Vergleichsmessungen zur Bestimmung der Feinstaub-konzentration für $PM_{2.5}$ im städtischen Hintergrund Dresdens

Durchgeführt über 12 Monate von 10/2012 bis 09/2013

Durch den Messnetzbetrieb Luft der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsens

Bericht vom 02.04.2014,

vorgelegt von Dr. Horst-G. Kath,
Messnetzbetrieb Luft der BfUL

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung und Aufgabenstellung 4
2. Standortbedingungen und Charakteristik 5
3. Teilnehmende Systeme 12
4. Anordnung der Geräte 13
5. Meteorologische Bedingungen des Standorts 14
6. Bestimmung der Referenzwerte 16
7. Wartung im Vergleichszeitraum 19
8. Aufbereitung der Daten 20
   8.1. Paarweise Prüfung 20
      8.1.1. Technische Plausibilität 21
      8.1.2. Qualitätsregelkarten 21
   8.2. Einzelprüfung 22
   8.3. Bildung der Tagesmittelwerte TMW und TMW_95 22
   8.4. Zusammenführung der Referenz- und Kandidatenwerte 22
   8.5. Regressionsanalysen 23
9. Ergebnisse 24
      9.1. Verfügbarkeit 24
      9.2. Äquivalenz 24
10. Zusammenfassung 31

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Jahresmittelwerte Luftqualität DD-Winckelmann 6
Tabelle 2: Statistik der Windgeschwindigkeit 9
Tabelle 3: Teilnehmende Systeme und Einsatzzeiten 12
Tabelle 4: Rohrleitungen und Vorabscheidung $PM_{2.5}$ 12
Tabelle 5: Anordnung der Geräte 13
Tabelle 6: Datenreduktion infolge Aufbereitung 20
Tabelle 7: Erreichte Verfügbarkeiten 24
Tabelle 8: Zusammenfassung der Äquivalenzergebnisse 24
Tabelle 9: Zusammenfassung der QRK-Ergebnisse 28
Tabelle 10: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus QRK und Regression 29
Tabelle 11: Daten des paarweisen Gerätevergleichs 30
Tabelle 12: Äquivalenzprüfung von Einzelgeräten 30

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Verlaufsdiagramm der TMW PM_{10} ... 6
Abbildung 2: Verlaufsdiagramm der TMW $PM_{2.5}$ ... 7
Abbildung 3: Verlaufsdiagramm TMW SO_2 ... 7
Abbildung 4: Verlaufsdiagramm TMW Ozon ... 7
Abbildung 5: Verlaufsdiagramm TMW NO ... 8
Abbildung 6: Verlaufsdiagramm TMW NO_2 ... 8
Abbildung 7: Anteil des $PM_{2.5}$ am PM_{10} ... 9
Abbildung 8: Histogramm Windrichtung DD-Winckelmannstraße ... 9
Abbildung 9:Histogramm Windrichtung „Hintergrund“ ... 10
Abbildungen 10: Messstellenumgebung ... 10
Abbildung 11: Messstellenumgebung ... 11
Abbildung 12: Sicht in Richtung Löfflerstraße ... 11
Abbildung 13: Anordnung der Geräte ... 13
Abbildung 14: Histogramme Meteorologie Teil 1 ... 14
Abbildung 15: Histogramme Meteorologie Teil 2 ... 15
Abbildung 16: QRK SEQ 8-Sigma mit Ausreißern ... 16
Abbildung 17: QRK SEQ 8-Sigma bereinigte Daten ... 17
Abbildung 18: QRK SEQ für TMW_95 ... 17
Abbildung 19. Ergebnisse der Regressionsanalyse SEQ 1/ SEQ2 ... 18
Abbildung 20: QRK für TEOM FDMS 8-Sigma-bereinigt (SMW) ... 21
Abbildung 21: QRK für TEOM 1405 8-SIgma-bereinigt (HMW) ... 21
Abbildung 22: QRK für APS-2 8-Sigma-bereinigt (SMW) ... 22
Abbildung 23: Histogramm der $PM_{2.5}$-Werte (SEQ) ... 25
Abbildung 24: Logarithmische Normalverteilung der $PM_{2.5}$- Werte ... 25
Abbildung 25: Regressionsfunktion SEQ / TEOM FDMS (TEOM FDMS = 0,86xSEQ +1,38) ... 26
Abbildung 26: Regressionsfunktion SEQ / TEOM 1405 (TEOM 1405 = 0,93xSEQ + 2,22) ... 26
Abbildung 27: Regressionsfunktion SEQ / APS – 2 (APS2 = 0,93xSEQ + 1,24) ... 27
Abbildung 28: Qualitätsregelkarte TEOM FDMS / SEQ ... 27
Abbildung 29: Qualitätsregelkarte TEOM 1405 / SEQ ... 28
Abbildung 30: Qualitätsregelkarte APS2 / SEQ ... 28

1. Einführung und Aufgabenstellung

Im Sächsischen Luftmessnetz werden Feinstaubmessungen für PM_{10} und $PM_{2.5}$ durchgeführt. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben überwiegt derzeit die Zahl der Messstellen für PM_{10}. Grenzwertüberschreitungen werden in der Regel anhand der Messwerte festgestellt, die mit High-Volume-Samplern vom Typ Digitel DHA-80 (HVS) und nachfolgender Wägung ermittelt wurden. Durch zahlreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen ist es inzwischen gelungen, die im Messnetz ebenfalls eingesetzten automatischen Feinstaubmessgeräte vom Typ TEOM FDMS so zu betreiben, dass sie für PM_{10} zum Referenzverfahren äquivalente Ergebnisse liefern, die auch die Vorgaben hinsichtlich der erweiterten Messunsicherheit einhalten. In den Stationen des Luftmessnetzes Sachsen sind derzeit 19 HVS, 17 TEOM FDMS und 3 TEOM 1400 / 50 ° sowie 8 HVS für $PM_{2.5}$ im Einsatz.

Die Einsatzcharakteristik der TEOM-Geräte ist so, dass sie in Ballungsgebieten mit erhöhter Wahrscheinlichkeit einer Grenzwertüberschreitung für PM_{10} parallel zu einem HVS betrieben werden und der zeitnahen Information der Öffentlichkeit über die Luftqualität dienen. Aufgrund der erreichten Datenqualität für die automatischen TEOM-Systeme werden sie darüber hinaus an anderen Standorten allein für die Überwachung der PM_{10}-Luftkonzentration eingesetzt.

Die Erfassung der $PM_{2.5}$-Feinstaubkonzentration erfolgt an allen 8 Messorten ausschließlich mit HVS Geräten, da alle bisherigen Versuche, ein automatisch arbeitendes Gerät für die Messung zu validieren gescheitert sind. Es hatte dazu in der Vergangenheit Versuche sowohl mit einem Gerätepaar vom Typ TEOM FDMS als auch mit einem Gerätepaar vom Typ SHARP gegeben, die mit negativem Ergebnis verlaufen waren.

Zukünftige Immissionsgrenzwerte orientieren sich möglicherweise ausschließlich am $PM_{2.5}$. Insofern ist es wünschenswert, für den Zeitpunkt einer solchen Änderung neben dem HVS-Gravimetrie-Verfahren auch ein geeignetes automatisches Gerät zu haben, das die Anforderungen an die Datenqualität erfüllt und zum Referenzverfahren nach DIN EN 12341 äquivalent ist. Um dazu Kenntnisse zu erlangen, die den aktuellen Stand der Qualitätssicherung im Sächsischen Luftmessnetz und den Entwicklungsstand der am Markt verfügbaren Geräten in einem handhabbaren Umfang abbilden, wurde eine Vergleichsmessung für $PM_{2.5}$ geplant und in der Stadt Dresden an einer Messstelle für den städtischen Hintergrund ausgeführt.

Ein wichtiges strategisches Ziel der Untersuchung bestand darin, die Eignung der im Messnetz zahlreich vorhandenen TEOM-FDMS nachzuweisen. Diese Zielstellung ist in der sinnvollen Nutzung getätigter Investitionen und in der über Jahre gewachsenen Personal- und Infrastruktur für diese Staubmesstechnik begründet. Da die Systeme vom Typ TEOM 1400 / FDMS 8500 nicht mehr produziert werden und an deren Stelle das ebenfalls eignungsgeprüfte System TEOM 1405 getreten ist, durch das verschlissene Geräte des Vorläufers zu ersetzen wären, war es zur Erfüllung des strategischen Ziels wichtig, die Eignung dieses TEOM 1405 zu prüfen. Für den Fall, dass die TEOM-Systeme keine ausreichende Datenqualität liefern würden, erfolgte eine Ergänzung der Testkandidaten durch ein Gerätepaar mit optischem Messverfahren.

2. Standortbedingungen und Charakteristik

Als Standort für die Untersuchung wurde die Station Dresden Winckelmannstraße ausgewählt. Sie hat die sächsische Messstellennummer 118 und die vom UBA und in der EU benutzte Kennung DE SN 092. Sie repräsentiert den städtischen Hintergrund und weist folgende Standortcharakteristika auf:

geographische Lage: Länge : 13°43´48,7 ö.L.; Breite: 51°02´10,0 n.B.

Gauß - Krüger Koordinaten: Rechtswert : 46 21 46 2; Hochwert: 56 57 08 6

Höhe über NN: 116 m

Stadt (a)und Stadtteil (b) mit Einwohnerzahlen: a) Stadt Dresden: 523.100 Einwohner (31.12.2010)

b) Südvorstadt: 18.300 Einwohner (31.12.2009)

Naturraum/Landschaft: Dresdner Elbtalweitung, südlicher Teil
Orographie: Der größte Teil des Stadtgebiets von Dresden befindet sich in der breiten, flachen Mulde des Elbtals. Ca. 200 m südlich des Containerstandorts geht die Mulde in den Hangbereich über, das Gelände steigt allmählich an.

Lage und Struktur der Siedlungen: Die Dresdner Südvorstadt ist ein flächenmäßig ausgedehnter Stadtteil südlich des eigentlichen Stadtzentrums. Im Norden wird er von den Eisenbahnanlagen am Dresdner Hauptbahnhof begrenzt. Der Stadtteil ist von Wohnbebauung geprägt, die von kleineren Mehrfamilienhäusern bis zu großen Wohnblöcken und Hochhäusern reicht. Charakteristisch sind weiterhin Gebäude und Einrichtungen der TU Dresden, der HTW Dresden und anderer Forschungseinrichtungen. Nahe am Hauptbahnhof sind nach 1990 mehrere große Gebäudekomplexe entstanden, die vor allem von Büros und Geschäften genutzt werden.

Siedlungsdichte: sehr hoch
Einordnung: Großstadt, Innenstadt, Wohngebiet

Gebietscharakteristik im Umkreis von 500 m

Bebauung: Der Standort ist vollständig von Wohngebäuden umgeben, die praktisch einen großen Innenhof bilden. Unmittelbar östlich steht ein ca. 160 m langer fünfstöckiger Gebäuderiegel in L-Form. Daran schließt sich nach Norden ein achtstöckiger Wohnblock mit ca. 90 m Länge an. In westlicher und südlicher Richtung ist die Bebauung lockerer. Dort wechseln sich Stadtvillen und Wohnblöcken mit maximal 4 Geschossen ab. Weiter in nördlicher Richtung befinden sich die hohen Gebäudekomplexe des Enso-Bürogebäudes und des Hauptbahnhofs.

unbebaute bzw. gering bebaute Flächen: Der Container steht auf einer Grünfläche. Das gesamte Gebiet ist von Grünanlagen und Gartengrundstücken durchzogen.

Straßen: Bundesstraße 170 (Fritz-Löffler-Str.) ca. 100 m östlich, durch Wohnblöcke vom Messstandort abgeschirmt. Kreuzungsbereich Münchner / Nürnberger Straße ca. 400 m südlich Die Winckelmannstraße ist an dieser Stelle eine wenig befahrene Nebenstraße.

Straßentyp: breite Straßen (Verhältnis Straßenbreite/Höhe der Gebäude: > 1,5)

Verkehrsdichte im Umkreis von 200 m: Belastungsgruppe hoch (10.000 bis 20.000 DTF)

Eisenbahnanlagen: Gleisanlagen ca. 350 m nördlich, stark befahrene Hauptstrecken und Rangierbetrieb, Betrieb überwiegend elektrisch (überregionale Personen- und Güterzüge, S-Bahn), Dieselbetrieb untergeordnet

Hauptemissionsquellen: Verkehr, Heizkraftwerk Nossener Brücke (Erdgas, HEL), FWL: 1014 MW ; 1,5 km westlich, Heizwerk Dresden-Reick, EG, FWL: 294 MW; 3,9 km südöstlich, Feuerungsanlagen von Industrie- und Wohngebäuden.

Die Luftqualitätsdaten der Station sind in Tabelle 1: Jahresmittelwerte Luftqualität DD-Winckelmann für die Jahre 2011, 2012 und 2013 in Form der Jahresmittelwerte aufgeführt:

Tabelle 1: Jahresmittelwerte Luftqualität DD-Winckelmann

Messwert:	PM10_HVS	PM2_HVS	SO2	O3	NO	NO2
MW-Typ:	JMW	JMW	JMW	JMW	JMW	JMW
Einheit:	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³
2011	21,95	17,14	4,2	44	5	24
2012	19,86	15,34	4,1	45	5	20
2013	20,31	16,04	4,3	47	5	20

Die Abbildung 1: Verlaufsdiagramm der TMW PM_{10} und Abbildung 2: Verlaufsdiagramm der TMW $PM_{2.5}$ für den zeitlichen Verlauf der Feinstaubkonzentration PM_{10} und $PM_{2.5}$ sowie die Schadstoffe SO_2, Ozon, NO und NO_2 in (Abbildung 3: Verlaufsdiagramm TMW SO_2, Abbildung 4: Verlaufsdiagramm TMW Ozon, Abbildung 5: Verlaufsdiagramm TMW NO, Abbildung 6: Verlaufsdiagramm TMW NO_2) zeigen in Form der benutzten Tagesmittelwerte (TMW) darüber hinaus, welchen jahreszeitlichen Schwankungen die Luftqualität unterworfen ist.

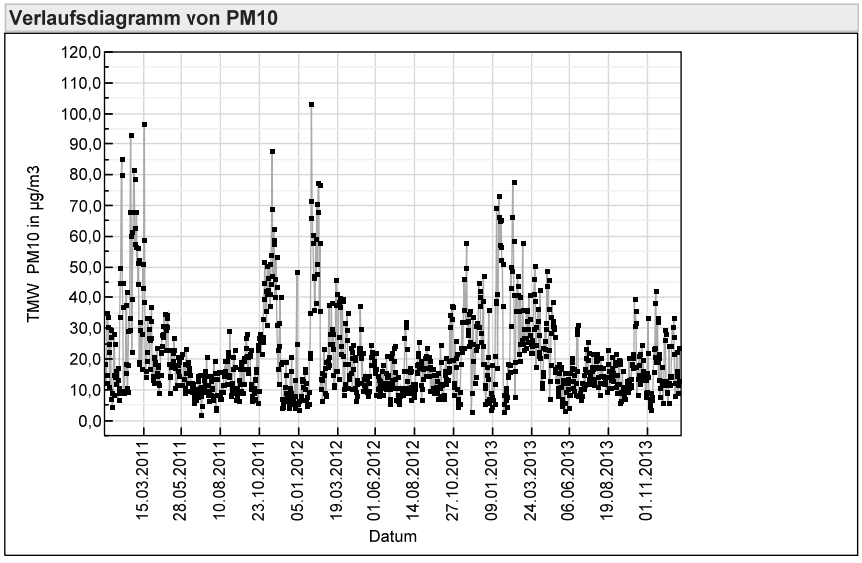


Abbildung 1: Verlaufsdiagramm der TMW PM_{10}

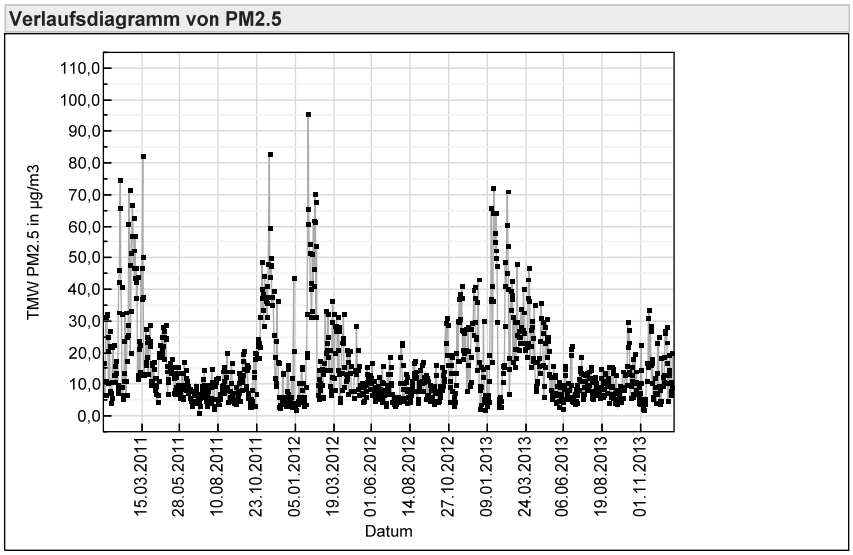


Abbildung 2: Verlaufsdiagramm der TMW $PM_{2.5}$

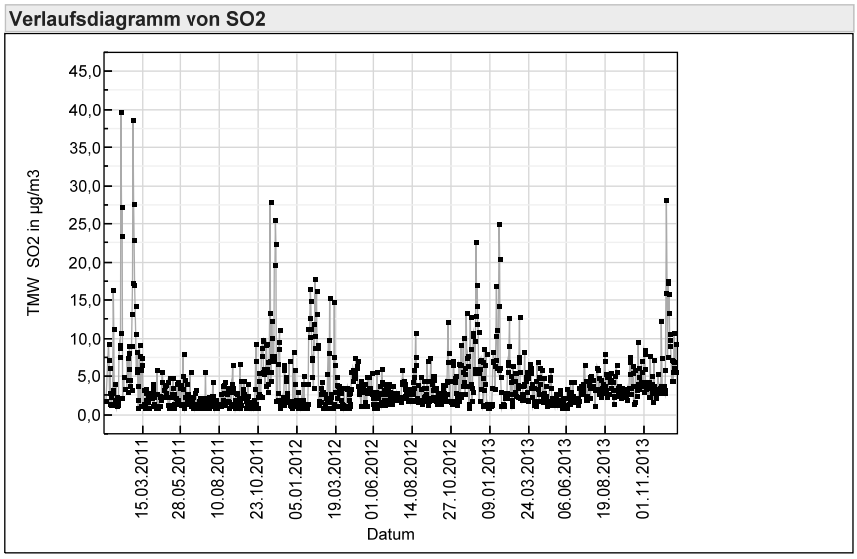


Abbildung 3: Verlaufsdiagramm TMW SO_2

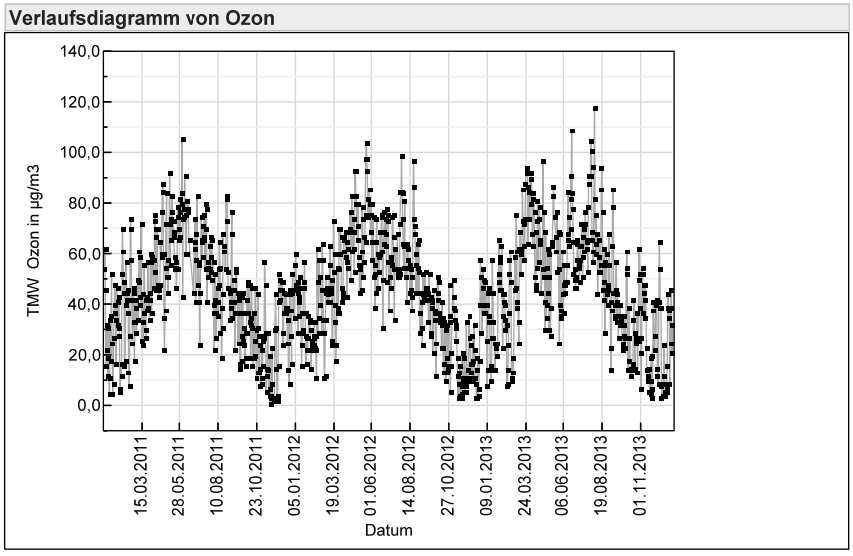


Abbildung 4: Verlaufsdiagramm TMW Ozon

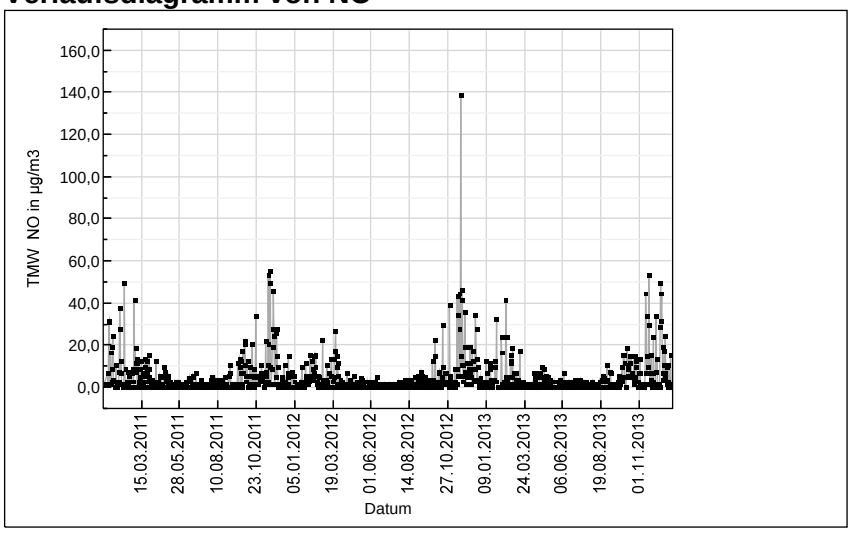


Abbildung 5: Verlaufsdiagramm TMW NO

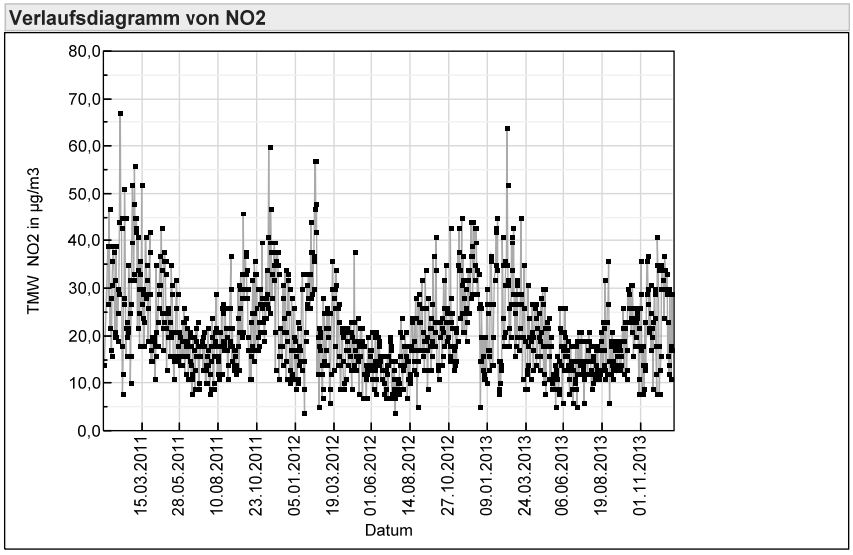


Abbildung 6: Verlaufsdiagramm TMW NO_2

Die dargestellten TMW für PM_{10} und $PM_{2.5}$ sind mittels HVS und Gravimetrie ermittelt worden. Zur Charakterisierung der Station ist es darüber hinaus nützlich, das Verhältnis zwischen PM_{10} und $PM_{2.5}$ zu beobachten. In der nachfolgenden Abbildung ist das Verhältnis von $PM_{2.5}$ am PM_{10} dargestellt. Im Durchschnitt des Untersuchungszeitraums beträgt der $PM_{2.5}$-Anteil 73,4 %. Die Grafik zeigt einen sinusförmigen Verlauf des Anteils über die Jahreszeit, die in etwa 50 % im Minimum und 95 % im Maximum aufweist.

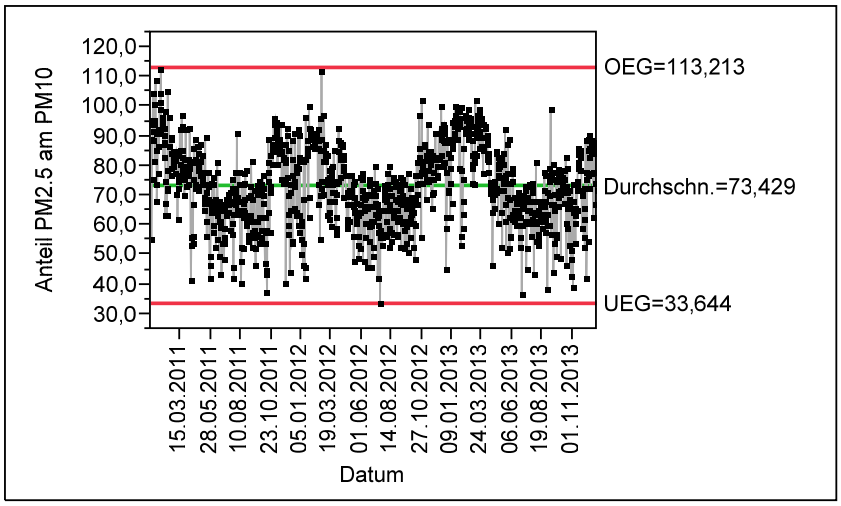


Abbildung 7: Anteil des $PM_{2.5}$ am PM_{10}

Meteorologische Bedingungen

Die meteorologischen Bedingungen an der Station sind durch die Bebauung und den Bewuchs beeinflusst. Obwohl die Bäume der näheren Umgebung vor Beginn der Messung verschnitten wurden, beeinträchtigt der vorhandene Bestand an alten und großen Bäumen im Einflussbereich der Messung die Variabilität auch auf kurze Distanzen. Um zu einer Einschätzung zu kommen, mit welchen Varianzen bei Windrichtung und Windgeschwindigkeit zu rechnen ist, wurden die Daten für Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowohl am stationären als auch am mobilen Messcontainer, in dem sich die Testkandidaten befanden, mit voneinander unabhängigen Sensoren ermittelt.

Die Tabelle stellt deskriptive statistische Kenngrößen für die Windgeschwindigkeit an den beiden meteorologischen Messpunkten der nebeneinander stehenden Container dar:

Tabelle 2: Statistik der Windgeschwindigkeit

Container	Windgeschwindigkeit [m/s]			
	AM*	Median	SD*	N (SMW)*
Winckelmannstraße	0,83	0,7	0,54	8768
„Hintergrund“	0,70	0,6	0,52	8762

*AM=arithmetischer Mittelwert, SD = Standardabweichung, N(SMW) =Anzahl der Stundenmittewerte

Für die Windrichtung als vektorielle Größe zeigen die Histogramme in der Abbildung einen Vergleich der im Abstand von etwa 5 m erhobenen Daten:

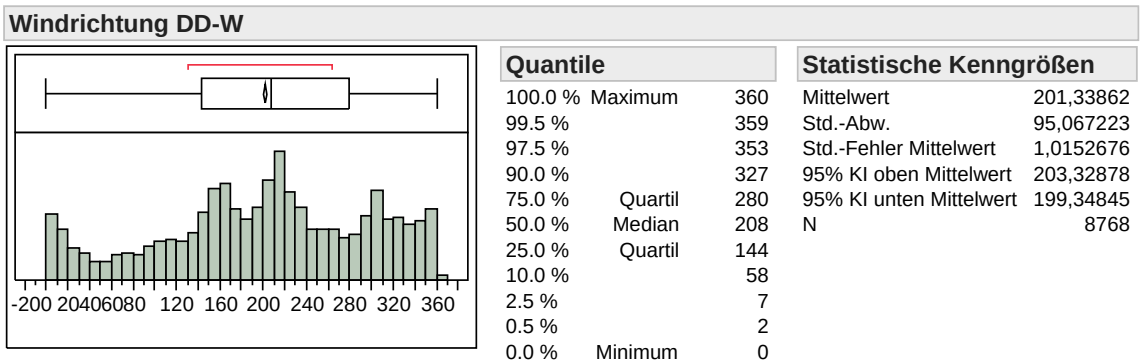
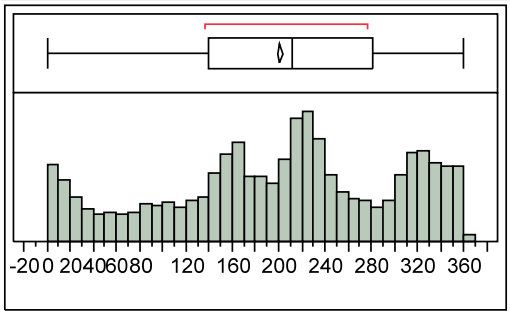


Abbildung 8: Histogramm Windrichtung DD-Winckelmannstraße

Windrichtung Hintergrund



Quantile		
100.0 %	Maximum	360
99.5 %		359
97.5 %		353
90.0 %		331
75.0 %	Quartil	281,25
50.0 %	Median	211
25.0 %	Quartil	139
10.0 %		42
2.5 %		7
0.5 %		1
0.0 %	Minimum	0

Statistische Kenngrößen	
Mittelwert	200,05878
Std.-Abw.	99,376136
Std.-Fehler Mittelwert	1,0616478
95% KI oben Mittelwert	202,13986
95% KI unten Mittelwert	197,9777
N	8762

Abbildung 9:Histogramm Windrichtung „Hintergrund“

Die dargestellten Daten belegen, dass sich die Windverhältnisse an den beiden nebeneinander liegenden Messcontainern (DD-Winckelmannstraße und „Hintergrund“) nur geringfügig unterscheiden. Die Anströmungsrichtung stimmt im Durchschnitt überein. Die Anströmgeschwindigkeit ist niedrig und liegt zwischen 0,6 und 0,7 m/s für den Median bzw. bei 0,7 bis 0,8 m/s im arithmetischen Mittel. Die Verteilung ist nahezu symmetrisch und weist Maxima bei 0°, 160 °, 230 ° und 320 ° auf. Der Charakteristik und Umgebung entsprechend sind sowohl die Windrichtungsverteilung als auch die Anströmgeschwindigkeiten so zu erwarten gewesen. Für den Vergleich zwischen den Referenzmessgeräten, die sich auf dem Container DD-Winckelmannstraße befanden und den Prüflingen, die in der Mehrzahl auf dem Container „Hintergrund“ installiert waren, bestehen aus dieser Hinsicht also keine Gründe, ein abweichendes Aerosolangebot anzunehmen.

Die gegebenen Verhältnisse werden in den nachfolgenden Abbildungen visuell verdeutlicht:

Abbildungen 10: Messstellenumgebung

Abbildung 11: Messstellenumgebung

Abbildung 12: Sicht in Richtung Löfflerstraße

Abbildung 12 zeigt die Lage der Messstelle Dresden Winckelmannstraße zur nächsten, stark befahrenen Straße, die sich in der Verlängerung des Fußweges zwischen Container und links davor parkenden Autos vor den sichtbaren Neubaublöcken in etwa 250 m in östlicher Richtung befindet.

3. Teilnehmende Systeme

Die Vergleichsmessung wurde mit 3 Testkandidaten und 1 Referenzmesssystem durchgeführt. Für jedes System kamen dabei zwei Geräte zum Einsatz, um die Messunsicherheit innerhalb der Systeme für die Auswertung berücksichtigen zu können. Ein System wurde erst im Frühjahr 2013 in die Untersuchung aufgenommen, so dass dafür ein reduzierter Datensatz vorhanden ist, in dem die Herbst- Winterperiode fehlt. In der tabellarischen Zusammenstellung finden sich die näheren Angaben zu den eingesetzten Geräten und deren Einsatzzeit in der Vergleichsmessung:

Tabelle 3: Teilnehmende Systeme und Einsatzzeiten

Gerätetyp /Verwendung	Hersteller	Funktionsprinzip	Messungzeitraum	
			Beginn	Ende
SEQ / Referenz	Fa. Leckel	Gravimetrie	01.10.12	01.10.13
TEOM FDMS / Kandidat	Thermo Fisher Scientific	oszillierende Mikrowaage	01.10.12	01.10.13
TEOM 1405 / Kandidat	Thermo Fisher Scientific	oszillierende Mikrowaage	01.10.12	01.10.13
APS-2 / Kandidat	Comde-Derenda GmbH	optisch	26.03.13	01.10.13

Für die genannten Referenz- und Kandidatensysteme wurden jeweils die vom Hersteller / Lieferanten bereitgestellten Vorabscheider eingesetzt. Da sich diese unterscheiden und damit einen möglichen Unterschied in der größenselektiven Sammeleffizienz verursachen können, sollen die technischen Angaben nachfolgend konkret aufgeführt werden:

Tabelle 4: Rohrleitungen und Vorabscheidung $PM_{2.5}$

Gerätetyp /Verwendung	Rohrleitung /Montage	Eingesetzter Vorabscheider (VA)
SEQ / Referenz	Feldgerät auf Container	Impaktion, gefettete Prallplatte, Düsensatz $PM_{2.5}$, 2,3 m^3/h
TEOM FDMS / Kandidat	Gerät im Container, Rohrleitung zum VA	Impaktion, LVS/$PM_{2.5}$ Inlet Digitel, gefettete Prallplatte, 1m^3/h
TEOM 1405 / Kandidat	Gerät im Container, Rohrleitung zum VA	Ruppert & Patashnik PM_{10} Vorabscheider Impaktion, keine separate Prallplatte, Boden ohne Fett, nachgeschaltet $PM_{2.5}$ Zyklon
APS-2 / Kandidat	Feldgerät auf Container	PM_{10} Vorabscheidung Impaktion, gefettete Prallplatte, Düsensatz PM_{10}, 0,198 m^3/h, virtueller Impaktor für $PM_{2.5}$

4. Anordnung der Geräte

Wegen der Anzahl der teilnehmenden Systeme und dem normalen Stationsbetrieb für den Messcontainer war eine Unterbringung an nur einem Standort nicht möglich. Stattdessen wurde in unmittelbarer Nachbarschaft zum Container Dresden Winckelmannstraße ein zusätzlicher Mobilcontainer, der die Stationsbezeichnung Hintergrund hat, aufgestellt. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Installationsmöglichkeit wurden die Geräte aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Tabelle enthält zur Erläuterung der Aufstellung nähere Angaben und Informationen, die auch für das Verständnis der Lageskizze benötigt werden:

Tabelle 5: Anordnung der Geräte

Gerät	Container	Stellplatznummer
SEQ_1	Winckelmannstraße	1
SEQ_2	Winckelmannstraße	2
APS-2_ 1	Winckelmannstraße	3
APS-2 _2	Winckelmannstraße	4
Meteorologie	Winckelmannstraße	M1
TEOM FMDS_1	Hintergrund	5
TEOM FDMS_2	Hintergrund	6
TEOM 1405_1	Hintergrund	7
TEOM 1405_2	Hintergrund	8
Meteorologie	Hintergrund	M2

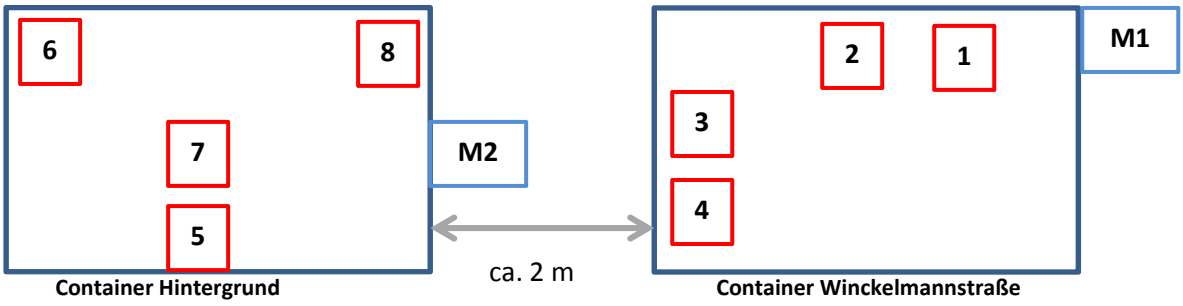


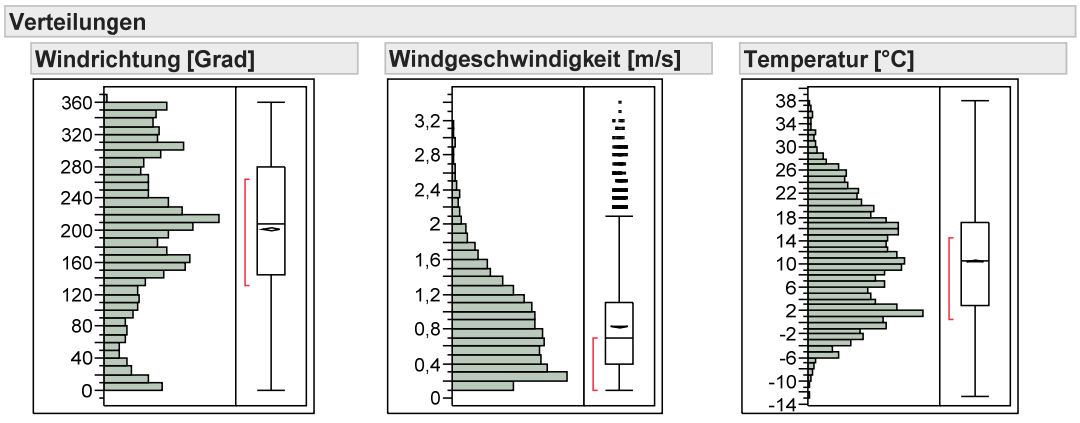
Abbildung 13: Anordnung der Geräte

Wie aus Abbildung 11: Messstellenumgebung erkennbar ist, befinden sich auf dem Containerdach der Station Winckelmannstraße darüber hinaus noch zwei Probenahmestellen für $PM_{2.5}$ und PM_{10} mit einem Digitel DHA-80 Feldgehäuse und eine Probenahmestelle für PM_{10} mit einem TEOM FDMS genau gegenüber den Stellplätzen 1 und 2 der SEQ-Referenzen. Damit sind die Containerdächer ziemlich dicht mit Probeentnahmestellen belegt. Ein negativer Einfluss ist nicht völlig auszuschließen. Geringe Anströmgeschwindigkeiten und der maximal mögliche Abstand zwischen den Entnahmen sprechen aber dafür, dass sich dieser in Grenzen hält.

5. Meteorologische Bedingungen des Standorts

Wie im Abschnitt 2 bereits dargelegt, unterscheiden sich die Mikroklimata bezüglich Windrichtung und Windgeschwindigkeit nur sehr gering an den beiden Messplätzen. Im nachfolgenden Abschnitt sollen die klimatischen Bedingungen an den Stationen im Verlaufe des Messprogramms dargestellt werden. Dies dient der Ableitung der meteorologischen Randbedingungen in Bezug auf die Anforderungen der europäischen Richtlinie zur Ermittlung der Äquivalenz. Die Daten sind in Form der Histogramme aufbereitet.

Für die Temperaturen im Vergleichszeitraum ergeben sich aus den Daten Stundenmittelwerte zwischen -12,6 °C im Minimum und 38 °C im Maximum. Der arithmetische Mittelwert liegt bei 10,59 °C und unterscheidet sich vom Median (10,4 °C) nur geringfügig. Anhand des Histogramms für die Außentemperatur ist ableitbar, dass es eine gleichmäßige Ausbildung der Temperaturverteilung sowohl in Richtung auf das Maximum als auch das Minimum gibt. Die Windgeschwindigkeiten sind, wie bereits dargestellt, im Durchschnitt (Median und AM) unter einem Meter je Sekunde. Anströmgeschwindigkeiten bis 2 m /s kommen in der Verteilung noch gut repräsentiert vor. Die relative Feuchte lag durchschnittlich (AM) bei 72 %, der Druck ist symmetrisch um den Mittelwert von 1016 hPa verteilt.



Quantile		
100.0 %	Maximum	360
99.5 %		359
97.5 %		353
90.0 %		327
75.0 %	Quartil	280
50.0 %	Median	208
25.0 %	Quartil	144
10.0 %		58
2.5 %		7
0.5 %		2
0.0 %	Minimum	0

Statistische Kenngrößen	
Mittelwert	201,33862
Std.-Abw.	95,067223
Std.-Fehler Mittelwert	1,0152676
95% KI oben Mittelwert	203,32878
95% KI unten Mittelwert	199,34845
N	8768

Quantile		
100.0 %	Maximum	3,4
99.5 %		2,8
97.5 %		2,2
90.0 %		1,6
75.0 %	Quartil	1,1
50.0 %	Median	0,7
25.0 %	Quartil	0,4
10.0 %		0,2
2.5 %		0,1
0.5 %		0,1
0.0 %	Minimum	0,1

Statistische Kenngrößen	
Mittelwert	0,8336109
Std.-Abw.	0,5461569
Std.-Fehler Mittelwert	0,0058327
95% KI oben Mittelwert	0,8450443
95% KI unten Mittelwert	0,8221775
N	8768

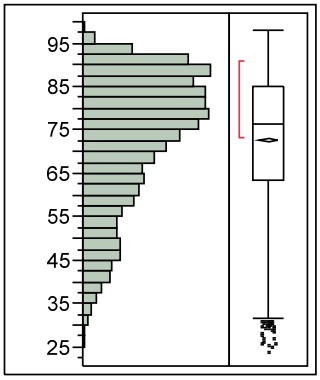
Quantile		
100.0 %	Maximum	38
99.5 %		34,335
97.5 %		28,1
90.0 %		22,9
75.0 %	Quartil	17,1
50.0 %	Median	10,4
25.0 %	Quartil	2,8
10.0 %		-1
2.5 %		-4,9
0.5 %		-7,7175
0.0 %	Minimum	-12,6

Statistische Kenngrößen	
Mittelwert	10,587084
Std.-Abw.	9,1249354
Std.-Fehler Mittelwert	0,0974717
95% KI oben Mittelwert	10,778151
95% KI unten Mittelwert	10,396016
N	8764

Abbildung 14: Histogramme Meteorologie Teil 1

Verteilungen

Feuchte [r.F.]; [%]



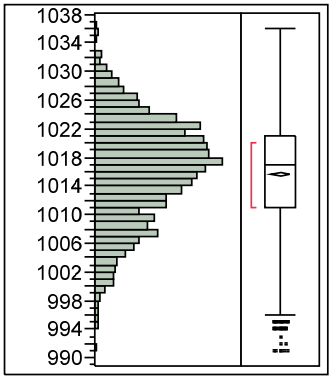
Quantile

100.0 %	Maximum	98,1
99.5 %		95,8
97.5 %		93,2
90.0 %		90
75.0 %	Quartil	84,8
50.0 %	Median	76,3
25.0 %	Quartil	63,3
10.0 %		48,9
2.5 %		38,8125
0.5 %		32,2
0.0 %	Minimum	23,6

Statistische Kenngrößen

Mittelwert	72,890278
Std.-Abw.	15,160739
Std.-Fehler Mittelwert	0,1619456
95% KI oben Mittelwert	73,20773
95% KI unten Mittelwert	72,572827
N	8764

Druck [hPa]



Quantile

100.0 %	Maximum	1036
99.5 %		1032
97.5 %		1028
90.0 %		1024
75.0 %	Quartil	1021
50.0 %	Median	1017
25.0 %	Quartil	1011
10.0 %		1006
2.5 %		1000
0.5 %		995
0.0 %	Minimum	991

Statistische Kenngrößen

Mittelwert	1015,762
Std.-Abw.	7,1858625
Std.-Fehler Mittelwert	0,0767412
95% KI oben Mittelwert	1015,9124
95% KI unten Mittelwert	1015,6115
N	8768

Abbildung 15: Histogramme Meteorologie Teil 2

6. Bestimmung der Referenzwerte

Zum Nachweis der Äquivalenz der Testkandidaten wurden die Referenzwerte mit zwei Kleinfiltergeräten vom Typ SEQ 47 / 50 eingesetzt. Im Verlaufe der Vergleichsmessung wurden die beiden Geräte aller 3 Monate mit einem Prüfmittel auf Einhaltung der vorgegebenen Volumenströme hin untersucht. Der Filterwechsel erfolgte etwa aller 14 Tage. Die Geräte befanden sich auf dem Dach des Containers Winckelmannstraße. Die Konfiguration des Vorabscheiders $PM_{2.5}$ und des Probenahmerohrs entspricht der Herstellerauslieferung. Die Prallplatten wurden im Rahmen des Filterwechsels inspiziert und gedreht bzw. gewechselt. Aus den über 12 Monate erhobenen Daten wurden diejenigen selektiert, für die beide Geräte einen gültigen Messwert lieferten. Das Gerät SEQ 1 steuerte dazu 357 Tageswerte, das SEQ 2 358 bei. Damit lag die Verfügbarkeit zwischen 97,8 und 98,1 % (365 Tageswerte = 100%). Die Daten werden anhand der paarweise vorhandenen Messwerte einer weiteren Plausibilitätsprüfung unterzogen. Dies erfolgt mit einer Qualitätsregelkarte (QRK), die die Abweichungen zwischen den Geräten je Tag in den Grenzen des 8-Sigma-Korridors darstellt. Messwertpaare, die außerhalb dieses Korridors liegen, werden als Ausreißer verworfen. Aufgrund dieser Vorgehensweise werden vier Datensätze gestrichen. Die Abbildungen zeigen die Qualitätsregelkarten für die beiden SEQ vor und nach der Entfernung der Ausreißer.

Der Wert für QRK SEQ auf der Ordinate ergibt sich aus

$$\text{QRK SEQ} = \frac{SEQ\ 2 - SEQ\ 1}{SEQ\ 1} \times 100.$$

Für den Wert 0 stimmen die Messwerte überein:

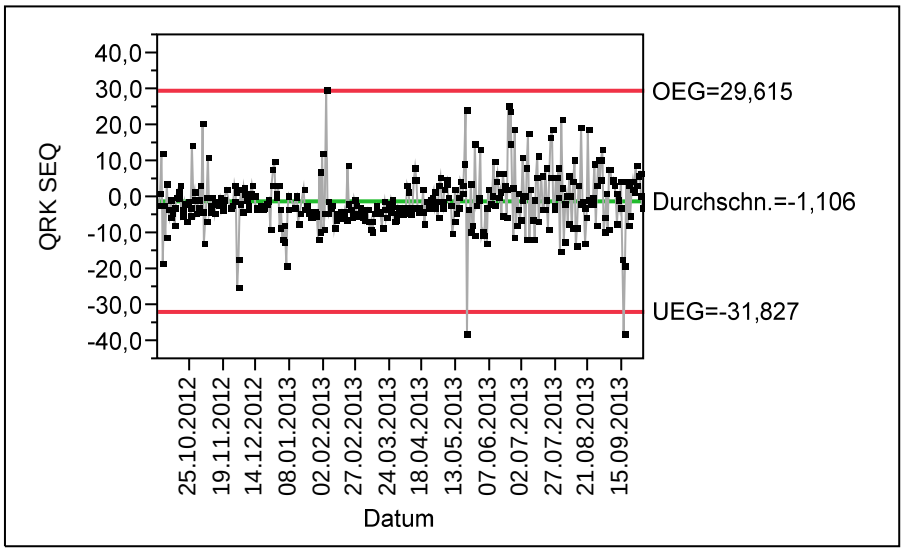


Abbildung 16: QRK SEQ 8-Sigma mit Ausreißern

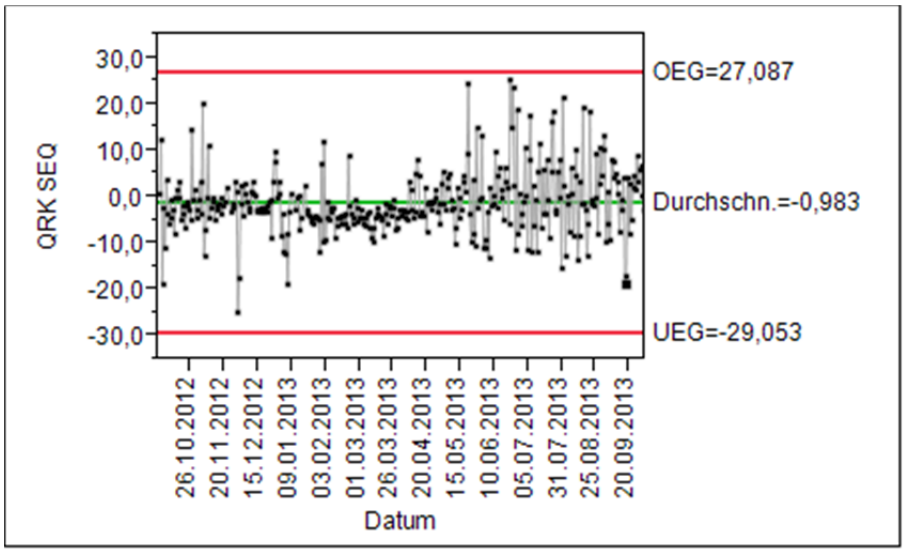


Abbildung 17: QRK SEQ 8-Sigma bereinigte Daten

Die eingesetzte Statistik blendet die Datenpaare aus, für die nur ein Messwert verfügbar ist. Deshalb muss in einem nächsten Schritt der Tagesmittelwert berechnet werden, der nur dann gültig ist, wenn beide Werte zur Verfügung stehen. Da für andere Anwendungsfälle der TMW_95 gebildet wird, der aussagt, dass 95 % der theoretisch verfügbaren Stundenmittelwerte valide vorhanden sind, soll für den Sachverhalt des Tagesmittelwerts der beiden SEQ dieser Begriff übernommen werden, obwohl es sich korrekter um den TMW_100 handelt. Unter dieser Maßgabe verbleiben 353 Datensätze aus den Referenzmessungen übrig. Für die paarweise Verfügbarkeit der SEQ errechnet sich daraus ein Wert von 96,7 %. Die entsprechende Qualitätsregelkarte sieht dann wie folgt aus:

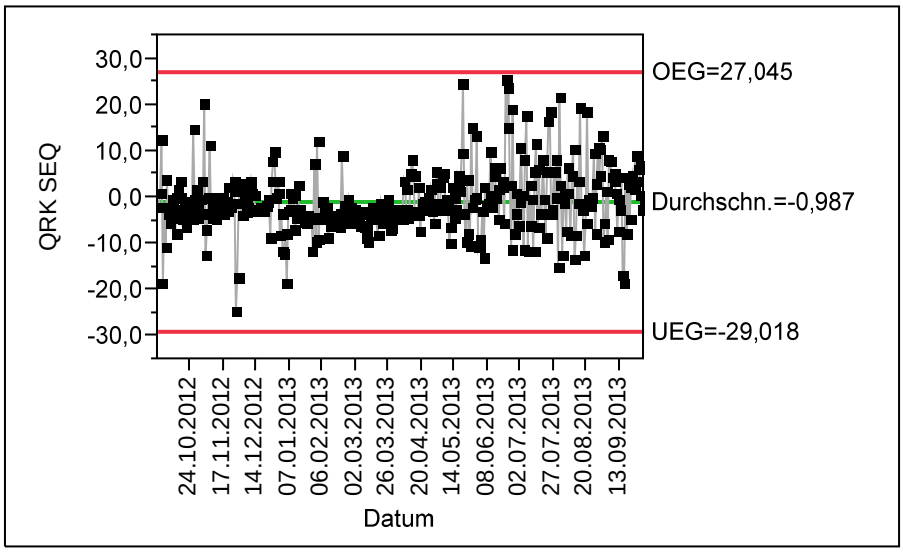
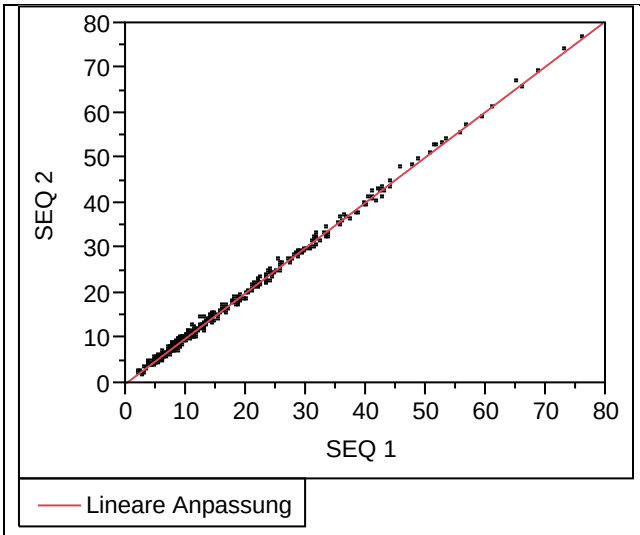


Abbildung 18: QRK SEQ für TMW_95

Ein wesentliches Kriterium für die Verwendung der Referenzwerte besteht neben den bereits genannten Selektionsverfahren für nicht plausible oder fehlende Werte in der sehr guten Korrelation der Messwerte der beiden SEQ, die über eine Regressionsanalyse zu untersuchen sind. Dabei bilden sowohl die statistische Bestimmtheit des Zusammenhangs als auch die Werte für Anstieg und Ordinatenabschnitt wichtige Annahmekriterien für die Referenzwerte. Die Ergebnisse der linearen Regression sind in der folgenden Abbildung zusammengefasst dargestellt:



Lineare Anpassung
SEQ 2 = -0,064349 + 1,0072636*SEQ 1

Übersicht der Anpassung

r^2	0,997567
r^2 korrigiert	0,99756
Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung	0,690198
Mittelwert der Zielgröße	17,77249
Beobachtungen (oder Summe Gewichte)	353

Abbildung 19. Ergebnisse der Regressionsanalyse SEQ 1/ SEQ2

Sowohl die Grafik der Regressionsgeraden als auch die Ergebnisse der Analyse belegen, dass die erreichte Qualität der Referenzmessung geeignet ist, um als Basis für die Beurteilung der Testkandidaten zu dienen. Es ist darüber hinaus auch erkennbar, dass für einen ausreichenden Konzentrationsbereich des $PM_{2.5}$ gültige Daten vorliegen.

7. Wartung im Vergleichszeitraum

Alle Geräte wurden im Vergleichszeitraum gewartet. Für die optisch messenden Einrichtungen beschränkte sich die von der BfUL durchgeführte Wartungstätigkeit auf den Vorabscheider. Die Geräte mit oszillierender Mikrowaage wurden zusätzlich zur Wartung der Vorabscheider bei Bedarf mit neuen Filtern für die Messzelle und das FDMS-Modul bestückt. Diese Maßnahmen wurden nicht synchronisiert, so dass im Anschluss an den Filterwechsel nicht synchrone Ausfallzeiten produziert wurden, die auf die Verfügbarkeit des Einzelgerätes bezogen nicht problematisch sind, auf die paarweise Verfügbarkeit aber Einfluss haben, da sich diese um die Summe der Ausfallzeiten der Einzelgeräte reduziert. Bei der Untersuchung der erzielten Verfügbarkeiten wird darauf nochmals eingegangen. Für die TEOM-Geräte besteht eine über Jahre gewachsene Kompetenz und Infrastruktur in der BfUL, so dass sie im überwachten Betrieb durch den Betreiber besser gestellt waren. Die Hersteller der anderen Systeme konnten dieses Defizit durch den Fernwartungszugriff bei Bedarf und nach Ermessen kompensieren. Die TEOM FDMS und die APS-2 lieferten über das Bayern-Hessen-Protokoll zusätzlich Status- und Fehlermeldungen. Zum Zeitpunkt der Vergleichsmessung hat das System TEOM 1405 das Protokoll nicht unterstützt. Die nötigen Informationen mussten stattdessen über ein airQlog per UMTS abgerufen werden.

8. Aufbereitung der Daten

Grundsätzlich wurden alle gewonnenen Daten aufbereitet, um unplausible Werte zu eliminieren, Ausreißer zu identifizieren und zu selektieren und so eine für alle Teilnehmer gleiche Datenqualität im Sinne der Statistik zu gewährleisten. Unter Punkt 6 wurde für die Referenzsysteme bereits das Vorgehen geschildert, das in gleicher Weise auf die Kandidatenwerte angewandt wurde. Für die oszillierenden Mikrowaagen war darüber hinaus ein vorgeschalteter Arbeitsgang erforderlich, in dem Werte mit einer Abweichung des QRK-Wertes von 1000 und negative Messwerte entfernt wurden. Dies ist für das TEOM erforderlich, da es nach einem Filterwechsel und ggf. auch nach Arbeiten am Vorabscheider, wenn diese mit stärkeren Erschütterungen verbunden sind, zu einem über ein bis drei Stunden anhaltenden, nicht validen Messwertaufkommen führt. Das nachfolgend geschilderte Ablaufschema wurde benutzt:

- Entfernung negativer Messwerte
- Entfernung von Messwerten mit QRK-Wert > 1000 (QRK-Wert = $\frac{Sytem\ 2-System\ 1}{System\ 1} x100$)
- Entfernung der Messwerte, die in der QRK außerhalb des 8-Sigma-Korridors liegen
- Bildung der Tagesmittelwerte (TMW)
- Bildung der Tagesmittelwerte mit einer Mindestverfügbarkeit von 95 % (TMW_95), (23 gültige SMW)
- Prüfung der Daten des Testkandidaten gegen den Mittelwert der Referenz nach dem 8-Sigma-QRK-Verfahren (QRK-Wert = $\frac{Kandidat-MW_Referenz}{MW_Referenz} x100$)

In der nachfolgenden Tabelle sind die aufgrund der Aufbereitungsprozedur eintretenden Reduktionen des Datenbestands zusammenfassen dargestellt:

Tabelle 6: Datenreduktion infolge Aufbereitung

Gerät	SEQ	TEOM FDMS	TEOM 1405	APS-2
Datensätze	363 TMW	8784 SMW	16870 HMW	4572 SMW
Unplausibel	0 TMW	65 SMW	476 HMW	0 SMW
8-Σ-Ausreißer	4 TMW	80 SMW	54 HMW	20 SMW
TMW	362	362	362	191
TMW_95	353	321	270	178

8.1. Paarweise Prüfung

Die paarweise Prüfung ist ein Erfordernis der Äquivalenzprüfung, die einen gültigen Messwert beider teilnehmender Systeme und beider Referenzgeräte benötigt. Diese Anforderung geht über die aus der 39. BImSchV ableitbaren Annahmekriterien hinaus, die für den normalen Messnetzbetrieb gelten. Bei einer Verfügbarkeit von 90 % errechnet sich die paarweise Verfügbarkeit aus zwei Systemen, die diesen Wert erfüllen, zu 81 %, da sich die Ausfallwahrscheinlichkeit aus dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten ergibt. Im Sinne der durchgeführten Vergleichsmessung dient die paarweise Prüfung der Generierung eines ausgewogenen, repräsentativen Datenkollektivs, das für die Ermittlung der Äquivalenz die besten Voraussetzungen liefert.

8.1.1. Technische Plausibilität

Alle Daten werden auf ihre technische Plausibilität geprüft. Dies erfolgt für die im Messnetzbetrieb befindlichen TEOM FDMS automatisch im Immissionsdatenerfassungsprogramm (ADVis) als erste Stufe der Validierung. Diese Stufe ist für die anderen Systeme manuell vorzunehmen. In einer zweiten Stufe der Plausibilitätsprüfung werden die Messwerte der beiden parallelen Systeme verglichen und auf Auffälligkeiten hin untersucht. Während laufender Wartungen können die Geräte auf Wartung gesetzt werden, so dass unplausible Messwerte nicht mehr als unvermeidlich entstehen.

8.1.2. Qualitätsregelkarten

Die Qualitätsregelkarten sind ein guter Ausdruck für die zufällige Schwankung der Messwerte eines Gerätesystems. Zum Zeitpunkt der Prüfung erfolgt eine Beurteilung lediglich zwischen gleichen Kandidaten. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für alle teilnehmenden Kandidaten:

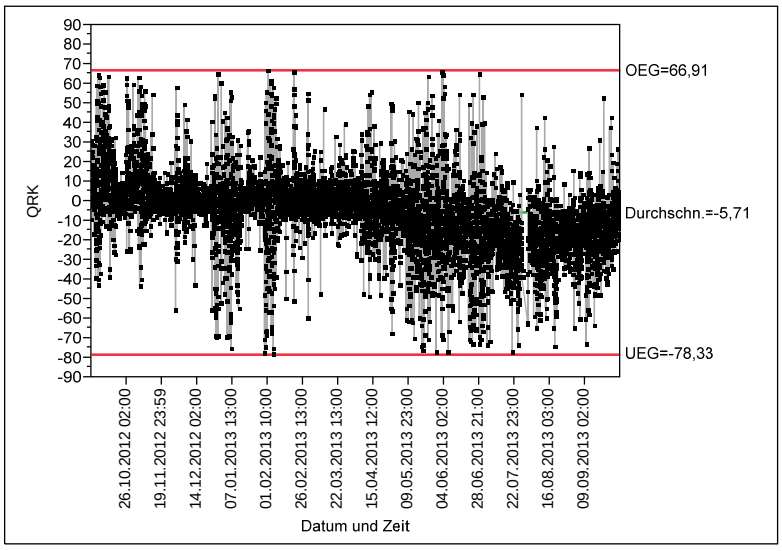


Abbildung 20: QRK für TEOM FDMS 8-Sigma-bereinigt (SMW)

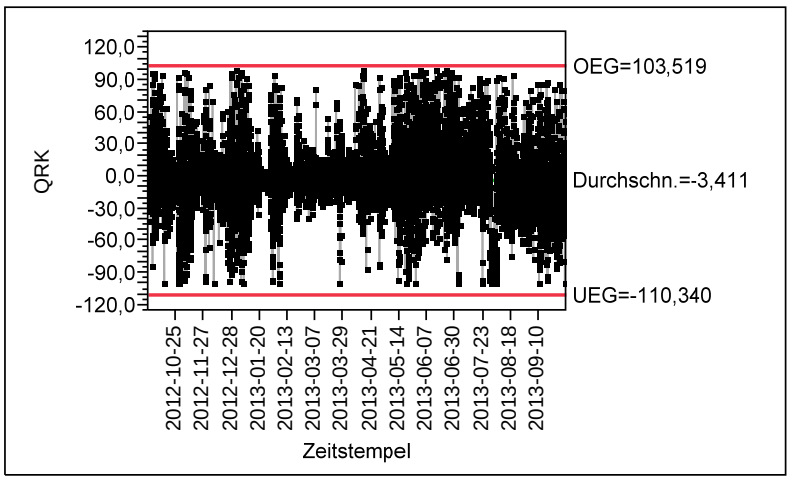


Abbildung 21: QRK für TEOM 1405 8-SIgma-bereinigt (HMW)

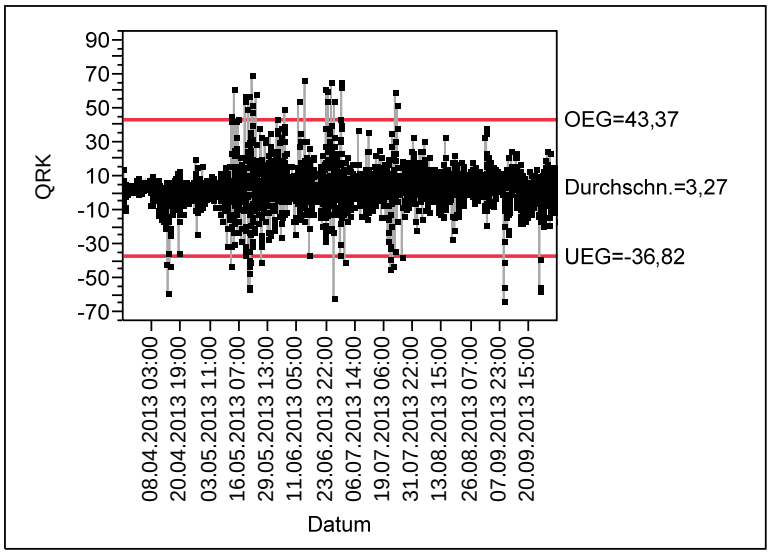


Abbildung 22: QRK für APS-2 8-Sigma-bereinigt (SMW)

8.2. Einzelprüfung

Die Daten, die in die Einzelprüfung eingehen, sind durch die im Punkt 8.1 genannten Stationen gelaufen. Aus ihnen wird jedoch vor der eigentlichen Äquivalenzanalyse kein Systemmittelwert im Sinne von TMW_95 = (TMW_95 Gerät 1 + TMW_95 Geräte 2) / 2 gemacht, sondern der Vergleich des TMW_95 des jeweiligen Gerätes mit dem TMW_95 des Referenzmittelwerts durchgeführt.

Für eine Einzelprüfung ist die Verwendung des Excel Sheets zur Bestimmung der Äquivalenz nach dem EU Guide nicht korrekt möglich. Für die Prüfung wird daher die lineare Regression eingesetzt. Je Kandidat liegen in der Einzelprüfung jeweils mehr Datensätze vor als für die paarweise Prüfung, da die gleichzeitige Gültigkeit von zwei Messwerten je Mittelungszeit entfällt.

8.3. Bildung der Tagesmittelwerte TMW und TMW_95

Die Daten aus der zuvor beschriebenen Aufbereitung werden zu Tagesmittelwerten aggregiert. Dazu werden die jeweilig niedrigeren Aggregationsstufen der HMW und SMW je Gerät benutzt und aus ihnen das arithmetische Mittel über 24 Stunden gebildet. Dabei wird die Anzahl der zur Berechnung eingesetzten Halbstunden- bzw. Stundenmittelwerte aufgezeichnet und für die Ermittlung der TMW_95 benutzt. Diese wird mit denjenigen Tagesmittelwerten ausgeführt, die mindestens 95 % der für einen Tag möglichen HMW bzw. SMW beinhalten. Damit müssen für eine Berechnung aus HMW mindestens 46 und aus SMW mindestens 23 Mittelwerte vorliegen.

8.4. Zusammenführung der Referenz- und Kandidatenwerte

Die Zusammenführung der Referenz- und Kandidatenwerte in Form der TMW_95 stellt eine Synchronisierung der Messreihen dar. Diese ist mit einem weiteren Verlust an Datensätzen verbunden, da

nicht für jeden Kalendertag der Vergleichsmessung sowohl ein TMW_95 des Kandidaten als auch ein TMW_95 des Referenzsystems vorliegt. Für eine paarweise Analyse sind jeweils sogar je zwei gültige TMW_95 der Kandidaten und zwei TMW des Referenzsystems nötig.

8.5. Regressionsanalysen

Die Regressionsanalysen zur Ermittlung der Eigenschaften eines einzelnen Kandidaten werden mit Hilfe des Statistikprogramms Jump 11 durchgeführt. Die Analyse liefert die Regressionsfunktion mit Anstieg und Ordinatenschnittpunkt, das Bestimmtheitsmaß und einen Term zur Beurteilung der mittleren Abweichung eines berechneten Wertes in Form der Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung. Die Regression wird ohne jede Form von Datentransformation durchgeführt.

Für die paarweise Prüfung werden für die Referenz und den Kandidaten zwei TMW_95 Zeitreihen eingesetzt, die von zwei parallel betriebenen Geräten erzeugt wurden. Die Werte werden in die Excel-Formblätter zur Ermittlung der Äquivalenz eingegeben. Die zur Berechnung nötigen Angaben für Messunsicherheit, Grenzwert und Unsicherheit zwischen den Mess- bzw. Probenahmegeräten werden wie folgt benutzt:

Limit Value:	20 µg/m^3 (Verpflichtungswert 2015) ;
	25 µg/m^3 (Grenzwert 01.01.2015)
Method:	SEQ / Kandidat
Expanded Uncertainty Criteria:	25 %
RM Between Sampler Uncertainty:	0,69

9. Ergebnisse

9.1. Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeitsprüfung während der Vergleichsmessung hat folgende, in der Tabelle zusammenfasste Ergebnisse geliefert. Die angegebenen Zahlen beziehen sich auf die ermittelten TMW_95 des jeweiligen Testkandidaten.

Tabelle 7: Erreichte Verfügbarkeiten

Gerät	SEQ	TEOM FDMS	TEOM 1405	APS-2
Gerät 1	**97,8 %**	**92,3 %**	**94,5 %**	**97,4 %**
Gerät 2	**98,1 %**	**95,3 %**	**92,3 %**	**97,4 %**

Die Anforderung an die Verfügbarkeit für Staubmessgeräte liegt bei 90 %.

9.2. Äquivalenz

Die zusammengefassten Ergebnisse der Äquivalenzprüfung sollen den konkreten Einzeldaten vorangestellt werden, damit auf diese Weise der Focus bei der Sichtung der Informationen geschärft ist. Die systemrelevanten Einzelinformationen enthalten dann nachfolgend die Ergebnisse bezüglich des von uns so genannten Gleichlaufs der Geräte, also der Abweichung der Testkandidaten untereinander und den Vergleich der Einzelgeräte gegen den Mittelwert der Referenzen, um auf diese Weise auch noch ein unterschiedliches Verhalten der Kandidaten zu erkennen. Die Tabelle 8: Zusammenfassung der Äquivalenzergebnisse stellt die Daten aus der Äquivalenzanalyse mit dem Rechenblatt zur Bestimmung der Äquivalenz der teilnehmenden Kandidaten dar. Als Randbedingungen bei der Eingabe der Daten wurde der Grenzwert auf 20 µg/m^3 (Verpflichtungswert ab 2015) und die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung zwischen den Sammlern auf 0,7 gesetzt (aus den Daten der Vergleichsmessung ermittelt). Die Messunsicherheiten verringern sich etwas, wenn der gesetzliche Grenzwert für $PM_{2,5}$ von 25 µg/m^3 verwendet wird. Die Angabe dafür ist in Klammern gesetzt.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Äquivalenzergebnisse

Gerät	Anstieg	Ordinatenabschnitt	Bestimmtheit	Erweiterte Messunsicherheit am Grenzwert
TEOM FDMS 1	0,841	1,999	0,972	
TEOM FDMS 2	0,883	0,691	0,984	
TEOM FDMS	0,86	1,38	0,981	**20,34 % (20,24 %)**
TEOM 1405 1	0,932	2,277	0,98	
TEOM 1405 2	0,912	2,139	0,98	
TEOM 1405	0,93	2,22	0,98	**18,66 % (14,06)**
APS-2 1	0,903	1,372	0,95	
APS-2 2	0,922	1,515	0,95	
APS	0,93	1,24	0,95	**16,3 % (13,6 %)**

Mit Bezug auf die erweitere Messunsicherheit kann festgestellt werden, dass sowohl die TEOM FDMS als auch die TEOM 1405 die Vorgabe von 25 % erfüllen. Für das System APS-2 trifft diese ebenfalls zu. Als Einschränkung ist für diese Geräte zu berücksichtigen, dass sie die Herbst- und Winterperiode des Vergleichszyklus nicht mit bestritten und damit eine Voraussetzung für die Ermittlung valider Resultate nicht erfüllt haben. Systeme, die die erweiterte Messunsicherheit erfüllen, weisen einen signifikanten Versatz gegenüber der Referenz auf. Er beträgt bezogen auf den arithmetischen Mittelwert der $PM_{2.5}$-Konzentration (SEQ) von 17,7 µg/m^3 für die TEOM FDMS - 6,2 % und für die TEOM 1405 + 5,5 %. Die APS - 2 zeigen keinen Versatz (0 %). Der Ordinatenschnittpunkt (FDMS = 1,38, TEOM 1405 = 2,22, APS-2 = 1,24) ist als Kriterium bezüglich der Abweichung besonders kleiner und besonders großer Messwerte gegen die Referenz zu sehen.

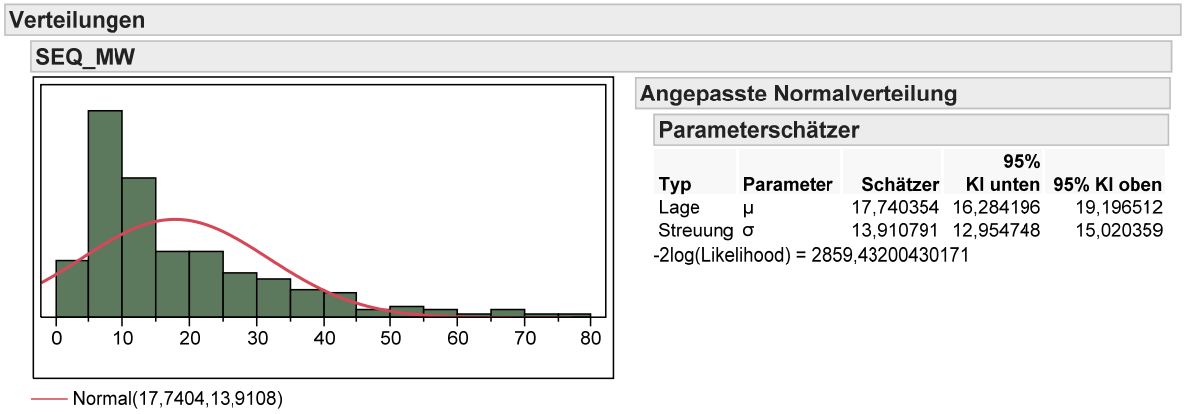


Abbildung 23: Histogramm der $PM_{2.5}$-Werte (SEQ)

Aus dem Histogramm in Abbildung 23: Histogramm der $PM_{2.5}$-Werte (SEQ) ist zu entnehmen, dass es im Vergleichszeitraum eine zum Nullpunkt schiefverteilte Anordnung der Messwerte gibt, die bei Betrachtung als Normalverteilung einen arithmetischen Mittelwert von 17,7 µg/m^3 und einen Median von 12,7 µg/m^3 aufweist. Bei gegen eine Verteilungsrichtung begrenzten Daten liefert eine logarithmierte Normalverteilungsfunktion häufig ein symmetrisches Ergebnis. Dieses ergibt einen Mittelwert für den natürlichen Logarithmus der Partikelkonzentration von 2,59, was einem Konzentrationswert von 13,3 µg/m^3 entspricht. Die Abbildung 24: Logarithmische Normalverteilung der $PM_{2.5}$-Werte zeigt den Verlauf der logarithmischen Verteilungsfunktion:

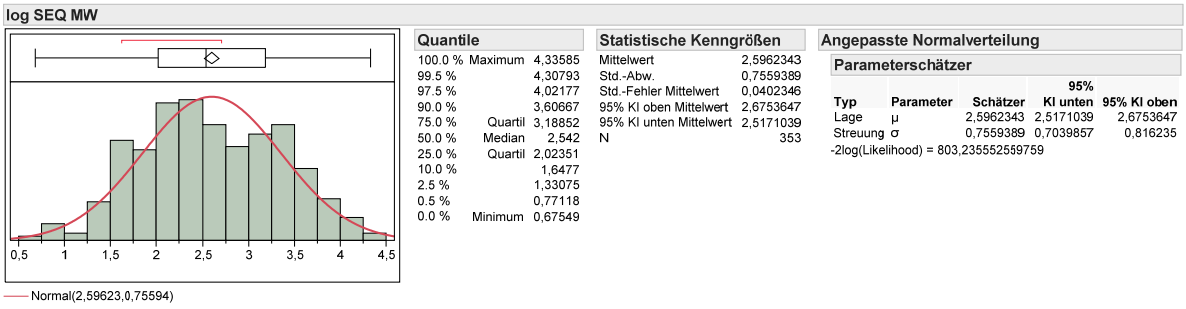


Abbildung 24: Logarithmische Normalverteilung der $PM_{2.5}$- Werte

Das Erscheinungsbild des nicht logarithmierten Histogramms [Abbildung 23: Histogramm der $PM_{2.5}$-Werte (SEQ)] verdeutlicht, dass Werte unterhalb des Mittelwerts von 17,7 µg/m^3 deutlich häufiger vorkommen als darüber. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass von Null signifikant differierende Ordinatenschnittpunkte der Regressionsfunktion durch Abweichungen bei kleinen Konzentrationen

hervorgerufen werden, höher als für den Fall, dass dies bei größeren Konzentrationen erfolgt. Wie die Ergebnisse für die beiden Referenzgeräte zeigen (Abbildung 19. Ergebnisse der Regressionsanalyse SEQ 1/ SEQ2) ist eine Ursache in verrauschten Werten der Referenz nicht gesetzt, da der Ordinatenschnittpunkt dort bei -0,06 liegt und damit eine reduzierte Ansprechempfindlichkeit nicht besteht. Ordnet man den Response der Geräte bei Messwerten unter 11 µg/m^3 nach dem Ordinatenschnittpunkt, so ist die Ansprechempfindlichkeit in folgender Rangfolge festzustellen: SEQ > APS > TEOM FDMS > TEOM 1405.

Das Bestimmtheitsmaß der ermittelten Regressionsfunktion ist für alle Systeme hoch signifikant. Die Mikrowaagen schneiden dabei mit allen Vertretern und einem Durchschnitt von 0,98 klar besser ab als das optische System, das im Mittel 0,95 erreicht.

Die Visualisierung der berechneten Regressionsfunktionen zeigt auch grafisch deutlich die Eigenschaften der Systeme wie sie zuvor beschrieben wurden. Daher sollen die entsprechenden Grafen nachfolgend dargestellt werden:

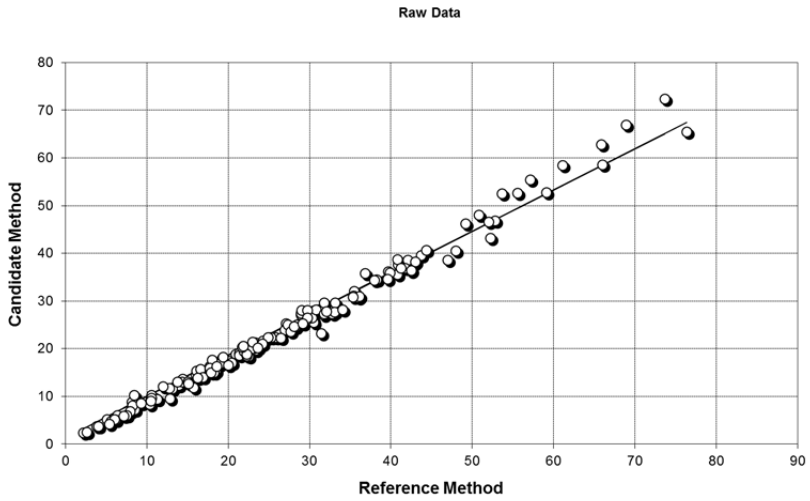


Abbildung 25: Regressionsfunktion SEQ / TEOM FDMS (TEOM FDMS = 0,86xSEQ +1,38)

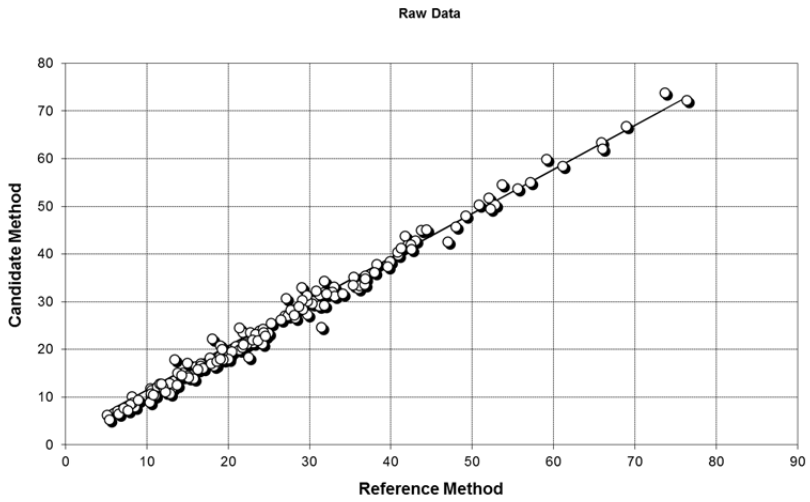


Abbildung 26: Regressionsfunktion SEQ / TEOM 1405 (TEOM 1405 = 0,93xSEQ + 2,22)

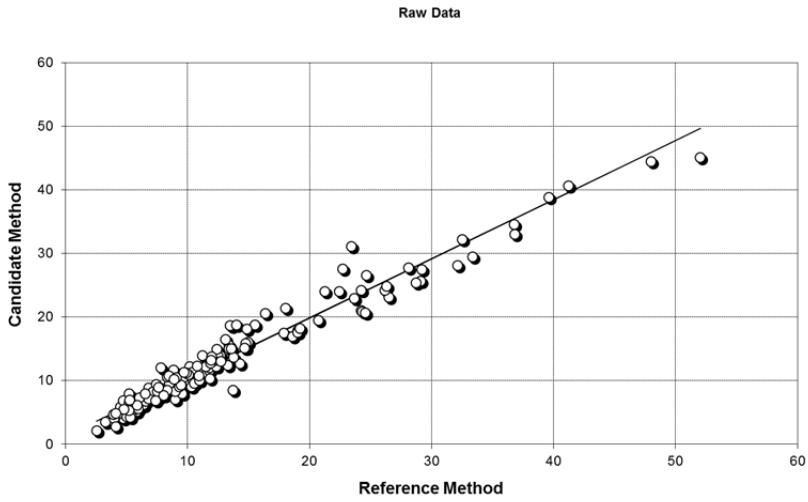


Abbildung 27: Regressionsfunktion SEQ / APS – 2 (APS2 = 0,93xSEQ + 1,24)

Die Analyse mittels Regressionsfunktion weist Vorteile auf, wenn es um die Beurteilung eines Datenpakets geht. Sie hat aber den Nachteil, zeitliche Verläufe nur akkumulierend zu berücksichtigen und z.B. Abhängigkeiten von der Jahreszeit nicht sichtbar zu machen. Aus diesem Grund sollen nachfolgend für die Systeme Qualitätsregelkarten gezeigt werden, die das sehr gut dokumentieren können. Auf der Abszisse sind die Kalendertage der Vergleichsmessung, auf der Ordinate die Differenz zwischen dem Mittelwert der Kandidaten eines Gerätetyps und dem Mittelwert der eingesetzten SEQ, angegeben in Prozent, aufgetragen. Die eingezeichneten Grenzen stellen den Korridor der sechsfachen Standardabweichung dar. Die Größe des Korridors ist ein sehr gutes Maß für die zufällige Schwankung der Daten, der eingetragene Mittelwert über den Beurteilungszeitraum ein Mittel zur Bewertung des Versatzes gegen die Referenz.

Im Sinne des EU-Guide zur Bestimmung der Äquivalenz sollte der vorgegebene Wert von 25 % erweiterte Messunsicherheit dann erreicht werden, wenn der 6-Sigma-Korridor kleiner oder gleich 25 % ist. Für die gezeigten Karten werden die TMW_95 benutzt, die alle Stufen der Datenbereinigung absolviert haben.

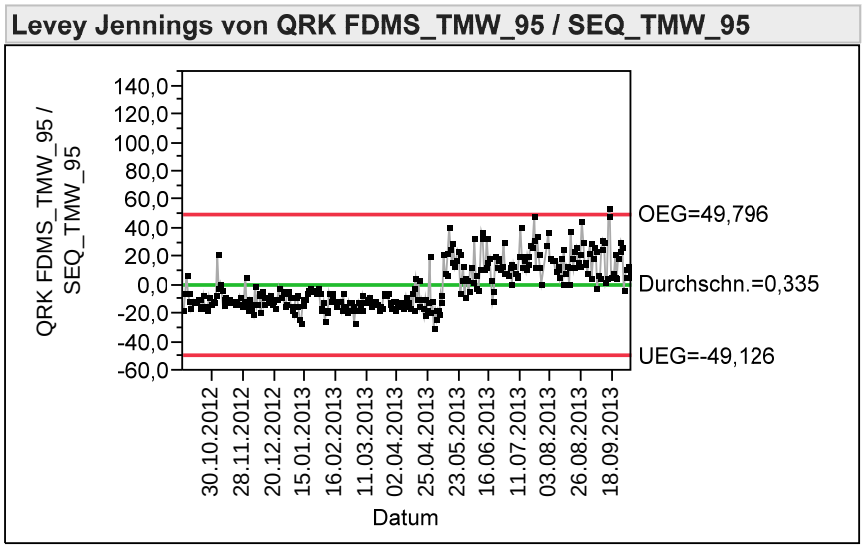


Abbildung 28: Qualitätsregelkarte TEOM FDMS / SEQ

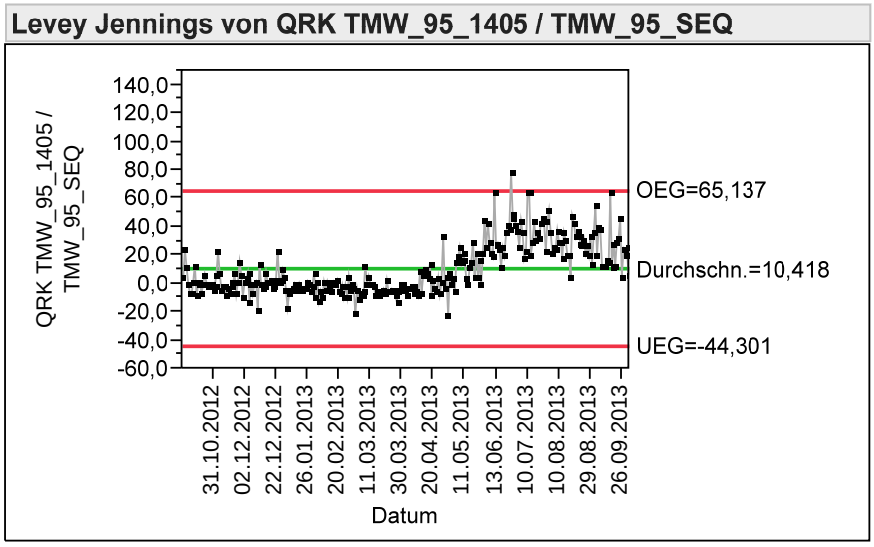


Abbildung 29: Qualitätsregelkarte TEOM 1405 / SEQ

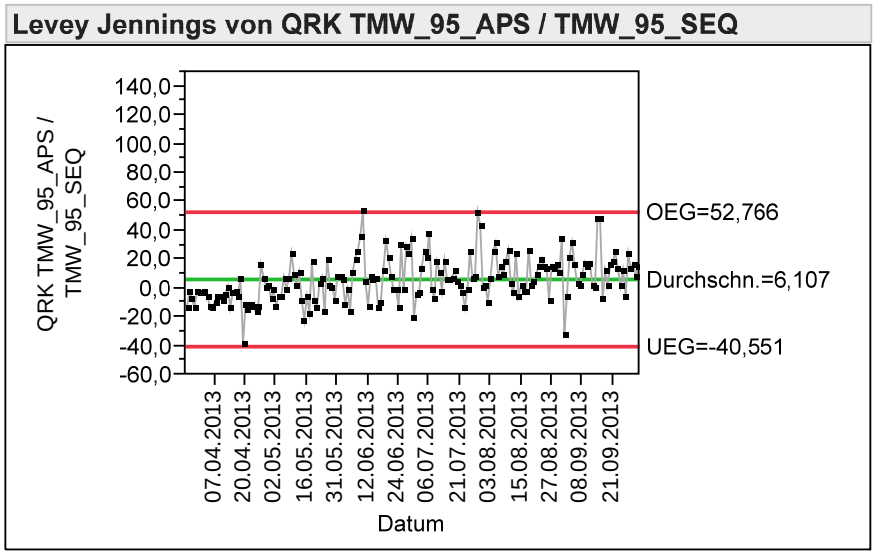


Abbildung 30: Qualitätsregelkarte APS2 / SEQ

Der Vergleich der dargestellten Qualitätsregelkarten liefert eine Reihe zusätzlicher Informationen, die nachfolgend zusammengefasst für die Kandidaten in Tabelle 9: Zusammenfassung der QRK-Ergebnisse gegenübergestellt werden sollen:

Tabelle 9: Zusammenfassung der QRK-Ergebnisse

Gerätesystem	Versatz	Größe Korridor 6 Σ	Jahreszeiteinfluss
TEOM FDMS	0,34 %	98,9 %	vorhanden
TEOM 1405	10,42 %	109,4 %	vorhanden
APS -2	6,1 %	93,3 %	nicht bewertet

Es ist festzustellen, dass von allen getesteten Systemen das TEOM FDMS den geringsten Versatz und, zumindest für die vollständige Vergleichsperiode, den kleinsten Korridor aufweist. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass es im sächsischen Messnetz seit einigen Jahren eine dynamische Feuchtekorrek-

tur gibt, die auf die Rohdaten des TEOM FDMS angewandt wird und damit den jahreszeitlich schwankenden Respons der FDMS-Messung zur gravimetrischen Messung anpasst. Diese Vorgehensweise ist für das TEOM 1405 noch nicht untersucht. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass sie für das Gerät in gleicher Weise und vermutlich gleicher Wirkung benutzt werden kann. Im Moment führt das Fehlen der Korrektur zu einem Versatz von 10,4 %.

Die Daten für die Derenda-Geräte sind der Vollständigkeit halber genannt. Ihnen fehlt zur Bewertung die Zeit mit geringer Absolutfeuchte von Oktober 2012 bis März 2013.

Diese Form der Auswertung zeigt deutlich, dass sich die über die Regression zeitlich gemittelten Äquivalenzwerte über die Qualitätsregelkarten in anderer Form darstellen. Sie belegen, dass Systeme, die den Äquivalenztest bestanden und eine erweiterte Messunsicherheit von 25 % einhalten, in verschiedenen Zeitabschnitten des Jahres weitaus größere Abweichungen gegen die Referenz besitzen. Es stehen sich damit erweiterte Messunsicherheiten und Mehr- bzw. Minderbefunde in unterschiedlicher Ausprägung gegenüber. Diese Gegenüberstellung kann anhand der nachfolgenden Tabelle 10: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus QRK und Regression vollzogen werden:

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus QRK und Regression

Gerätesystem	**Mehrbefund**		**Erweiterte Messunsicherheit**	
	per Versatz QRK	per Regression	per 6 Σ QRK	per Regression
TEOM FDMS	+ 0,34 %	-7,1 % (bei 20 µg/m^3)	98,9 %	20,34 %
TEOM 1405	+ 10,42 %	+ 4,1 % (bei 20 µg/m^3)	109,4 %	18,66 %
APS -2	+ 6,1 %	-0,8 % (bei 20 µg/m^3)	93,3 %	16,3 %

Führt man unter Berücksichtigung sowohl der Äquivalenzprüfung als auch der Qualitätsregelkarten eine Bewertung der Systeme durch, so findet man im TEOM FDMS den derzeit sichersten Kandidaten zur Messung von $PM_{2.5}$. Dem folgt das TEOM 1405, das derzeit ohne dynamische Feuchtekorrektur über das Jahr größere Abweichungen sowohl durch den Versatz als auch die 6 Σ-Unsicherheit verursacht.

Im Gegensatz zu den PM_{10} –Messungen, die die Überwachung anhand eines Grenzwerts ermöglichen, der sich auf den Tagesmittelwert bezieht, wird die Einhaltung der $PM_{2.5}$-Konzentration nach derzeitigem Stand anhand des Jahresmittelwerts geprüft. Insofern fallen die dargestellten Eigenschaften jahreszeitlicher Abhängigkeit von Versatz und Messunsicherheit zumindest mit Bezug zu Überschreitungstagen und episodenhaften Ereignissen weniger ins Gewicht. Allerdings wird die Bevölkerung sicher auch für $PM_{2.5}$ unterrichtet werden müssen, wie die Entwicklung innerhalb einer Periode mit erhöhten Staubwerten ist.

9.2.1 Vergleich der Kandidaten untereinander

Es war eine Ausgangsvoraussetzung, dass die Kandidaten untereinander ein Mindestmaß an Gleichlauf aufwiesen. Diese nicht spezifisch formulierte Anforderung wurde anhand von Qualitätsregelkarten geprüft. Alle Testkandidaten wiesen diesen Gleichlauf auf (Abweichung weniger als 10 Prozent untereinander) und konnten sich so für die eigentliche Vergleichsmessung qualifizieren.

Nachfolgend sollen die bereinigten Tagesmittelwerte (TMW_95) der Testkandidaten in Bezug auf den Gleichlauf über den gesamten Vergleichszeitraum charakterisiert werden. Dazu werden die Ergebnisse der linearen Regression für die jeweiligen Gerätepaare in der nachfolgenden Tabelle 11: Daten des paarweisen Gerätevergleichs zusammengefasst dargestellt. Der relative Fehler errechnet sich aus der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung und dem Mittelwert der Zielgröße.

Tabelle 11: Daten des paarweisen Gerätevergleichs

Gerätepaar	Anstieg	Ordinaten-abschnitt	Bestimmtheit	Wurzel mittlere quadratische. Abweichung	rel. Fehler
TEOM FDMS	1,039	-1,33	0,99	1,260	7,6 %
TEOM 1405	0,98	-0,196	0,99	1,010	4,9 %
APS	1,022	0,111	0,99	0,284	2,2 %
SEQ	1,007	-0,006	0,99	0,690	3,9 %

Es ist zu erkennen, dass das Budget für die Messunsicherheit gegen die Referenz von den Kandidaten durch Abweichungen innerhalb eines Gerätesystems bereits angegriffen wird. Dies trifft besonders für die TEOM FDMS zu. Unter den eingeschränkten Testbedingungen für die Derenda – Geräte liegt das APS sogar unter dem relativen Fehler der SEQ-Referenz.

Weiterhin ist auch interessant, wie sich die Äquivalenz eines Gerätes zum Mittelwert der Referenz darstellt. Dies zeigt aufgrund der relativen Fehler untereinander das Potential der Geräte sowohl in positiver wie negativer Richtung auf. Die entsprechenden Auswertungen wurden mit linearer Regression durchgeführt und können wie folgt in Tabelle 12: Äquivalenzprüfung von Einzelgeräten zusammengefasst werden. Datengrundlage sind die TMW_95 der Kandidaten, die TMW_95 Mittelwerte der SEQ und die Mittelwerte der Zielgrößen (für den relativen Fehler)

Tabelle 12: Äquivalenzprüfung von Einzelgeräten

Gerätepaar	Anstieg	Ordinaten-abschnitt	Bestimmt-heit	Wurzel mittlere quadratische. Abweichung	rel. Fehler
TEOM FDMS 1	0,841	1,999	0,972	1,963	11,6 %
TEOM FDMS 2	0,883	0,691	0,984	1,540	9,4 %
TEOM 1405 1	0,932	2,777	0,979	1,916	9,9 %
TEOM 1405 2	0,912	2,139	0,978	1,940	10,3 %
APS – 2 1	0,903	1,372	0,955	1,709	13,8 %
APS – 2 2	0,922	1,515	0,951	1,815	14,2 %

Der relative Fehler kann als Annäherungsverfahren durch Multiplikation mit 2 als Indikator für eine zu erwartende erweiterte Messunsicherheit benutzt werden. Es handelt sich dabei um eine Approximation, die fehlerbehaftet, aber zur Beurteilung eingeschränkt verwendbar ist. Danach würden die Einzelgeräte der TEOM FDMS und TEOM 1405 unter 25 % erweiterter Messunsicherheit liegen. Bei den APS-2 macht sich die geringe Datenmenge bemerkbar, die sich durch diese Betrachtungsweise soweit reduziert, dass eine Statistik zu keinem sinnvollen Ergebnis führt.

10. Zusammenfassung

Die über 12 Monate durchgeführte Vergleichsmessung von automatischen Staubmessgeräten gegen die Referenzgeräte vom Typ Kleinfilter SEQ hat gezeigt, dass es Systeme gibt, die die entsprechenden Anforderungen zur Verfügbarkeit und zur Äquivalenz erfüllen. Dies trifft auf die Geräte vom Typ TEOM FDMS und TEOM 1405 uneingeschränkt zu. Für das optische System vom Typ APS-2 kann eine verbindliche Aussage nicht getroffen werden. Die für den Zeitraum April bis Oktober vorliegenden Werte zeigen einen guten Gleichlauf der Geräte und erfüllen die Äquivalenzanforderungen in dieser Periode sicher.

Aus allen Auswertungen mit zeitlichem Bezug ist erkennbar, dass insbesondere die vollständige Abbildung aller Jahreszeiten und die mit diesen einhergehenden Schwankungen der Absolutfeuchte einen großen Einfluss auf Messunsicherheit, den Versatz und die Äquivalenz der Geräte haben. Dies hat zur Konsequenz, dass bei Einhaltung der Äquivalenzvorgaben im Jahresmittel Zeitfenster auftreten, in denen das automatische System weiter als ± 12,5 % von der Referenz abweichen kann.

Alle Instrumente zur Qualitätssicherung bei der Erfassung und Quantifizierung von Feinstaub, die in den letzten Jahren im Luftmessnetz erarbeitet wurden, haben sich als zielführend für einen positiven Verlauf der Äquivalenzprüfung herausgestellt. Das betrifft sowohl die Datenqualität der Referenzmessungen mit den SEQ-Kleinfiltergeräten als auch die zur Datenvalidierung eingesetzten Prüfverfahren.

Eine möglicherweise eintretende Anforderung, im Messnetz eine automatische Überwachung der $PM_{2.5}$ – Konzentrationen durchzuführen, ist durch die Vergleichsmessung als erfüllbar validiert. Die Realisierung im Bedarfsfall ist möglich.