

Direktgravimetrischer Partikelmasse-Sensor zur quasikontinuierlichen Emissionsmessung

Stephan Ester¹, Michael Struschka², Bernd Henning³

¹*Wöhler MGKG GmbH, Schützenstr. 41, 33181 Bad Wünnenberg, Deutschland*

²*Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart, Deutschland*

³*Elektrische Messtechnik, Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Deutschland*

Zusammenfassung

Es wird ein Partikelmasse-Sensor vorgestellt, der quasikontinuierlich eine direkte Messung der Partikelmasse in rauer Umgebung erlaubt. Bisher konnte sich ein derartiges System bei der mobilen Partikel-Emissionsmessung an Feuerungsanlagen nicht durchsetzen. Das vorgestellte Sensorsystem, dessen Eignung vom TÜV Süd nachgewiesen und vom Umweltbundesamt im Bundesanzeiger bekannt gegeben wurde, eröffnet auch außerhalb der Grenzwertüberwachung neue Anwendungsbereiche, beispielsweise zur Entwicklung emissionsarmer Feuerstätten und Filtersysteme.

Keywords: Emissionsmessung, Feinstaubsensor, gravimetrisches Online-Verfahren, 1. BImSchV, Partikelmessung.

Motivation für Neuentwicklungen mobiler Staubmessverfahren

Die Messungen zur Überwachung von Staubemissionsgrenzwerten an Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe erfolgen in Deutschland zum einen im Rahmen einer einmaligen Typprüfung im Labor eines akkreditierten Prüfinstitutes und zum anderen bei wiederkehrenden Überprüfungen durch Messbeauftragte (Schornsteinfeger) nach den Vorgaben der 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes für kleine und mittlere Feuerungsanlagen) [1]. Die im Jahr 2010 novellierte 1. BImSchV senkt stufenweise sowohl die Staubgrenzwerte als auch die Nennwärmeleistung der zu überwachenden Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe drastisch ab. Die Grenzwerte sind dabei als Partikelmassenkonzentration je nach Feuerungsanlage in einem Bereich von $0,02 \text{ g/m}^3$ bis $0,15 \text{ g/m}^3$ einzuhalten.

Sowohl die Hersteller als auch die Betreiber überwachungspflichtiger Feuerungsanlagen haben bei verbindlichen Messungen des Verordnungsgebers einen Anspruch auf Gleichbehandlung und wollen vor ungerechtfertigten Folgen geschützt sein. Daher ist neben der Wirtschaftlichkeit des Messver-

fahrens seine Zuverlässigkeit und Robustheit sowie die rechtssichere Richtigkeit der Ergebnisse von großer Bedeutung. Neue Messgeräte und Verfahren, die zur Überwachung verbindlicher Grenzwerte des Verordnungsgebers eingesetzt werden sollen, müssen daher ein Zulassungsverfahren durchlaufen.

Zulassungsverfahren

In der Regel beauftragt ein Messgerätehersteller ein zugelassenes Prüfinstitut mit der Durchführung einer Eignungsprüfung für ein neues Emissionsmessgerät. Wird der Prüfbericht des Prüfinstitutes dann von einer Expertengruppe (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, LAI) positiv bewertet, so veranlasst das Umweltbundesamt eine entsprechende Bekanntgabe im amtlichen Teil des Bundesanzeigers. Für Staubmessgeräte im Anwendungsbereich der 1. BImSchV sind die Mindestanforderungen und Prüfpläne der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 „Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen, Messgeräte zur Ermittlung partikelförmiger Emissionen“ zu erfüllen [2].

Um nicht innovationshemmend zu sein, schreibt der Ordnungsgeber in dieser Richtlinie bewusst kein bestimmtes physikalisches Messprinzip vor. Er verlangt jedoch einen Nachweis der Gleichwertigkeit der Messwertanzeige der Prüfmuster mit einem anerkannten Standardreferenzverfahren im Sinn der 1.BImSchV. Bei nahezu allen zugelassenen Staubmessverfahren für Emissionsmessungen stellt die manuelle Staubmessung nach der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 „Messen von Partikeln; Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung“ dieses grundlegende Standardreferenzverfahren (SRV) in den Prüfplänen dar [3]. Das Verfahren beruht auf einer isokinetischen Probenahme von Staubpartikeln entweder im Kernstrom oder als Netzmessung im Abgas. Der partikelbeladene Teilstrom wird anschließend auf ein Filterelement geleitet, auf dem sich die Partikel abscheiden. Zur Vermeidung von Kondensattröpfchen muss die Probenahmevorrichtung bis zum Filter über den Wasserdampftaupunkt des Abgases beheizt werden. Sowohl vor als auch nach der Beprobung wird das Filterelement bis zur Gewichtskonstanz ausgeheizt, danach für einige Stunden im Exsikkator abgekühlt und anschließend einer Wägung unterzogen. Wird dann die in der Sonde und auf dem Filter abgeschiedene Staubmasse auf das Probenahmevolumen des Teilstroms bezogen, so ergibt sich eine Partikelmassenkonzentration mit der Maßeinheit „Masse je Volumen“.

In den letzten 5 Jahren wurden zahlreiche neue Staubmessverfahren für Überwachungsmessungen im Anwendungsbereich der 1. BImSchV entwickelt. Dabei kann zwischen direkten und indirekten Messprinzipien unterschieden werden. Um die Wirtschaftlichkeit dieser neuen Verfahren zu gewährleisten, handelt es sich bei diesen Neuentwicklungen meist um mobile quasikontinuierliche Staubmessverfahren, die während einer 15- oder 30-minütigen Probenahme oder unmittelbar im Anschluss an die Messung ein Sofortergebnis als Partikelmassenkonzentration vor Ort anzeigen.

Im Folgenden wird zwischen indirekt- und direktgravimetrischen quasikontinuierlichen Messprinzipien unterschieden.

Indirekte quasikontinuierliche Staubmessverfahren

Indirekte Partikelmessverfahren erfassen kontinuierlich elektrische, optische, aerodynamische oder strahlungstechnische Partikeleigenschaften. Bei der Umrechnung dieser indirekten Messgrößen in eine, vom Ordnungsgeber geforderte, äquivalente Partikelmassenkonzentration mit der Maßeinheit „g/m³“ erfolgt dann meist eine

individuelle, z.B. brennstoffabhängige, Kalibrierung auf die jeweilige Staubzusammensetzung [4]. Ändern sich die Partikelmorphologie, die Partikelgrößenverteilung oder die chemische Zusammensetzung, so ist in der Regel eine Neukalibrierung erforderlich.

Direktgravimetrische quasikontinuierliche Staubmessverfahren

Bei den direktgravimetrischen Staubmessverfahren geht die Masse der Staubpartikel direkt in das Messsignal ein. **Ernest Weingartner et al.** geben in [5] einen guten Überblick über diese Verfahren. Die Abbildung 1 zeigt beispielsweise einen klassischen Aufbau einer Quarzmikrowaage (Quartz Crystal Microbalance, QCM) mit zusätzlicher Aufladung der Partikel zur Verbesserung der Adhäsion der Partikel auf der schwingenden Sensoroberfläche.

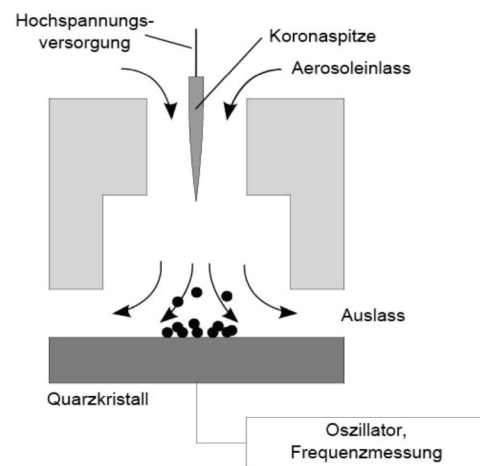


Abb. 1: Quarzmikrowaage mit zusätzlicher Korona-Aufladung zur Verbesserung der Partikelhaftung, nach [5].

Eine zunehmende Partikelmassenanlagerung erhöht die Schwingmasse um Δm . Dies führt zur Reduzierung der Resonanzfrequenz f_0 des schwingenden Kristalls im Vergleich zur unbeladenen Sensoroberfläche um Δf . Die **Sauerbrey**-Beziehung nach Gl. (1) beschreibt unter der Annahme einer homogen-dicken, rigid Schicht diesen Zusammenhang [6].

$$\Delta f = - \frac{2 \cdot f_0^2}{A \sqrt{\rho_q \mu_q}} \cdot \Delta m \quad (1)$$

mit:

Δf	Resonanzfrequenzänderung
f_0	Resonanzfrequenz
Δm	Angelagerte Partikelmasse
A	Piezoelektrisch aktive Kristallfläche
ρ_q	Dichte des Quarzmaterials
μ_q	Schermodul

Die Frequenzänderung Δf kann elektronisch sehr einfach und genau ausgewertet werden. Charakteristisch für Quarzmikrowaagen ist ihre sehr hohe Sensitivität. Ihre Grundfrequenz liegt im Bereich von 5 - 10 MHz, eine Staubmasseanlagerung von $0,005 \mu\text{g}$ führt typischerweise schon zu einer Absenkung der Resonanzfrequenz von ca. 1 Hz.

Die hohe Grundfrequenz einer QCM begründet nach Gl. (1) einerseits die hohe Messempfindlichkeit, verursacht andererseits jedoch eine mangelnde mechanische Anhaftung der Partikel auf der Sensoroberfläche. Eine zunehmende Partikelgröße verstärkt diese Problematik zusätzlich. Außerdem ist die Aufnahmekapazität der aktiven Sensorfläche relativ gering. Sobald die Oberfläche mit einer ersten Partikelschicht benetzt ist, haften weitere Partikel schwächer an, so dass sich die Sensitivität mit zunehmender Beladung verringern kann. Auch hier verstärkt eine zunehmende Partikelgröße diesen Nachteil.

Neuer direktgravimetrischer Partikelmasse-Sensor zur Emissionsmessung

Das Ausgangssignal des hier vorgestellten direktgravimetrischen Partikelmassesensors hängt ebenfalls ausschließlich von der Partikelmasse ab. Die Abbildung 2 zeigt das Funktionsschema. Es folgt dem Prinzip eines einseitig eingespannten und elektromechanisch angeregten Federpendels. Ein hohles Metallröhrchen bildet das Federelement, das über eine Aktorspule magnetisch zur Eigenschwingung angeregt wird. Eine Sensorspule registriert die Schwingung. Am freien Pendelende ist eine auswechselbare Filterpatrone mit einem Tiefenfilter aufgesetzt. Im Gegensatz zum TEOM-Prinzip (Tapered-Element-Oscillating-Microbalance, vgl. [5]) wird hier kein empfindliches Quarzglas-Element mit sich verjüngendem Durchmesser, sondern ein robustes dünnes Metallröhrchen eingesetzt.

In der linken oberen Darstellung der Abbildung 2 ist die Entnahmesonde dargestellt, mit der ein partikelbeladener Abgasteilstrom \dot{V}_N von 4,5 Liter je Minute der Abgasleitung entnommen wird. Der beheizte Probenahmeschlauch verbindet die Entnahmesonde mit dem Sensor.

Die Partikel gelangen durch das hohle Schwingröhrchen zu einer Filterpatrone. In dieser auswechselbaren Filterpatrone scheidet sich die Partikelmasse m_p während der Messung ab. Entsprechend reduziert sich die Eigenfrequenz des Federpendels.

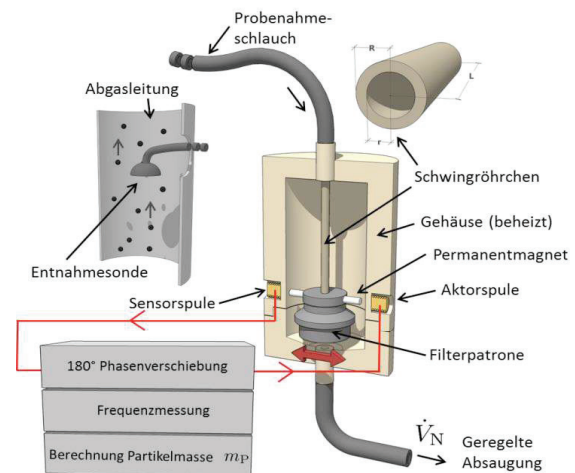


Abb. 2: Funktionsschema des direktgravimetrischen Partikelmasse-Sensors

Bestimmung der Sensorempfindlichkeit

Betrachtet man das einseitig eingespannte Röhrchen als Biegebalken der Länge L an dessen Ende senkrecht eine Kraft F einwirkt, so ergibt sich an der Stelle eine Durchbiegung s nach Gl. (2) [7].

$$s = \frac{L^3}{3 \cdot E \cdot I} \cdot F \quad (2)$$

Der materialabhängige Elastizitätsmodul ist dabei mit E und das von der Querschnittsfläche abhängende Flächenträgheitsmoment ist mit I bezeichnet. Eine Federkonstante bezeichnet allgemein das Verhältnis von Kraft F zum entsprechenden Weg s . Durch einen Koeffizientenvergleich mit Gl. (2) erhält man für eine Ersatzfederkonstante c folgende Beziehung.

$$c = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (3)$$

Mit der Ersatzfederkonstante kann allgemein die Eigenfrequenz f eines ungedämpften Federpendels wie folgt angegeben werden.

$$2 \cdot \pi \cdot f = \sqrt{\frac{c}{m_w}} = \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3 \cdot m_w}} \quad (4)$$

Die wirksame repräsentative Masse m_w in Gl. (4) setzt sich aus der Partikelmasse m_p und der Systemmasse m_s (leere Filterpatrone, Systemanteil aus Filterhalter- und repräsentativer Röhrchenmasse) des Federpendels zusammen.

$$m_w = m_p + m_s \quad (5)$$

Zu Beginn einer Emissionsmessung ist noch keine Partikelmasse ($m_p=0$) in der Filterpatrone angelagert. Zu diesem Startzeitpunkt wirkt ausschließlich die Systemmasse m_S und bewirkt die Eigenfrequenz f_S .

$$m_S = \frac{3 \cdot E \cdot I}{4 \cdot \pi^2 \cdot L^3 \cdot f_S^2} \quad (6)$$

Während der Beprobung lagert sich nach und nach eine Partikelmasse m_p in der Filterpatrone ab, so dass sich die Resonanzfrequenz f_M entsprechend der größer werdenden Summe von System- und Partikelmasse ($m_S + m_p$) verringert. Subtrahiert man während der Messung die Systemmasse zum Startzeitpunkt der Messung, so ergibt sich nach Gl. (7) die gesuchte Partikelmasse m_p .

$$m_p = (m_S + m_p) - m_S = \frac{3 \cdot E \cdot I}{4 \cdot \pi^2 \cdot L^3 \cdot f_M^2} - \frac{3 \cdot E \cdot I}{4 \cdot \pi^2 \cdot L^3 \cdot f_S^2} \quad (7)$$

Fasst man alle Systemeigenschaften des Federpendels zu einer Systemkonstanten K_0 zusammen, so vereinfacht sich Gl. (7) zu:

$$m_p = K_0 \cdot \left[\frac{1}{f_M^2} - \frac{1}{f_S^2} \right] \quad (8)$$

$$\text{mit: } K_0 = \frac{3 \cdot E \cdot I}{4 \cdot \pi^2 \cdot L^3}$$

Für das Flächenträgheitsmoment I einer Kreisfläche als Schnittfläche durch das dünnwandige Röhrchen mit dem Außenradius R und dem Innenradius r (vgl. Darstellung oben rechts in Abbildung 2) gilt der Zusammenhang aus Gl. (9) [8].

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot (R^4 - r^4) \quad (9)$$

Damit ergibt sich für die Systemkonstante K_0 des Partikelmasse-Sensors die Berechnungsvorschrift aus Gl. (10).

$$K_0 = \frac{3 \cdot E \cdot (R^4 - r^4)}{16 \cdot \pi \cdot L^3} \quad (10)$$

Im Gegensatz zu den indirekten Verfahren, hängt hierdurch die Sensorempfindlichkeit für die Bestimmung der Partikelmasse nur von

Systemeigenschaften des Federpendels und nicht von den Partikeleigenschaften ab. Für das hier beschriebene Federpendelsystem sind die Materialeigenschaft und die geometrischen Abmessungen nach Tabelle 1 charakteristisch.

Tab. 1: Typische Zahlenwerte für den E-Modul, Länge L , Außenradius R , Innenradius r und Eigenfrequenz f_M

Bezeichnung	Maß
E	$\approx 97 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
L	78,00 mm
R	2,25 mm
r	2,10 mm
f_M	180 Hz

Durch die Ableitung dm_p / df_M von Gl. (8) erhält man die Empfindlichkeit des Systems:

$$\frac{\Delta m_p}{\Delta f_M} = -2 \cdot K_0 \cdot \frac{1}{f_M^3} \quad (11)$$

In Analogie zur Empfindlichkeitsangabe einer Quarz-Mikrowaage nach der Sauerbrey-Beziehung in Gl. (1) ergibt sich aus Gl. (11) die folgende Empfindlichkeit:

$$\Delta f_M = \frac{f_M^3}{-2 \cdot K_0} \cdot \Delta m_p \quad (12)$$

Im Gegensatz zur quadratischen Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Eigenfrequenz f_0 einer QCM nach der Sauerbrey-Beziehung in Gl. (1) steigt beim Federpendel nach Gl. (12) die Empfindlichkeit mit der dritten Potenz. Aufgrund der im Vergleich zur Quarzmasse einer QCM hier viel höheren Systemmasse (Metallröhrchen, Filterhalter und Filterpatrone) beträgt die typische Eigenfrequenz der hier beschriebenen Anordnung jedoch lediglich ca. 180 Hz, siehe auch letzte Zeile in Tabelle 1.

Werden die Zahlenwerte des Federpendels nach Tabelle 1 in die Gl. (12) eingesetzt, so erhält man eine typische Empfindlichkeit von ca. 0,039 Hz je 1 mg Partikelmasse in der Filterpatrone. Eine Partikelmasse von ca. 25,6 mg reduziert damit die Eigenfrequenz des Federpendels um 1 Hz.

Mit dieser Auslegung ist die Empfindlichkeit des direktgravimetrischen Messsignals immer noch ausreichend für die geschilderte Messaufgabe. Das vorgestellte System ist jedoch erheblich robuster als eine Quarzmikrowaage oder eine TEOM-Anordnung, was für einen angestrebten mobilen Einsatz in rauer Messumgebung auch

aufgrund der Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung ist.

Die folgende Abbildung 3 zeigt die Taupunkttemperatur in Abgasen von Feststofffeuerungen in Abhängigkeit vom verwendeten Brennstoff und dem Restsauerstoffgehalt [4]. Die höchste praxisrelevante Taupunkttemperatur beträgt ca. 65°C bei Buchenholz mit einem Wassergehalt von 43 %.

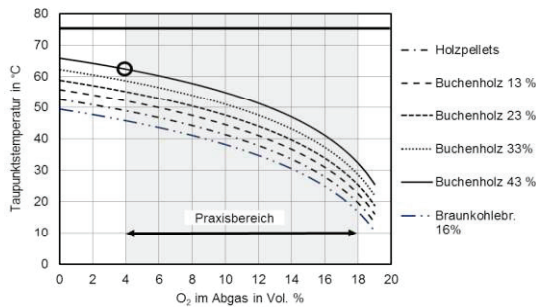


Abb. 3: Abgastaupunkt in Abhängigkeit vom Restsauerstoffgehalt im Abgas und Brennstoffwassergehalt [4].

Damit während der Beprobung der oszillierenden Filterpatrone nicht der Taupunkt im Messsystem unterschritten und dadurch die zusätzliche Masse der kondensierenden Wassertropfen in der Filterpatrone zu einer Fehlmessung führt, muss das System in kurzer Zeit über diese maximale Taupunkttemperatur aufgeheizt werden. Die Korrekturfunktion K_{cor} in Gl. (13) berücksichtigt eine scheinbare Masse, die durch die Temperaturabhängigkeit des Sensormaterials verursacht wird. Diese Funktion wird mit Hilfe einer partikelfreien Leermessung ($m_p = 0$) während eines Aufheizvorgangs ermittelt und im Messgerät hinterlegt.

$$m_p = K_0 \cdot \left[\frac{1}{f_M^2} - \frac{1}{f_S^2} \right] + K_{cor}(T, f) \quad (13)$$

mit:

- m_p = Partikelmasse
- K_0 = Systemkonstante des Resonators
- f_S = Frequenz bei Start der Messung
- f_M = Frequenz während der Messung
- K_{cor} = Temperaturkorrektur
- T = Materialtemperatur des Resonators

Dieser neue Partikelmasse-Sensor bildet die Hauptkomponente in einem kompakten tragbaren Messsystem zur direktgravimetrischen quasikontinuierlichen Staubmessung an Kleinfeuerungsanlagen. Es enthält zusätzlich eine geregelte Absaugpumpe mit einem

Gasvolumenstromsensor, dessen Signal während der Probenahmedauer zum Probenahmevermögen aufintegriert wird. In Analogie zum SRV nach VDI 2066 wird ebenfalls die Partikelmasse m_p auf das Probenahmevermögen des Teilstroms bezogen und somit unmittelbar vor Ort die Partikelmassenkonzentration ausgegeben. Ein elektrochemischer Sauerstoff- und ein Kohlenmonoxid-Sensor dienen zusätzlich zur parallelen Abgasanalyse.

Es gibt zwei typische Anwendungsbereiche für dieses Messsystem: Zum einen die 30-minütige Labormessung von Prüfinstituten zur Entwicklung und Zertifizierung neuer Feuerungsanlagen und zum anderen die regelmäßige Überwachungsmessung über 15 Minuten an der Feuerung vor Ort nach der 1. BlmSchV.



Abb. 4: Einsatz des mobilen Gesamtsystems an einem Scheitholzkessel

Die Abbildung 4 zeigt den Einsatz des vollständigen Messsystems an einem typischen Scheitholzkessel. Der Partikelmasse-Sensor ist in der Bedieneinheit oben auf dem Stativ integriert. Im Koffersystem, in Abbildung 4 am Boden stehend, befinden sich die geregelte Absaugpumpe und die Sensoren zur Gasanalyse.

Ergebnisse

Das hier beschriebene Messsystem wurde vom TÜV-Süd auf Genauigkeit und Robustheit eignungsgeprüft und im Bundesanzeiger für Überwachungsmessungen im Anwendungsbereich der 1. BlmSchV bekanntgegeben. Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurde der Großteil der Vergleichsmessungen zwischen Doppelbestimmungen nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 und den Prüfmustern an

unterschiedlichen Feuerstätten am IFK der Universität Stuttgart durchgeführt.

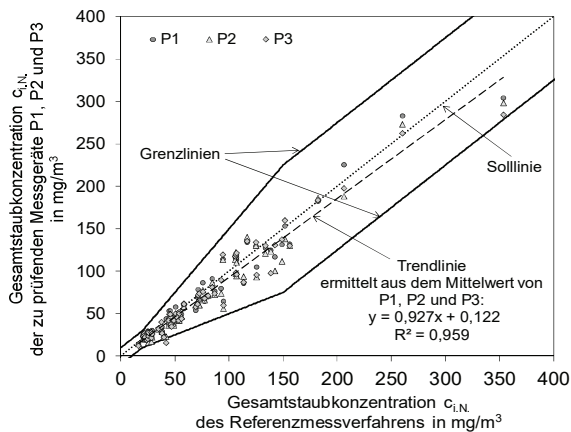


Abb. 5: Einzelmesswerte der Gesamtstaubkonzentration für die zu prüfenden Messgeräte P1, P2 und P3 sowie die Trendlinie der Mittelwerte der Gesamtstaubkonzentration über die drei zu prüfenden Messgeräte bei den Vergleichsmessungen mit dem Referenzmessverfahren unter realen Abgasbedingungen nach [9].

Die Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse von Vergleichsmessungen an realen Feuerungen zwischen drei identischen Prüfmustern des neuen Verfahrens P1, P2 und P3 und dem Standardreferenzverfahren nach VDI 2066 aus der Eignungsprüfung. Die nach der Richtlinie VDI 4206 Blatt 2 maximal zulässigen Toleranzen sind als dunkle Grenzlinien eingetragen. Nahezu alle Messwerte liegen sicher innerhalb dieses Bereiches.

Bei der Eignungsbekanntgabe eines neuen Verfahrens im Bundesanzeiger sind auch die jeweiligen Messunsicherheiten mit angegeben. Im Vergleich zu den indirekten Verfahren zeigt sich bei dem vorgestellten direktgravimetrischen Verfahren eine deutlich geringere Messunsicherheit über den gesamten Messbereich.

Die Unabhängigkeit der Messqualität von der Morphologie, Partikelgrößenverteilung und der chemischen Zusammensetzung der Partikel lässt eine höhere Zuverlässigkeit der Ergebnisse bei zukünftigen Forschungsprojekten an bisher nicht untersuchten Emissionsquellen erwarten.

Meyer, Lauber, Nussbaumer und Burtscher führen in [10] einen scheinbaren Masseanstieg eines TEOM-Systems bei elektrisch geladenen Staubpartikeln auf die Wechselwirkung der Ladung mit der elektrostatischen Anregung des Quarzglasfederpendels zurück.

Vergleichsmessungen mit dem hier vorgestellten Partikelmasse-Sensor an elektrostatischen Abscheidern (E-Filter) haben gezeigt, dass keine Abweichungen zum

Standardreferenzverfahren zu erwarten sind. Dies liegt zum einen an der für die Messaufgabe optimal angepassten geringeren Stömpfindlichkeit und zum anderen an der elektrischen Leitfähigkeit des metallenen Schwingröhrchens, die zur Ableitung eventueller Partikelladungen führt [4].

Literaturnachweis

- [1] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 4: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV), Bonn, 26. Januar 2016
- [2] VDI 4206 Blatt 2: 2015-2, Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinf Feuerungsanlagen, Messgeräte zur Ermittlung partikelförmiger Emissionen. Berlin: Beuth Verlag
- [3] VDI 2066 Blatt 1: 2006-11, Messen von Partikeln; Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Berlin: Beuth Verlag
- [4] Ester, S., Stizenberg, A., Struschka, M., Schäfer, C.: Online-Verfahren zur direktgravimetrischen Staubmessung über die Anforderungen der 1. BImSchV hinaus; 2. VDI-Fachtagung: Anlagenbezogenes Monitoring: neue Anforderungen – neue Konzepte; Karlsruhe, 14. und 15. Oktober 2014, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, *VDI Berichte Nr. 2215*, S. 107 – 126, VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), Düsseldorf 2014
- [5] E. Weingartner, H. Burtscher, C. Hüglin, K. Ehara: *Semi-Continuous Mass Measurement, Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, S. 255-268, 3rd Edition edited by P. Kulkarni, P.A. Baron, K. Willeke; John WILEY & Sons, Inc., Hoboken New Jersey, 2011
- [6] G. Sauerbrey, Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung, *Z. für Phys.* 155 (April, 1959), S. 206-222
- [7] R. Mahnken, *Lehrbuch der Technischen Mechanik-Dynamik*, S. 379, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010, DOI 10.1007/978-3-540-36041-4
- [8] HÜTTE - Das Ingenieurwissen, p E80, Herausgeber: Czichos, Horst, Hennecke, Manfred, Akademischer Verein Hütte e.V. (Hrsg.), Springer Berlin Heidelberg New York, 2008, ISBN 978-3-540-71851-2
- [9] C. Schäfer; G. Baumbach; S. Ester: Beurteilung der Messgenauigkeit von Staubmessungen an Kleinf Feuerungsanlagen; Tagungsband: VDI-Fachtagung „Neue Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität – UMTK 2015“, 20. und 21. Oktober 2015, Nürnberg; VDI-Berichte 2250, S. 219-236; ISBN: 978-3-18-092250-8; 2015
- [10] N.K. Meyer, A. Lauber, T. Nussbaumer, H. Burtscher: Influence of particle charging on TEOM measurements in the presence of an electrostatic precipitator, *Atmos. Meas. Tech.*, 2, 81-85, doi:10.5194/amt-2-81-2009, 2009.