

Entwicklungen der Feinstaubmessung im Bereich der 13. und 17. BImSchV

Detlef Rengshausen und Alexander Hoppert

1.	Einleitung.....	751
1.1.	Zusammenarbeit Technische Universität Clausthal und ITEM Hannover	752
1.2.	Neuartiges Messsystem	753
2.	Messverfahren	753
2.1.	Gasweg.....	754
2.2.	Aerosol-Streulichtsensoren.....	754
2.3.	Aerosol-Photoemissionssensor	755
2.4.	Darstellung Staubmesskoffer/VDI2066.....	756
2.5.	Darstellung Staubmesskoffer/SMPS	758
3.	Anforderungen der 13. und 17. BImSchV	759
4.	Zusammenfassung	759
5.	Literatur.....	760

1. Einleitung

Die Vereta GmbH wurde im Jahre 2002 gegründet. Das Wissen, die Patente und die praktische Erfahrung auf dem Gebiet der thermischen Sensorik bilden die Grundlage des Unternehmens. Seit mehr als 10 Jahren erschließen die Gründer neue Anwendungsbereiche für Thermoelemente, die sonst eher in Hochtemperaturbereichen zu finden sind. Die entwickelten Verfahren zur Optimierung von Thermoelementensignalen ermöglichen den Einsatz als Industriesensoren zur Füllstands-, Leckage- und Durchflussüberwachung. Die neueste Familie der Klimasensoren nutzt die Eigenschaften der Thermoelemente zur Messung von Luftströmen, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung.

Ein besonderer Innovationssprung gelang mit der Erfindung des ersten Sensors zur Messung der *gefühlten Temperatur* oder (lt. US-Patent) *effective temperature*. Das Ausgangssignal kann von jeder Steuerung zur effizienteren Regelung von temperatur- und klimaabhängigen Prozessen verarbeitet werden. Diese Sensorik zur bedarfsgerechten und energieeffizienten Regelung von temperatur- und klimaabhängigen Prozessen ist beim internationalen Technologiepreis, dem Hermes Award 2004, unter die TOP 5 gekommen!

Seit März 2007 gibt es die Ofenregelung. Sie führt alle Einflussfaktoren, die bei der Verbrennung von Scheithölzern in Kamin- und Kachelöfen von Bedeutung sind zusammen. Es ist erstmals überhaupt eine komplexe, systemoffene, effiziente Regeleinheit für viele zusätzliche Entwicklungsaufgaben verfügbar.

Anders als bei allen den Stand der Technik kennzeichnenden Ofenregelungen handelt es sich hier um ein offenes System. Die Regeleinheit ist unabhängig von spezifischen Ofentypen. Die Messsonde im Abgasrohr erfasst Daten zum Massestrom, zur Strömungsrichtung und Temperatur. Die Sensorik arbeitet mit intelligent erzeugten und ausgewerteten Temperaturdifferenzen. Sie kalibriert sich selbst, unabhängig von den hausspezifischen und klimatischen Randbedingungen.

Nach mehr als drei Jahren intensiver Entwicklung erlangte man ein besonderes Wissen für die Optimierung von Feuerungsprozessen in Holzbetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen. Wie etwa Software, die alle Luftströme in Zu- und Abluftkanälen eines Ofens auswertet und mit den gesamten sonstigen Luftströmen im Haus abgleicht.

Die Erfahrung aus zahlreichen Versuchen bildet die Grundlage der Elektronikentwicklung für solche instationären, vom nutzerverhalten abhängigen Regelvorgänge. Die patentierte Sensorik, das gesamte Elektronikkonzept und die Programmierung der Ofenregelung gehören zu den Kernkompetenzen von Vereta.

Im Jahr 2008 entschloss man sich an einem Kooperationsprojekt zur Entwicklung einer Mess- und Prüfeinrichtung für Feinstaubemissionen in Feststofföfen teilzunehmen. Diese Mess- und Prüfeinrichtung wurde mittlerweile einer Prüfung des TÜV Süd unterzogen und im Jahr 2012 vom Umweltbundesamt als Messgerät für Messungen nach 1. BImSchV zugelassen. Das zugrunde liegende Messverfahren wurde patentiert und trägt die Patentnummer DE 202009015777U1.

1.1. Zusammenarbeit TUC und ITEM Hannover

Die Entwicklung einer Mess- und Prüftechnik für Feinstaubemissionen in Feststofföfen begann als Kooperationsprojekt zwischen der Vereta GmbH, der Technischen Universität in Clausthal und dem Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizintechnik in Hannover.

Ziel der Entwicklung war ein Messverfahren zur Bestimmung des Feinstaubgehaltes im Abgas von Kleinf Feuerungsanlagen mit folgenden Eigenschaften:

- Verlässliche Korrelation zu Feinstaubemission: Kompatibilität mit Grenzwerten.
- Direkte Anzeige vor Ort: Nutzung zu Überwachungs-, Wartungs-, und Einstellungsarbeiten.
- Niedrige Kosten: Wirtschaftlicher Einsatz im Heizungsbau- und Schornsteinfegerhandwerk, geringe Kosten für den Verbraucher.
- Robuste, betriebssichere Funktionsweise und einfache Bedienung: Akzeptanz bei Anwendern.
- Potential als Sensor für kontinuierliche Anlagenüberwachung und -steuerung: Industrieller Einsatz.

Das Fraunhofer Institut steuerte zwei unterschiedlich polarisierte Aerosolstreulicht-photometrie-Sensoren bei und war mit der Gaskonditionierung beauftragt, während die Technische Universität in Clausthal einen dritten Sensor entwickelte der auf Effekte der Aerosolphotoemission zurückgreift und die Messstände bereitstellte und betrieb. Die Kombination dieser drei Sensoren ermöglicht es die Aerosolemission, welche im Wesentlichen aus Produkten der unvollständigen Verbrennung und nicht brennbaren Ascheanteilen besteht, in Bezug auf Staubmassenkonzentration und -größenverteilung zu erfassen.

1.2. Neuartiges Messsystem

Als dritter Kooperationspartner lag es an der Vereta GmbH die drei Sensoren in ein, den Anforderungen entsprechendes Gehäuse zu setzen und ein Steuerungs- und Regelkonzept zu entwerfen.

Ausgangspunkt war die Einhaltung der Anforderungen nach VDI 4206 Blatt 2 und der Bedürfnisse des Handwerks. Es entstand ein Messsystem welches eine robuste und betriebssichere Funktionsweise aufweist und sich durch einfachste Bedienung und geringste Wartung von anderen Messsystemen abgrenzt.

Bild 1 zeigt den fertigen Staubmesskoffer, wie er vom Handwerk eingesetzt wird. Das Messgerät ist in unter zwei Minuten einsatzbereit und nach der Messung in wenigen Sekunden zusammengepackt. Möglich macht dies das patentierte, neuartige Messverfahren.



Bild 1:

Staubmesskoffer

2. Messverfahren

Das innovative Messverfahren wurde in enger Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und Universitäten entwickelt. Die Herausforderung bestand vor allem darin, sowohl größere Partikel ($>1\mu\text{m}$), als auch solche im Nanometerbereich nachzuweisen. Dies geschieht durch die Kombination der verschiedenen Sensoriken.

Zwei unterschiedlich polarisierte, optische Photometer-Sensoren messen die Partikel über reflektierendes Licht und detektieren Feinstäube bis $1\ \mu\text{m}$. Das Aerosol-Elektrometer erfasst Feinstäube ab einer Größe von $20\ \text{nm}$. Damit werden sämtliche Partikel vollständig erfasst. Durch die hohe Messempfindlichkeit funktioniert die Abgasentnahme nach dem Verdünnungs-Prinzip: Die Messlanze saugt Abgas ein. Dabei wird bereits im Feinfilter und Silikatfilter gereinigtes, getrocknetes Abgas dazu gemischt. Durch diese Verdünnung hat der Taupunkt keinen Einfluss auf die Messung.

Die verschiedenen Signale werden dann in einem speziell für dieses Messprinzip entwickelten Algorithmus in den tatsächlichen Feinstaubgehalt pro Kubikmeter umgerechnet.

2.1. Gasweg

Der Gasweg ist prinzipiell in Bild 2 dargestellt.

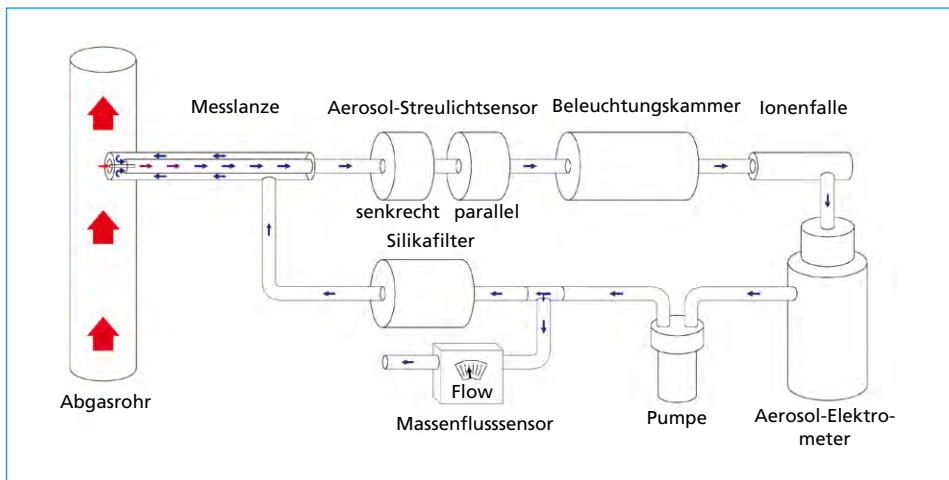


Bild 2: Gasweg

2.2. Aerosol-Streulichtsensoren

Das Messsignal der Aerosol-Streulichtsensoren (Bild 3) ist abhängig von der Massenkonzentration und von der Partikelgröße. Um ein möglichst genaues Abbild der Staubbelastung im Abgas zu bekommen, ist es daher notwendig ein zweites, versetzt polarisiertes Aerosol-Photometer mit in die Messung einzubeziehen.



Bild 3: Aerosol-Streulichtsensor

Für jede Polarisationssebene gibt es einen Partikelgrößenbereich mit maximaler massebezogener Streulichtausbeute. Dieser Bereich liegt mit $0,3\ \mu\text{m}$ bis $2\ \mu\text{m}$ genau in dem für Abgaspartikel relevanten Größenbereich. So lässt sich nicht nur die im Abgas vorhandene Staubmasse bestimmen, sondern darüber hinaus über das Verhältnis der beiden Aerosol-Photometer auch die Partikelgröße.

Das Aerosolstreulichtphotometer nutzt die Tatsache, dass Partikel das Licht einer Laserdiode innerhalb eines optisch begrenzten Messvolumens streuen. Unter einem Winkel von 90° wird das gestreute Licht von einem Photodetektor erfasst und verstärkt. Das Signal steht als analoge Spannung von 0 bis 5 Volt am Ausgang zur Verfügung. Das Messsignal ist unabhängig von Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung. Der gerade ausgeführte Messkanal ist gegenüber der Messzelle abgedichtet und verfügt über keine Einbauten, die das Aerosol beeinträchtigen können. Somit steht dem nachgeschalteten Photoemissionssensor das Aerosol ohne Minderung zur Verfügung.

Die Aerosolstreulichtphotometer weisen folgende Daten auf:

- Leistungsstabilisierte Laserdiode 20 mW,
- Wellenlänge 680 nm,
- Streuwinkel 90° ,
- Messvolumen etwa $10\ \text{mm}^3$,
- Trägerfrequenz etwa 330 Hz,
- Empfindlichkeit etwa $5\ \text{mV}/\text{mg}/\text{m}^3$ (im Empfindlichkeitsmaximum),
- Rauschen $< 5\ \text{mV}$ (bei einer Mittelungszeit von einer Minute),
- Messbereich etwa 1 bis $1.000\ \text{mg}/\text{m}^3$.

2.3. Aerosol-Photoemissionssensor

Der Aerosol-Photoemissionssensor reagiert auf die an Russpartikeln angelagerten polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), da diese besonders aktive Photoemitter sind.

Das mit Partikeln beladene Abgas wird von einer UV-Lampe bestrahlt und die anhaftenden PAKs positiv geladen. Die dabei entstandenen Elektronen werden in einer Ionenfalle abgeschieden. Die verbliebenen positiv geladenen Partikeln werden in einem Messfilter aufgefangen und deren Ladung an einen Verstärker weitergegeben. Der Ladungsverstärker setzt die positiven Ladungen in ein proportionales Messsignal um.

Der Aerosol-Photoemissionssensor ist in der Lage Partikel bis zu einem Größenbereich von etwa 20 nm zu detektieren.

Das Aerosolelektrometer (Bild 4) scheidet über einen hochisolierten Messfilter, welcher in einem Faraday-Käfig sitzt, alle Partikel samt ihrer Ladung ab. Der Strom

wird hochohmig verstärkt und in zwei Messbereiche aufgeteilt, wobei ein Messbereich das Messsignal mit zehnfacher Nachverstärkung aufbereitet. Damit wird der Messbereich mit hinreichender Empfindlichkeit abgedeckt. Die Ausgangssignale bei beiden Messstufen liegen bei $\pm 4,3$ Volt.



Bild 4:

Aerosol-Elektrometer

Der Messfilter besteht aus zwei Filterschichten. Die oberste Schicht ist ein Elektretfilter, der die aufgeladenen Partikel ohne großen Druckverlust effizient abscheidet. Die unterste Schicht besteht aus einem Glasfaserfilter, welcher einen höheren Druckverlust aufweist und somit einen hohen Gesamtabscheidegrad gewährleistet. Durch diese Kombination kann ein Filter deutlich länger für Messungen eingesetzt werden.

Die UV-Lampe in der Beleuchtungskammer emittiert im Wesentlichen kurzwellige UV-Linien bei 254 nm und 185 nm. Wirksam für die Photoionisation ist jedoch lediglich die 185 nm Linie. Die Intensität der Lampe beträgt etwa $42 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ im UVC-Bereich bei einem Abstand von 0,5 m.

2.4. Darstellung Staubbmesskoffer/VDI 2066

Um aus den drei unterschiedlichen Sensorsignalen eine Korrelation für den Staubmassegehalt in mg/m^3 zu errechnen, ist es nötig den Feinstaub Messkoffer mit einer gravimetrischen Methode gegenzumessen. Der Versuchsstand am Institut für mechanische und chemische Verfahrenstechnik der Technischen Universität in Clausthal ist ausgerüstet mit zurzeit fünf verschiedenen Festbrennstofföfen um ein möglichst breites Spektrum an Staubbelastungen und Brennstoffen abdecken zu können.

Weiter werden bei den Gegenmessungen zwei gravimetrische Messverfahren nach VDI 2066 parallel eingesetzt um mögliche Fehler gering zu halten. Die Messstellen lagen jeweils 50 cm vor und hinter der Messstelle der Staubbmesskoffer. Die Messdauer betrug jeweils 900 Sekunden.

Die berechneten Korrelationen von Staubbmesskoffer zu dem VDI 2066 Verfahren sind beispielhaft an verschiedenen Brennstoffen in folgenden Diagrammen dargestellt:

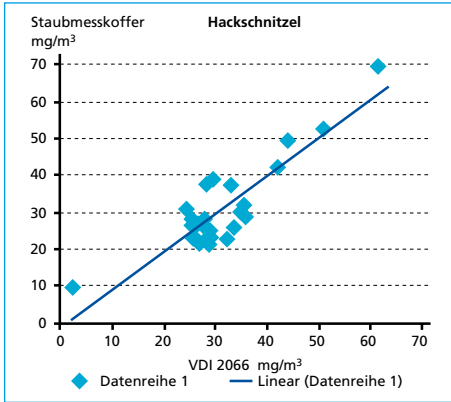


Bild 5: Hackschnitzel (hart, weich, feucht), Rindenmulch (trocken, feucht) in Fröling T4-30 Pellet-/Hackgutkessel

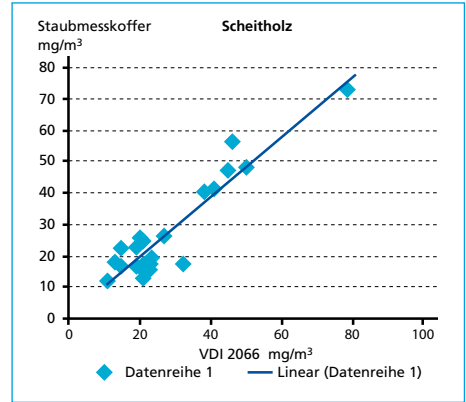


Bild 6: Scheitholz (hart, weich, feucht) in Hargassner 1/2m Vergaser und Buderus Blueline Scheitholzöfen

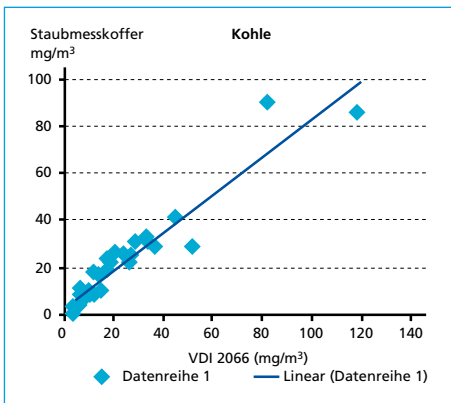


Bild 7: Braunkohle, Steinkohle in Thorma Kohleöfen

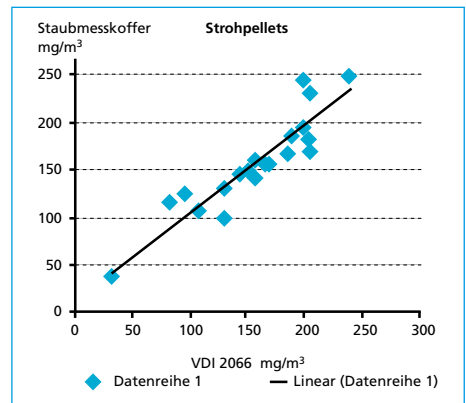


Bild 8: Strohpellets in Fröling T4-30 Pellet-/Hackgutkessel

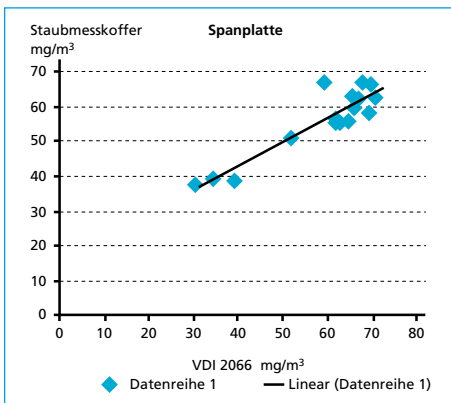


Bild 9: Spanplatte, Holzreste in Fröling T4-30 Pellet-/Hackgutkessel

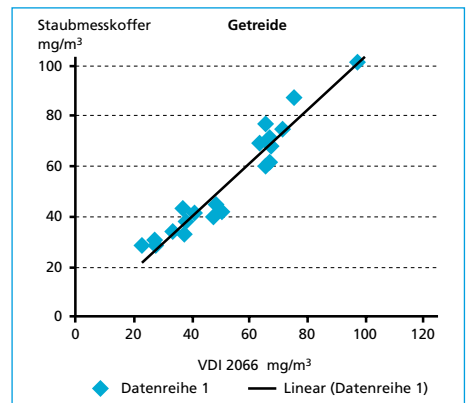


Bild 10: Weizen, Hafer in Fröling T4-30 Pellet-/Hackgutkessel

2.5. Darstellung Staubmesskoffer/SMPS

Im folgenden Diagramm (Bild 11) ist beispielhaft die Größenverteilung von Kohlenstoffpartikeln anhand des Verhältnisses der verschiedenen polarisierten Photostreulichtsensoren dargestellt. Die Gegenmessung erfolgte mit einem SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) der Fa. Grimm.

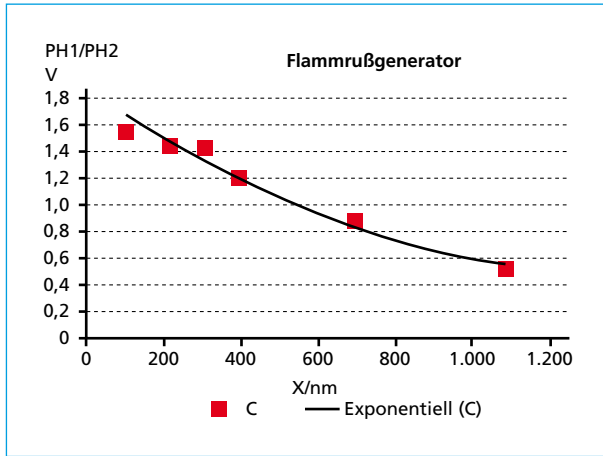


Bild 11:

Ermitteltes Verhältnis PH1 zu PH2

Bild 12 zeigt den berechneten Verlauf der Photometerempfindlichkeit als Funktion des Partikeldurchmessers für Licht, für beide Polarisations Ebenen (rote und blaue Kurve). Die dritte, schwarze Kurve zeigt das Verhältnis der beiden Empfindlichkeitskurven.

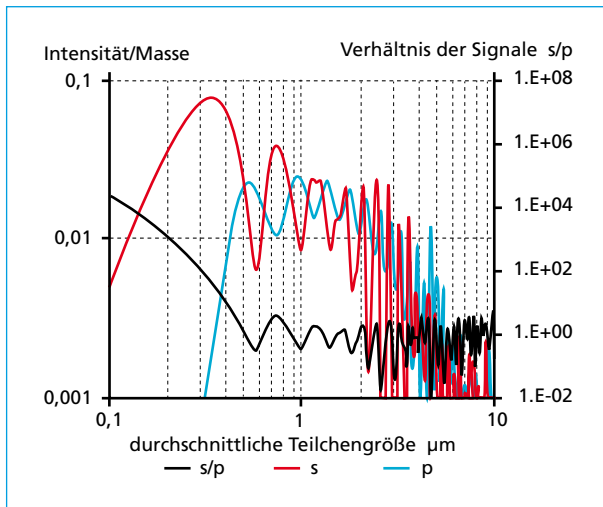


Bild 12:

Berechneter Verlauf der Photometerempfindlichkeit

Quelle: Koch, W.; Dunkhorst, W.; Löding, H.: Entwicklung einer Mess- und Prüftechnik für Feinstaubemissionen in Feststofföfen. Schlussbericht, 10.2009

Es gilt zu beachten, dass das Verhältnis abhängig von der Massenkonzentration ist und zur Auswertung noch das Signal des Aerosol-Photoemissionssensors hinzugezogen werden muss.

3. Anforderungen der 13. und 17. BImSchV

Die Anforderungen der 13. und 17. BImSchV an das Messgerät gegenüber der 1. BImSchV bestehen im Grunde aus der Überwachung anderer Brennstoffe und Grenzwerte, sowie der Überwachung über längere Zeiträume.

Der Feinstaub Messkoffer ist zur Einhaltung der Anforderungen der 1. BImSchV ausgelegt und verfügt somit über einen Messbereich von 0 bis 375 mg/m^3 . Eine Anpassung des Messbereiches ist ohne weiteres möglich, in dem man die Verdünnung ändert. Weniger Verdünnung führt zu einem besser aufgelösten unteren Messbereich, während eine Erhöhung der Verdünnung zu einem höheren Messbereich führt.

Auch die Erweiterung des Messgerätes auf andere Brennstoffe (fest, flüssig oder gasförmig) lässt sich realisieren. Hierzu müssen nur entsprechende Änderungen an dem Messstand vorgenommen werden, oder ein entsprechender Messstand zur Verfügung gestellt werden. Im Anschluss lassen sich dann eine Vielzahl von gravimetrischen Gegenmessungen nach VDI 2066 mit verschiedenen hohen Staubkonzentrationen aufnehmen, um den jeweiligen Brennstoff möglichst gut mit einer Korrelation abbilden zu können.

Der Dauerbetrieb oder Einzelmessungen mit bis zu acht Stunden Dauer lässt sich schon jetzt verwirklichen. Beim Dauerbetrieb ist es allerdings notwendig, in Intervallen von etwa 12 Stunden, die Filter zu tauschen und die Messdüse auf Verschmutzung zu überprüfen. Eine Einzelmessung von acht Stunden Dauer kann aber ohne weiteres, auch unbeaufsichtigt erfolgen, so lange das Abgas nicht zu feucht ist. In diesem Falle muss eine größere Silikatfilterkartusche in das Messgerät eingesetzt werden.

Durch den besonders einfach gehaltenen Aufbau der Messsonde stellen auch hohe oder stark schwankende Abgastemperaturen für das Messgerät kein Problem dar. Die Messsonde besteht fast ausschließlich aus Edelstahl und durch die bereits erwähnte, hohe Verdünnung wird abgezogenes Abgas schnell auf Raumtemperatur heruntergekühlt.

4. Zusammenfassung

Der Feinstaub Messkoffer ist eine gemeinsame Entwicklung der Vereta GmbH, der Technischen Universität in Clausthal und des Fraunhofer Institutes ITEM in Hannover. In diesem Kooperationsprojekt wurde ein Messverfahren zur Bestimmung des Feinstaubgehalts entwickelt, welches den Anforderungen der 1. BImSchV und der späteren Anwender voll entsprechen sollte.

Es entstand ein robustes, leicht zu handhabendes *Online* Messgerät, welches so gut wie keine Reinigung und Wartung benötigt.

Das innovative Messprinzip beruht auf dem Zusammenspiel verschiedener Sensoren, die die für eine Abgasanalyse relevanten Partikel in einer Größenordnung von 20 nm bis $2 \mu\text{m}$

vollständig erfassen. Die verschiedenen Signale werden dann in einem speziell für dieses Messprinzip entwickelten Algorithmus in den tatsächlichen Feinstaubgehalt pro Kubikmeter umgerechnet. Neben der direkten Anzeige der Staubmassenkonzentration in mg/m^3 ist auch die Darstellung der Partikelgrößenverteilung möglich.

Vom heutigen Stand der Technik stellt es kein Problem dar, mit dem Feinstaub Messkoffer die Anforderungen der 13. und 17. BImSchV zu erfüllen. Das Messgerät muss den speziellen Anforderungen der jeweiligen Verordnungen angepasst und diese auf Messständen verifiziert werden.

5. Literatur

- [1] Koch, W.; Dunkhorst, W.; Lödding, H.: Entwicklung einer Mess- und Prüftechnik für Feinstaubemissionen in Feststofföfen. Schlussbericht, 10.2009
- [2] Weber, A.; Qi, F.: Entwicklung einer Mess- und Prüftechnik für Feinstaubemissionen in Feststofföfen. Schlussbericht, 10.2009