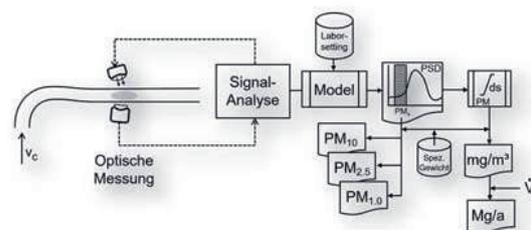


Abb. 7: Systembeschreibung eines kontinuierlich messenden Feinstaubpartikelanalysators

In der Messkammer wird die winkel- und wellenlängenabhängige Partikelstreuung mittels geringer Anzahl von Detektoren gemessen. Eine Signalanalyse wird im Industrie-PC des Prototypen durchgeführt und transformiert die gemessenen Detektorwerte mittels Laborsetting in ein physikalisches Messsignal. Ein exaktes mathematisches Modell berechnet daraus periodisch das Teilchenvolumen über der Partikelgröße (sogenannte PSD-Kurve). Aus der PSD-Kurve werden durch partielle Integration im Bereich von 0.1 bis 30 μm Partikeldurchmesser unter Annahme einer Partikeldichte (spezifisches Partikelgewicht) beliebige Partikelmassenkonzentrationen berechnet. Ein Fortschritt der PSD-Technologie gegenüber derzeit auf dem Markt befindliche Technik ist, dass es ohne initiale Kalibrierung an der Anlage auskommt. Das hat zum Vorteil, dass die vom Feinstaubpartikelanalysator generierten Messergebnisse unabhängig von der verwendeten Staubart sind. Die auf dem Markt befindlichen optischen Messgeräte, z.B. [8], werden hingegen meist mit einer Staubart kalibriert. Im praktischen Einsatz liegen aber meist andere Staubarten als bei der Kalibrierung vor, mit der Konsequenz dass dies einen Einfluss auf die Genauigkeit der gewonnenen Messwerte hat.

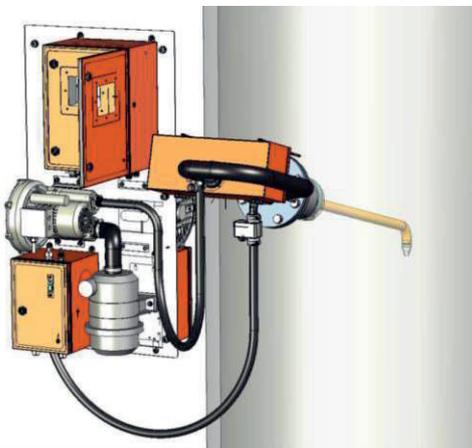


Abb. 8: Prototyp des kontinuierlich messenden Feinstaubpartikelanalysators für Emissionsanwendungen.

Abbildung 8 zeigt das Funktionsmuster eines kontinuierlich messenden Feinstaubpartikelanalysators für Emissionsanwendungen mit seinen Komponenten. Dabei handelt es sich um ein Probenahmerohr mit der das Messgas mit einem nachgeschalteten Ejektor aus dem Kamin gefördert wird. Um den nötigen Unterdruck am Ejektor zu erzeugen, existiert eine Gebläsetafel, die gefilterte Luft ansaugt

und dem Ejektor zu Verfügung stellt. Die angesaugte Luft wird gemeinsam mit der Abgasluft mithilfe eines Rückführschlauches in den Kamin zurückgeleitet. Eine zweite Gebläsetafel an der Rückseite stellt zweifach gefilterte und beheizte Spülluft zur Verfügung und sorgt für die Vermeidung der Kontamination der optischen Flächen mit Staub und der Vermeidung von Kondensation des heißen Prozessgases ($> 160^{\circ}\text{C}$) in der Ansaugstrecke bis zur Sensoreinheit. In der Kontroll- und Auswerteeinheit erfolgt hauptsächlich die Steuerung der Gerätekomponenten und die Auswertung der Detektorsignale zu einer Größenverteilung auf einem Industrie-PC.

Im September 2018 fand eine Vergleichsmessung des Funktionsmusters an der Emissionssimulationsanlage der HLNUG in Kassel statt mit der folgenden Zielsetzung:

- quantitativer Vergleich für die Messgröße Gesamtstaub, PM_{10} sowie $\text{PM}_{2.5}$ gegenüber dem gravimetrischen Standardreferenzverfahren
- Untersuchung des Einflusses verschiedener Partikelgrößen auf das Messergebnis
- Verifikation der Messmethode im typischen Konzentrationsbereich von Anlagen zwischen 0.5 und 10 mg/m^3

Für die Untersuchung des Einflusses verschiedener Partikelgrößen auf das Messergebnis wurden zwei verschiedene Stäube aus dem Material Calciumcarbonat mit einer mittleren Partikelgröße von 3 μm (eskal300, siehe auch Abb. 11) und 5 μm (eskal500) ausgewählt.

Abbildung 9 zeigt die Gegenüberstellung für Gesamtstaub (TSP). Die Linearität im Bereich von 1 bis 8 mg/m^3 wurde erbracht, ebenso die Unabhängigkeit von der Partikelgröße. Das Funktionsmuster zeigt jedoch einen Minderbefund von 39%, der vermutlich auf Partikelablagerungen zurückzuführen ist. Dieser Faktor muss beim späteren Seriengerät mit berücksichtigt werden.

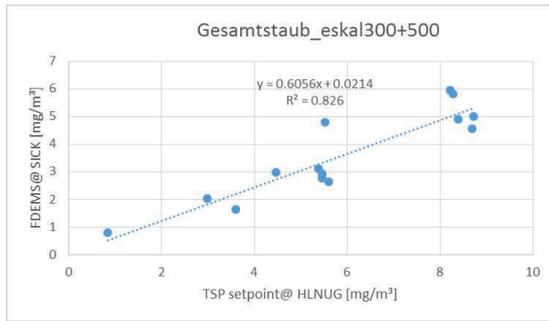


Abb. 9: Gegenüberstellung aller Messwerte des kontinuierlichen Feinstaubmessgerätes und des gravimetrischen Referenzverfahrens für die Messgröße Gesamtstaub.

Analog wird in Abbildung 10 die Linearität der Messgröße PM_{10} gegenüber dem Standardreferenzverfahren [9] gezeigt, ebenfalls mit einem leichten Minderbefund von 26%.

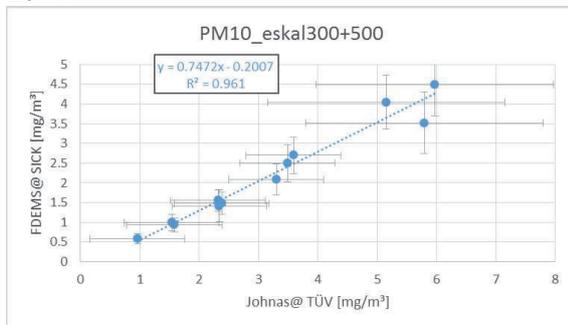


Abb. 10: Gegenüberstellung aller Messwerte des kontinuierlichen Feinstaubmessgerätes und des gravimetrischen Referenzverfahrens für die Messgröße PM_{10} .

Abschließend wird in Abbildung 11 eine Gegenüberstellung der gemessenen Größenverteilung mit dem Datenblatt für den verwendeten Staub eskal300 [10] gezeigt.

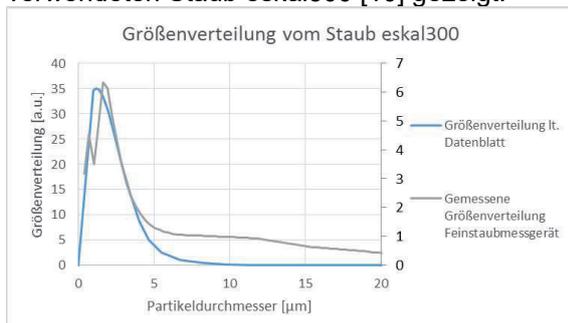


Abb. 11: Vergleich der Größenverteilungen für die Staubart eskal300.

Literaturnachweis

- [1] EN13284-2:2015: Emissionen aus stationären Quellen–Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen–Teil 2: Automatische Messeinrichtungen.
- [2] EN14181:2014: Emissionen aus stationären Quellen–Qualitätssicherung für automatische Messeinrichtungen
- [3] Ehrlich, C., Noll, G., Kalkoff, W.-D., Baumbach, G., and Dreiseidler, A., „PM10, PM2.5 and PM1.0-Emissions from industrial plants-Results from measurement programmes in Germany.“, Atmos. Environ. 41(29), 6236-6254 (2007)
- [4] Saarnio, K., Frey, A., Niemi, J. V., Timonen, H., Rönkkö, T., Karjalainen, P., Vestenius, M., Teinilä, K., Pirjola, L., Niemelä, V., et al., “Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization.” J. Aerosol Sci. 73, 14-26 (2014)
- [5] EN ISO 23210:2009: Emissionen aus stationären Quellen–Ermittlung der Massenkonzentration von $PM_{10}/PM_{2.5}$ im Abgas–Messung bei niedrigen Konzentrationen mit Impaktoren
- [6] Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 900) – Arbeitsplatzgrenzwerte, Fassung vom 14.05.2018.
- [7] Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche – Teil 12: Klassifizierung der Luftreinheit anhand der Nanopartikelkonzentration (ISO/DIS 14644-12:2013); Deutsche Fassung prEN ISO 14644-12:2013
- [8] Europäische Patentschrift EP 0 391 256 B1: Vorrichtung und Verfahren zum Bestimmen der Korngrößenverteilung und der Gesamtkonzentration von Partikeln in einem Gas, insbesondere in Luft vom 05.01.1994.
- [9] Verein Deutscher Ingenieure (VDI 2066-Blatt 10): Messung der Emissionen von PM_{10} und $PM_{2.5}$ an geführten Quellen nach dem Impaktionsverfahren vom Oktober 2004.
- [10] eskal300: KSL Staubtechnik GmbH, Westendstraße 11, 89415 Lauingen.