

Prüfaerosolsystem zur Kalibrierung automatischer Feinstaubmessgeräte

K. Regir, H.-G. Kath, L. Mölter

Zusammenfassung Mit der Anlage CCE 3000 (Calibration channel for environmental fine dust monitoring systems) können Prüfaerosole im Konzentrationsbereich zwischen 20 und 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hergestellt werden. Die Stabilität der Aerosoldosierung beträgt dabei durchschnittlich 6,9 % über einen Prüfzeitraum von 72 Stunden. Die messtechnische Rückführung erfolgt mit den beaufschlagten Staubmengen, die jeweils über 24 Stunden mit einem Kleinfiltergerät beprobt und gravimetrisch ausgewertet werden. Zur statistischen Absicherung wird ein Testkandidat über jeweils dreimal 24 Stunden geprüft und die Ergebnisse werden in Form von Tagesmittelwerten des automatischen Verfahrens gegen die Tagesmittelwerte des Kleinfilterverfahrens ausgewertet. Mit erfolgreicher Prüfung kann damit ein automatisches Messgerät in den Messnetzbetrieb gehen, von dem die Äquivalenz gegen das Referenzverfahren bereits unter Laborbedingungen nachgewiesen wurde. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Absicherung der Datenqualität bei kontinuierlich arbeitenden Staubmessgeräten.

Test aerosol system for calibration of automatic fine dust measuring devices

Abstract The system CCE 3000 (Calibration channel for environmental fine dust monitoring systems) allows production of test aerosols in the concentration range between 20 and 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The stability of the aerosol output is on average 6.9% over a test period of 72 hours. Metrological traceability is established via 24-hours samples, which are taken with a small-filter device and evaluated gravimetrically. For statistical confirmation, the device under test is tested three times for 24 hours. The daily mean values of the automatic process are related to the daily mean values of the small-filter process. Upon passing the test, an automatic measuring device, whose equivalence to the reference method was already confirmed under laboratory conditions, may then be used in an air quality monitoring station. This is an important step in ensuring the data quality of continuous dust monitors.

1 Einführung

Bislang werden automatische Staubmessgeräte auf die Einhaltung ihres Nullwerts durch Vorschalten eines Nullluftfilters in die Probenahmeleitung geprüft. Zusätzlich wird kontrolliert, ob die Sollparameter des Geräts in den Toleranzen nach Herstellerangabe oder nach eigenen Vorgaben liegen. Sind die Ergebnisse dieser Prüfungen positiv, wird das Gerät zum Einsatz freigegeben. Inwieweit die vom automatischen Messgerät gelieferten Daten im zulässigen Äquivalenzkorridor in Bezug auf das Referenzverfahren liegen, kann erst im Nachgang durch entsprechende Vergleichsmessungen festgestellt werden [1 bis 3]. Eine direkte messtechnische Rückführung ist nicht möglich. In der

Regel vergehen mindestens sechs Wochen, bis erkannt wird, ob der Automat korrekt arbeitet. Damit unterscheiden sich die Vorgehensweisen für automatische Staubmessgeräte grundsätzlich von denen für die meisten anderen Analytoren im Messnetzbetrieb, bei denen man einen solchen „Blindflug“ nicht hinnimmt.

Im Rahmen der Modernisierung und Ertüchtigung der Infrastruktur für Wartung und Qualitätssicherung von Staubmessgeräten des sächsischen Luftmessnetzes wurden Prüfstände für die Bestimmung des Trocknerwirkungsgrads von FDMS¹⁾-Modulen und die Erzeugung von Prüfaerosolen zur Kalibrierung automatischer Staubmessgeräte realisiert. In Zusammenarbeit mit der Fa. Palas® und dem Messnetzbetrieb Luft der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) in Sachsen wurde die Leistungscharakteristik für das Prüfaerosolsystem erarbeitet. Ein Prototyp wurde in verschiedenen Entwicklungsstufen in die vorbereiteten staubarmen und klimatisierten Räume eingebaut und getestet. Technische Details wurden im Laufe von etwa zwei Jahren modifiziert, um die Leistung der Anlage in Übereinstimmung mit den formulierten Kriterien zu bringen. Auch die Wartungs- und Betriebsverfahren bedurften der Optimierung, um schließlich zu einer in der Praxis anwendbaren Lösung zu kommen. Diese steht nun seit Oktober 2016 zur Verfügung.

2 Prinzip und technischer Aufbau

Für den Betrieb der Anlage gelten folgende Randbedingungen:

- Zielkonzentration Feinstaub: 20 bis 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Volumenstrom der Testgeräte: 1,0 m^3/h (TEOM FDMS)
- maximale Anzahl Testgeräte: 2
- Volumenstrom des Referenzgeräts: 2,3 m^3/h (KF-Gerät Leckel)
- Anzahl Referenzgeräte: 1
- Maximaler Volumenstrom isokinetische Probenahme: 4,3 m^3/h ($2 \times 1 \text{ m}^3/\text{h} + 1 \times 2,3 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Erzeugung des Prüfstaubs: Feststoffdosierer RBG 1000
- Hauptvolumenstrom: maximal 20 m^3/h
- Verdünnungsvolumenstrom: maximal 10 m^3/h
- Prüfstaub: SAE fein (ISO 12103-1)

Die maximalen Haupt- und Verdünnungsvolumenströme sind durch bautechnische Gründe und die zur Verfügung stehende elektrische Leistung bedingt. Mit einem höheren Hauptluftvolumenstrom könnte die erzeugbare Feinstaubkonzentration weiter abgesenkt werden.

Zum Erzeugen eines stabilen Prüfaerosols mit sehr niedrigen Staubkonzentrationen wird das Gerät RBG 1000 der Fa. Palas® eingesetzt [4 bis 6]. Um die Feinstaubmessgeräte mit der notwendigen Staubkonzentration von ca. 20 bis 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ kalibrieren zu können, wurden weitere Maßnahmen an diesem Prüfsystem getroffen. Um die Partikel-

Klemens Regir, Horst-Günter Kath,
Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft,
Messnetzbetrieb Luft, Radebeul.
Leander Mölter,
Palas® GmbH, Karlsruhe.

¹⁾ FDMS: Filter Dynamic Measurement System

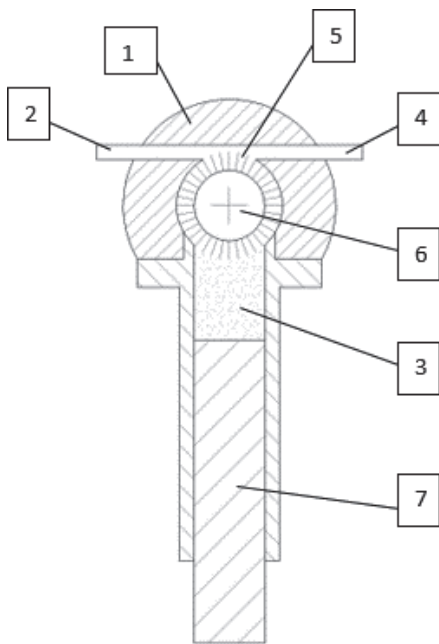


Bild 1. RBG-System (Bürstendosierer).

1: Dispergierkopf, 2: Dispergiertgaszufluss, 3: Haufwerk/Feststoffzufuhr, 4: Aerosolauslass, 5: Entstehungsort der dispersen Phase, 6: Transportbürste, 7: Transportkolben

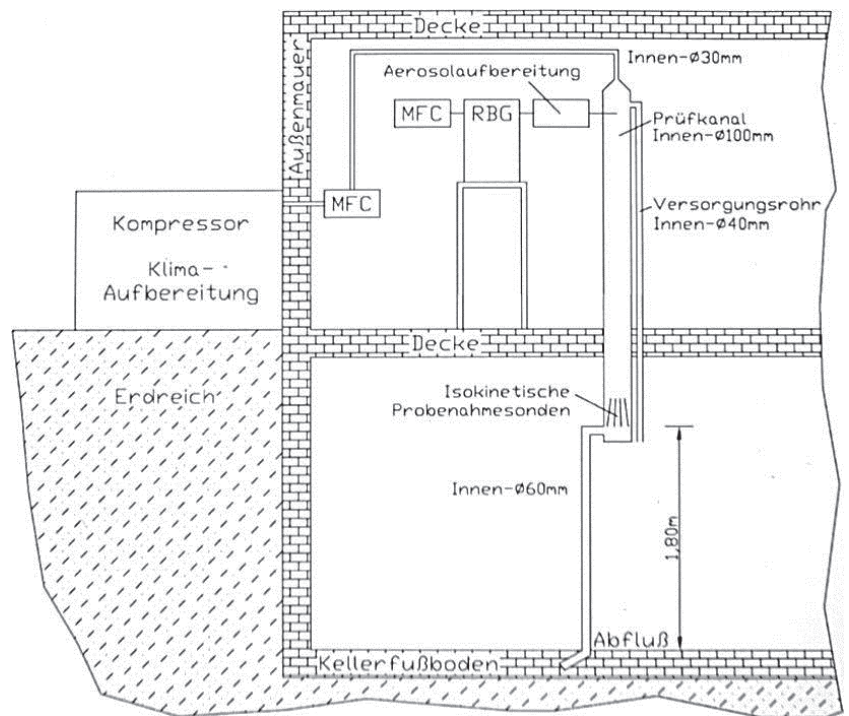


Bild 2. Schematischer Aufbau der Anlage.

größenverteilung einer PM_{10} -Verteilung annähernd anzupassen, wird das mit dem RBG 1000 erzeugte Prüfaerosol durch einen virtuellen Impaktor geleitet. Gleichzeitig wird die Aerosolkonzentration durch den virtuellen Impaktor zuverlässig und reproduzierbar verdünnt. Danach wird der Feinanteil aus dem virtuellen Impaktor in den Prüfkanal eingebracht, mit dem Hauptvolumenstrom auf die gewünschte Konzentration verdünnt und homogen im Prüfkanal verteilt. Am Ende des Prüfkanals werden das Referenzstaubmessgerät und maximal zwei zu kalibrierende Feinstaubmessgeräte (TEOM-1400 oder TEOM-FDMS-Geräte) über isokinetische Probenahmesonden am Prüfkanal angeschlossen. Je nach eingestelltem Gesamtvolumenstrom und angeschlossenen Feinstaubmessgeräten werden entsprechende, leicht auswechselbare isokinetische Probenahmesonden verwendet. Das RBG-System ist in **Bild 1** schematisch dargestellt.

Der erzeugte Massenstrom wird nach Gl. (1) berechnet:

$$\dot{m}_p = \frac{m_p}{t} = \frac{v_p \cdot \rho_s}{t} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_k \cdot p_s \quad (1)$$

mit:

- \dot{m}_p Massenstrom Partikel
- m_p Masse Partikel
- t Zeit
- v_p Volumen der Partikel im Feststoffbehälter
- ρ_s Stopfdichte des Pulvers im Feststoffbehälter
- d Innendurchmesser des Feststoffbehälters
- w_k Vorschubgeschwindigkeit des Transportkolbens

Die Massenkonzentration ergibt sich nach Gl. (2):

$$c_m = \frac{\dot{m}_p}{\dot{v}} \quad (2)$$

mit:

- c_m Massenkonzentration in kg/m^3
- \dot{m}_p Massenstrom Partikel in kg/h
- \dot{v} Volumenstrom in m^3/h

Zur Einstellung der Konzentration des Prüfaerosols stehen drei Regelparameter zur Verfügung:

- Vorschub des Staubpresslings im RBG 1000,
- Hauptvolumenstrom,
- Verdünnungsvolumenstrom.

Zur exakten und reproduzierbaren Einstellung der drei Volumenströme Dispergiervolumenstrom am RBG, Verdünnungsvolumenstrom am virtuellen Impaktor und Hauptvolumenstrom im Prüfkanal werden Mass Flow Controller (MFC) eingesetzt.

Da die Messungen auf die Staubmasse zurückgeführt werden, die mit einem KleinfILTERGERÄT als Referenzverfahren nach DIN EN 12341 [7] ermittelt wird, erstreckt sich ein Prüfzyklus auf 24 Stunden. Damit fällt bei einer Staubkonzentration von $50 \mu g/m^3$ und einem Volumenstrom des Referenzmessgeräts von $2,3 m^3/h$ eine wägbare Staubmenge von $2,7 mg$ je Filter an.

Bild 2 zeigt schematisch den Aufbau der Anlage; die **Bilder 5 bis 7** zeigen die konkrete Umsetzung. Die Anlage erstreckt sich über zwei Stockwerke. Staubdosierung und Erzeugung des Prüfaerosols finden im Obergeschoss statt. In einem senkrechten, rohrförmigen Kanal wird das Aerosol dann in die darunter liegende Etage geführt und dort isokinetisch für die Prüfung entnommen. Der größte Teil des Prüfaerosols wird in einer Bypass-Leitung unter dem Boden nach außen geführt und gefiltert.

3 Messtechnische Rückführung

Die messtechnische Rückführung der Prüfung erfolgt auf der Grundlage einer gravimetrischen Bestimmung des Feinstaubes nach DIN EN 12341. Ein Prüfintervall von



Bild 3. RBG 1000 mit Aerosolkanal.



Bild 4. Isokinetische Probenahme: Referenz und Testgerät.



Bild 6. Detail der isokinetischen Probenentnahme.

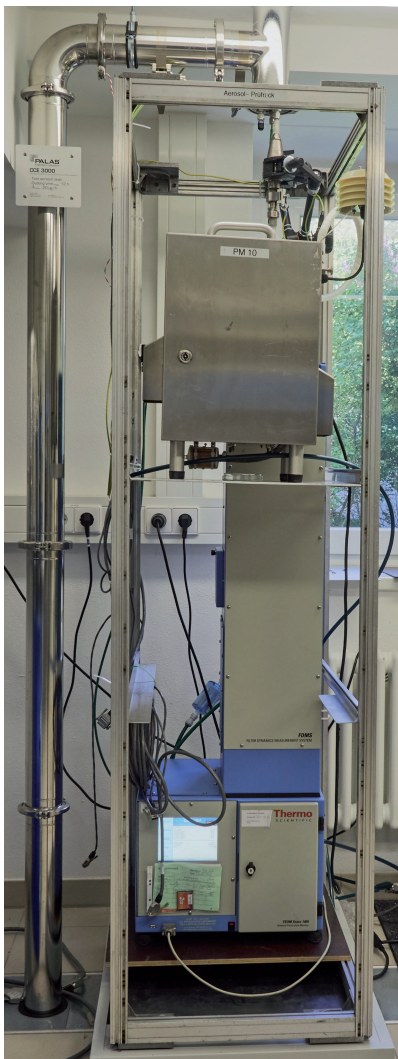


Bild 5. Prüfstand mit KleinfILTERGERÄT und TEOM 1405.



Bild 7. Prüfstand mit Nullluftkompressor.

Mittelwerte und Standardabweichungen für Prüfaerosolkonzentrationen und Nullwerte.

Prüfzyklus	Typ	1. Tag	2. Tag	3. Tag	Gesamtzyklus
1	P	47,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,2$	51,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3,2$	63,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,3$	53,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 8,2$
2	P	75,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 6,1$	66,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3,2$	70,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,3$	70,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,6$
3	P	81,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 7,2$	79,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3,8$	87,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,9$	82,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,3$
4	P	61,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2,5$	61,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3,4$	68,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,2$	63,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4,0$
5	P	34,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 1,9$	36,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2,9$	39,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2,3$	36,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2,4$
6	P	43,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 12,9$	38,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3,3$	42,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3,0$	41,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2,5$
1 bis 6	N				3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 1,5$

P = Prüfung mit Staub; N = Nullwert der Anlage ohne Staubdosierung

24 Stunden hat sich als optimal erwiesen: zum einen für die Produktion des Prüfaerosols in den Grenzen der Vorgabe (20 bis 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), die Beladung der Filter mit einer Staubmasse geringer Messunsicherheit, die arbeitstägliche Handhabung der Prüfung sowie die Standzeit des Staubpresslings im RBG 1000. Zum anderen liegt für diesen Zeitraum jeweils ein Tagesmittelwert über 24 Stunden in Form der Staubmasse vor. Inwieweit das Prüfaerosolangebot im Zyklus stabil war, sollte zunächst durch ein zusätzliches automatisches Staubmessgerät ermittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass dieser zusätzliche Aufwand nicht erforderlich ist, weil die Prüfung der Stabilität genauso gut mit dem Gerät erfolgen kann, das geprüft wird. Diese Maßnahme hat zu einer deutlichen Verschlankeung des Prüfaufbaus geführt.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise kann sichergestellt werden, dass für den Prüfzyklus die angebotene Gesamtmasse des Prüfstaubes ermittelt wird. Durch die Überwachung des Volumenstroms der Referenzgeräte mit auf die nationale Referenz rückführbaren Prüfmitteln kann zusätzlich die durchschnittliche Staubkonzentration ermittelt werden. Die messtechnische Rückführung der geprüften automatischen Staubanalytoren kann damit über deren 24-Stunden-Mittelwert einschließlich der ermittelten Standardabweichung erfolgen. Zusätzlich liefern die Kurzzeitwerte der Geräte genügend Informationen über die Stabilität des Prüfaerosols und detektieren Störungen oder Ausfälle der Aerosolerzeugung im Prüfzyklus zuverlässig.

4 Ergebnisse

Zur Beurteilung der Funktionstüchtigkeit und Nutzbarkeit des Prüfstands haben sich mehrere Parameter herauskristallisiert. Der kritischste Parameter ist die Stabilität des Aerosolangebots. Anfängliche Tests belegten eine geringe Stabilität, die sich grundsätzlich in Tendenzen zur Ab- und auch Zunahme der Staubkonzentration äußerten, zusätzlich überlagert von Einzelereignissen, in denen die Werte sprunghaft und für kurze Dauer anstiegen. Alle eingesetzten Korrekturverfahren haben sich auf die Vermeidung von Abscheidungen des Prüfstaubes in der Anlage konzentriert, indem die Güte der eingesetzten Oberflächen verbessert wurde, statische Aufladungen Aerosol transportierender Teile auch in der Probenentnahme abgeleitet wurden und eine regelmäßige Wartungsphase eingerichtet wurde. In dieser wird die Anlage geöffnet und gereinigt. Betriebsbedingungen und Wartungsaufwand sind daraus resultierend die bestimmenden Faktoren für die nutzbare Prüfkapazität der Anlage.

4.1 Stabilität des Aerosolangebots

Zur Beurteilung der Stabilität des Aerosoldargebots werden die Messwerte des zu prüfenden automatischen Staubmessgeräts herangezogen. Dabei ist es unerheblich, ob der absolute Staubmesswert des Geräts korrekt ist. Aufgrund der seit Oktober 2016 durchgeführten routinemäßigen Prüfungen sind Daten angefallen, die für eine Bewertung der Stabilität herangezogen werden können. Die Ergebnisse sind in Form der ermittelten arithmetischen Mittelwerte und der Standardabweichungen tabellarisch und grafisch als Verlauf der Staubkonzentration über die Zeit in der **Tabelle** bzw. in den **Bildern 8 bis 10** dargestellt. In der Regel teilt sich der Prüfzyklus in einen Abschnitt, in dem Staub über zwei bis drei Tage kontinuierlich dosiert wird und einen Teil, in dem die Staubkonzentration ohne Dosierung (Nullwert der Anlage) bestimmt wird. Der Gesamtzyklus kann bis zu fünf Tage dauern.

4.2 Kontaminationen

Kontaminationen in Verbindung mit dem Betrieb der Prüfaerosolanlage sind vagabundierende Staubmengen, die in der Anlage aufgrund von Absetzungen entstehen. In Bild 10 ist ein solcher Effekt sichtbar. Er ist durch im Vergleich zum sonstigen Verlauf ansteigende Messwerte gekennzeichnet, die aufgrund der abgeschalteten Dosierung nur durch in der Anlage befindlichen und bislang nicht ausgetragenen Staub zustande kommen können. Im Verlauf der Anlagen- und Prozessoptimierung haben sich die Effekte auf ein akzeptables Minimum reduzieren lassen. Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, liefert die Anlage Nullwerte in der Größenordnung von durchschnittlich 3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Grundsätzlich ist es mit der Prüfaerosolanlage auch möglich, Staub nicht nur hinsichtlich der Konzentration, sondern auch auf seine Inhaltsstoffe zu untersuchen. Solche Fragestellungen wurden bislang noch nicht bearbeitet, sodass Kontaminationen im Sinne eines Fremdeintrags von Stoffen, die originär nicht im Prüfstaub enthalten sind oder in deutlich erhöhten Mengen eingetragen werden, nicht beurteilt werden können.

4.3 Prüfergebnisse für TEOM FDMS

Für die Funktionsprüfung der Staubautomaten wurde ein Protokoll entwickelt, das die Prüfbedingungen und Ergebnisse dokumentiert und die Freigabe des Messgeräts für die Verwendung im Messnetz beinhaltet. **Bild 11** zeigt als Beispiel ein solches Protokoll.

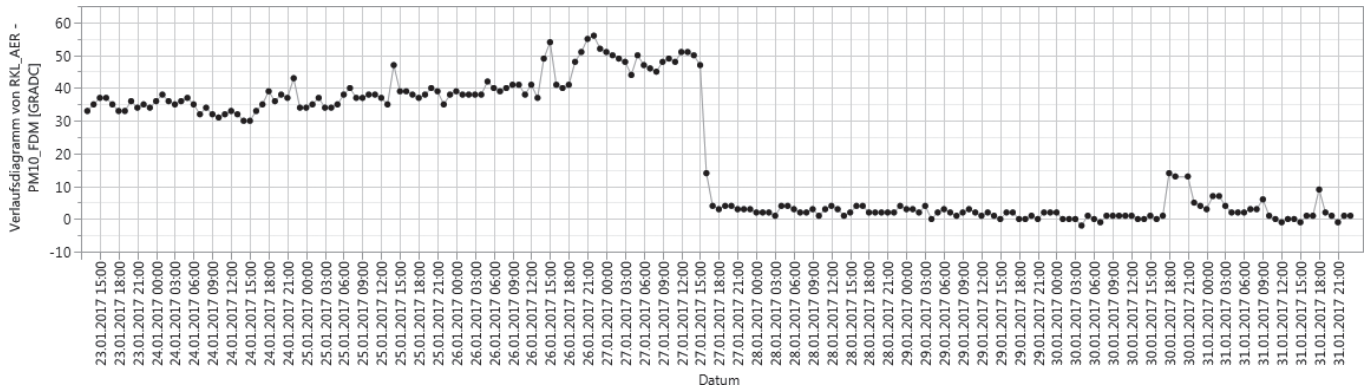


Bild 8. Verlauf der Staubkonzentration über den Gesamtzyklus.

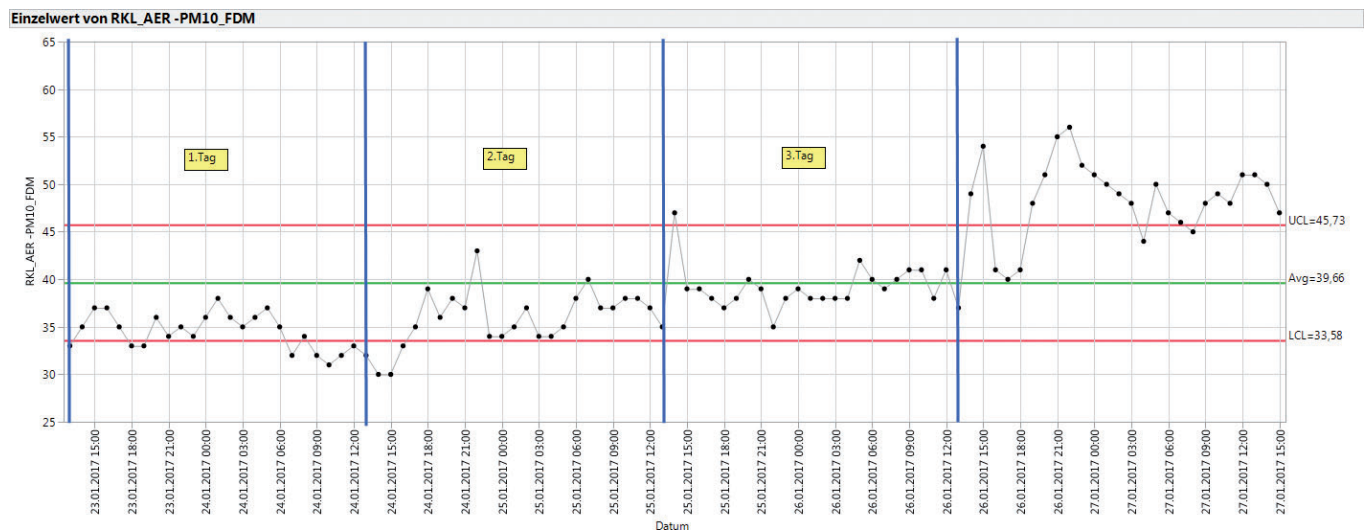


Bild 9. Verlauf der Prüfaerosolkonzentration im Messzyklus.

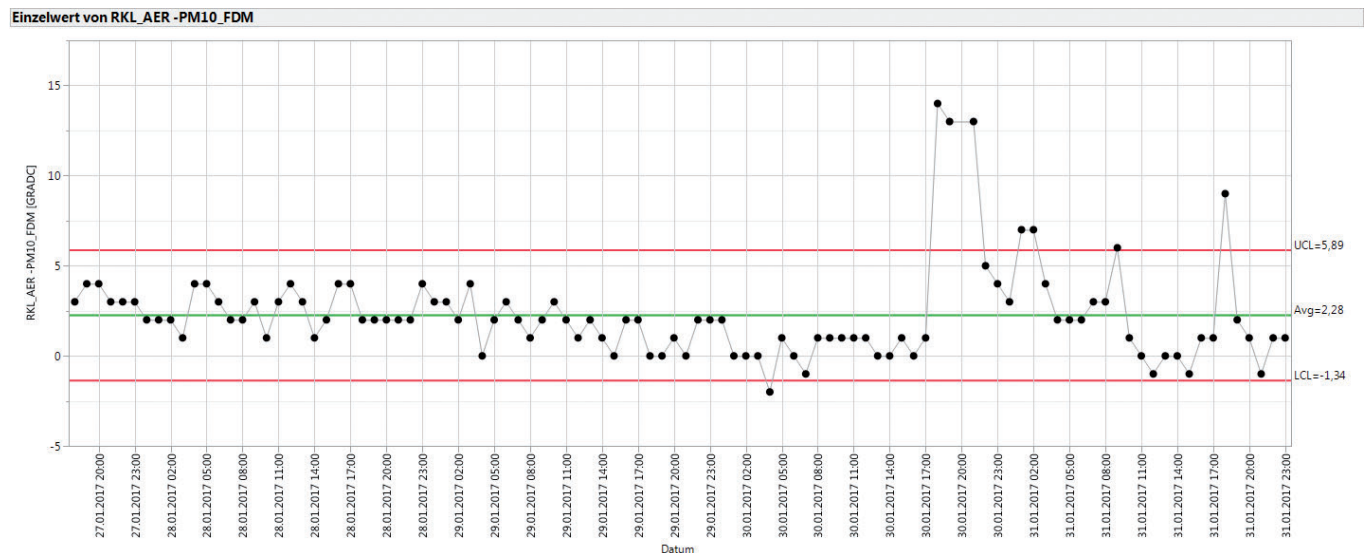


Bild 10. Verlauf des Anlagennullwerts.

4.4 Wartungsaufwand

Die Wartung wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Nach jeder Probenahme mit Kleinfilter-Gerät: Reinigung des Filterhalters mit Druckluft.

- Nach einem Messdurchlauf (entspricht 5 bis 4 x 24 h Probenahme Prüfaerosol zzgl. ca. 8 h Einlaufzeit) = insgesamt zwischen 80 h und etwa 100 h Betriebszeit:
 - Ausbau und Reinigung des Dosierzylinders für Staub am RBG 1000 (Pinsel und Staubsauger),

Prüfprotokoll Staub										
Probenahme mit TEOM FDMS +Kleinfilter										
Messkomponente:	Staub PM 10					Datum:	16.01.2017			
Anlage:	Kalibriergasanlage Staub					Uhrzeit Start:	13:00 [MEZ]			
Prüfung:						Uhrzeit Stopp:	13:00 [MEZ]			
	l (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A (m ²)	m ³ /h	V1 (m/h)	V1 (m/s)			
Kanalkuerschnitt		81	5150,4	0,00515		2831,07	0,79			
Teilquerschnitt		18	254,3	0,00025						
3 X Teilquerschnitt			763,02	0,0007630		19109,7	5,31			
Düse_1	30	7,9	49,0	0,0000490	1	20411,6	5,67			
Düse_2	30	10	78,5	0,0000785	1,6	20382,2	5,66			
Düse_3	30	7,9	49,0	0,0000490	1	20411,6	5,67			
mit einem FDMS		-D1, -D2		0,0006355		22943,3	6,37			
mit FDMS + Kleinfilter		nur -D1		0,0007140		20420,9	5,67			
Vorlauf nur FDMS:										
Vol. Strom_1	Verd. Strom	Gesamtstrom	gesamt		t _{acr}	P _{Atm}	Vol.Str. RBG	Vorsch.	Gesch.	
Nl/min	Nl/min	Nl/min	Nm ³ /h	Bm ³ /h	°C	hPa	Nl/min	mm/h		
192	30	222	13,32	14,58	19	990	42			2
Konzentration TEOM FDMS (µg/m ³)			34,48			Kompr. WS (h)	4747,60			
Konzentration Kleinfiltergerät (µg/m ³)			36,48			Kompr. WS (h)	4765,80	75,8%		
						Kompr. groß (h)	1944,50			
	Nm ³	m ³	h			Kompr. groß (h)	1953,20	36,3%		
Kleinfiltergerät:	35,51	38,38	24			Restvorsch. (mm)	62,7			
m (Kleinfilter) in g:	0,0014					Restvorsch. (mm)	43,5	0,80		
Bearbeiter:	M. Eilzer					Filter #	50972			
Unterschrift:										
Vorschub RBG = 2,0mm										

Bild 11. Prüfprotokoll.

- Ausbau und Reinigung des virtuellen Impaktors (Pinsel und Staubsauger),
- Ausbau und Reinigung des Verbindungselements zwischen RBG1000 und virtuellem Impaktor (Pinsel und Staubsauger),
- Kontrolle der Laufzeiten der Kompressoren, Kontrolle der Trockereinheiten der Kompressoren (Taupunkt, Restlaufzeit bis Service), Entleerung des Kondensatbehälters.
- Nach ca. fünf bis sechs Messdurchläufen (entspricht ca. 500 h) oder vor Inbetriebnahme nach längerer Standzeit:
 - siehe oben, zusätzlich Reinigung mit Druckluft,
 - Ausbau und Reinigung der Probenahmeverrichtung (Druckluft),
 - Reinigung des Abluftschlauchs des RBG1000,
 - Sichtkontrolle der Nullluftpartikelfilter,
 - Ausbau und Sichtkontrolle der Bürste am RBG1000.

4.5 Prüfkapazität

Die derzeit erreichbare Prüfkapazität reicht für ein automatisches Staubmessgerät pro Woche, die mindestens zwei vollständige 24-Stunden-Prüfungen umfasst, aus. Im sächsischen Luftmessnetz sind ca. 25 derartige Geräte, die jährlich gewartet werden, im Einsatz. Damit beträgt das Jahresaufkommen an Prüflingen 25 Geräte, die problemlos in 52 Kalenderwochen geprüft werden können. Je nach zu testendem Gerätesystem ist eine Verdoppelung der Kapazität möglich, wenn auch der zweite Anschluss an der isokinetischen Probenentnahmeverrichtung genutzt wird.

5 Ausblick

Mithilfe des Aerosolprüfstands in der beschriebenen Form wird es zu einer weiteren Stabilisierung der Datenqualität für die in Sachsen eingesetzten automatischen Staubmessgeräte kommen, insbesondere durch die Möglichkeit, Geräte unmittelbar vor dem Messnetzeinsatz durch eine

Funktionskontrolle auf korrekte Arbeitsweise zu prüfen, womit Abweichungen vom Äquivalenzkorridor, die bislang erst nach einem Betrieb von mehreren Wochen erkannt wurden, vermieden werden. Ein weiteres Einsatzfeld besteht in der Nutzung der Prüfaerosolanlage für die Ermittlung von Staubinhaltsstoffen. Hier ist z. B. die Bestimmung von elementarem Kohlenstoff als Fragestellung von besonderem Interesse zu nennen. Von Interesse ist bei der Funktionskontrolle mit rußhaltigem Staub sowohl das Verhalten automatischer Messgeräte als auch die laboranalytische Bestimmung von elementarem Kohlenstoff mit Filtermaterial und den zurzeit eingesetzten thermografischen und thermisch-optischen Analyseverfahren.

Literatur

- [1] Bruns, K.: Wie sichert man die Qualität einer Qualitätssicherung? In: Jahresbericht der Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 2007, S. 89-96. www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/jahresbericht/2007/2007_089-096.pdf
- [2] Nachweis der Äquivalenz für automatische PM₁₀-Messungen mit dem Staubmessgerät SHARP 5030. Bericht Nr. 43-14-BI-001. Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 2014. www.luen-ni.de/equivalence/PM10_PM2,5/Equivalence%20PM10_SHARP_GAA-HI.pdf
- [3] Kath, H.-G.: Vergleichsmessungen zur Bestimmung der Feinstaubkonzentration für PM_{2,5} im städtischen Hintergrund Dresdens. Bericht; Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft. Radebeul 2014. www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Vergleichsmessungen_PM2_5_Internet.pdf
- [4] Zahradnick, A.: Methoden zur Aerosolherstellung aus vorgegebenen Feststoffhaufwerken. Staub – Reinhalt. Luft 35 (1975) Nr. 6, S. 226-231.
- [5] Löffler, F.; Zahradnick, A.: Eine neue Dosiervorrichtung zur Erzeugung von Aerosolen aus vorgegebenen feinkörnigen Feststoffen. Staub – Reinhalt. Luft 36 (1976) Nr. 11, S. 425-427.
- [6] VDI 3491 Blatt 3: Messen von Partikeln – Herstellungsverfahren für Prüfaerosole – Dispergierung von Haufwerken und Feststoffen. Berlin: Beuth 2015.
- [7] DIN EN 12341: Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀- oder PM_{2,5}-Massenkonzentration des Schwebstaubes. Berlin: Beuth 2014.