

Test von Staubsensoren auf Einsetzbarkeit für Umgebungsluftmessungen

Bericht Immissionsmessung

Feinstaubmessung PM₁₀, Vergleichsmessung

Geschäftszeichen

GZ 503-Imm-2018-06/13

Datum

22. November 2019

bearbeitet von

Binder Gerald, Ing.

Tel / DW

0732 / 7070 / 3925

elektronisch erreichbar

gerald.binder@mag.linz.at

Auftraggeber / Beschwerde:	StR Schobesberger
Auftrag - Datum:	23. November 2017
Auftrag - Geschäftszeichen / Akt:	-
Aufgabenstellung:	Test von Staubsensoren auf Einsetzbarkeit für Umgebungsluftmessungen
Messtechnik:	Panhofer Harald, Pfarrhofer Natalie
Leitung und fachliche Verantwortung:	Binder Gerald

Auszugsweises Drucken oder Vervielfältigen des Berichtes darf nur mit Quellenangabe erfolgen.

1. Aufgabenstellung - Messziele

Die Entwicklung von Feinstaubsensoren (miniaturisierte Feinstaubmessungen) wird in letzter Zeit vorangetrieben. So gibt es weltweit einige Forschungsinstitute die sich mit der Entwicklung von Sensoren für Umweltmesstechnik, im Speziellen mit der Feinstaubmesstechnik, befassen. Diverse Sensoren sind derzeit auch kommerziell erhältlich.

Diese Entwicklung ist sehr zu begrüßen, da einfache und billige Sensoren z.B. eine flächendeckende Messung in einem Überwachungsgebiet überhaupt möglich machen und dadurch ein gutes Bild über die tatsächliche Umweltsituation gegeben werden könnte (Zahlen, Daten, Fakten).

An die Genauigkeit der Messergebnisse von Sensordaten darf allerdings kein zu hoher Anspruch gestellt werden. Sensoren können und werden nicht die gleiche Qualität wie Präzisionsmessgeräte für die amtliche Luftqualitätsüberwachung liefern können. Eine genaue Grenzwertüberwachung wird mit Sensoren nicht möglich sein. Allerdings könnten Trends und Hotspots mit Sensoren bei flächendeckenden Messungen aufgespürt werden (z.B. Vorerhebungen für den Einsatz von Präzisionsmessgeräten). Vergleichstests wurden schon durchgeführt und publiziert, so etwa in Stuttgart [1] und in Graz [2].

Mit dem Praxistest von Feinstaubsensoren sollte festgestellt werden:

- In welcher technischen Konfiguration die Sensoren einsetzbar sind (Netzbetrieb, Akkubetrieb, Solarbetrieb usw.)
- Welche Datenqualität und ob die Datenqualität für orientierende Messungen erreicht werden kann
- ob qualitative- und relative Aussagen möglich sind
- ist eine „Kalibrierung“ von Sensoren durch Ermittlung eines Korrekturfaktors möglich

Dafür wurden kommerziell erhältliche Sensoren in verschiedener technischer Konfiguration verbaut und auf Einsetzbarkeit getestet.

Bei der Linzer Immissionsmessstation Römerberg wurden zwei Sensoren installiert und Auswertungen der Datenkollektive (zwölf Monate) durchgeführt. Ebenfalls zwei Sensoren im Bereich des Neuen Rathauses der Stadt Linz. Die gesamte Testdauer sollte ein Jahr betragen.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse dargestellt.

2. Messkomponenten, Parameter:

2.1. Eingesetzte Messmittel und deren techn. Spezifikationen:

2.1.1. Feinstaubsensoren

Staubsensoren:	Nova PM-Sensor, Type SDS011, Sammelrate: 5 min
Für den Akkubetrieb (netzunabhängig):	RAV Power, Mod. RP-PB19, 16750mAh/61,9Wh
Für den zusätzlichen Solarbetrieb:	Villageboom Solar Modul, Mod. VB-010, 10 W
WLAN-Router (netzunabhängiger Betrieb):	Huawei Mobile WiFi, Mod. E5330Bs-2

2.1.2. Referenzmessung für Feinstaub (eignungsgeprüft)

Feinstaubmessung, kontinuierlich	Grimm Feinstaubmessgerät, siehe www.ooe.gv.at
----------------------------------	--

2.1.3. Messort für den Test der Feinstaubsensoren

Messort, Bezeichnung	Messstation S431 Linz-Römerberg, siehe www.ooe.gv.at Neues Rathaus der Stadt Linz, 5. Obergeschoss.
----------------------	---

2.2. Schadstoffe:

- Feinstaub, Fraktion PM₁₀ (<10µm)

3. Immissionsgrenzwerte und immissionsbegrenzende Anforderungen:

3.1. Schadstoffe, Grenz-, Richt- und Zielwerte, Alarmschwellen

Schadstoff	Schutzgut	Kategorie	Wert	Überschreitungen maximal	Mittlung Zeitraum	Bezug Zeitraum	Grundlage	
Feinstaub Partikel PM ₁₀	Mensch	Grenzwert	-		0,5 h			
			50 µg/m ³	35 (25) pro Jahr	24 h	Kalenderjahr	IG-L ¹⁾ und EU-LQR ²⁾	
			40 µg/m ³	-	1 Jahr			
		Alarmschwelle	-					
		Richtwert	-					
		Zielwert	Minimierungsgebot					
		Referenzwerte	Luftqualitätsmerkmale der Hintergrundmessstation					

3.2. Luftqualitätsmerkmale, Anforderung an Datenqualität, Verfügbarkeit der Messdaten und Messdauer

Schadstoff	Aufgabe	Unsicherheit ^{a)} [VB95%]	Verfügbarkeit mindestens	Messdauer mindestens	Grundlage
Feinstaub Partikel PM ₁₀	Ortsfeste Messung	25 (TMW)	90% der MMW für JMW (11)	23 min für HMW 40 HMW für TMW 23 TMW für MMW	IG-L ¹⁾ und EU-LQR ²⁾
	Orientierende Messung	50 (TMW)	90% der MMW für JMW (11)	51 Tage für JMW	
	Modellrechnung	50 (TMW, JMW)	-	-	
	Schätzung (objektiv)	100	-	-	

1) IG-L: Immissionsschutzgesetz - Luft, IG-L, BGBl. Nr. 115/1997

2) EU-LQR: Richtlinie 2008/50/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft in Europa

a) Erweiterte Messunsicherheit mit einem Vertrauensbereich von 95%

3.2. Qualitätskriterien, nach denen die Sensoren getestet werden sollten

- Qualität von aktuellen Werten (Ist-Anzeigen der Sensoren)
- Qualität von Halbstundenmittelwerten
- Qualität von Tagesmittelwerten und werden die Qualitätsanforderungen für orientierende Messungen erreicht
- Qualität von Langzeitmittelwerten

Generell kann festgestellt werden, dass es für aktuelle Messwertanzeigen, aber auch für Halbstundenmittelwerte keine normativen Qualitätsanforderungen gibt. Hintergrund ist, dass bei der Komponente Feinstaub nur Grenzwerte für den Tages- und den Jahresmittelwert festgelegt wurden und das Referenzmessverfahren ein gravimetrisches ist, bei dem die Datenbasis Tagesmittelwerte sind. Durch den Vergleich mit validierten kontinuierlichen Feinstaubmessungen (Referenzmessverfahren) können jedoch Aussagen über die Datenqualität von Halbstundenmittelwerten der Sensoren getroffen werden.

4. Ergebnisse:

4.1. Messtechnischer Aufbau und technische Konfiguration der Feinstaubsensoren:

4.1.1. Feinstaubsensoren und Datenerfassung bzw. Datenübertragung

Für die Sensoren gibt es Bauanleitungen für einen Wetterschutz. In diesem Fall kommt die Stromversorgung von einem fixen USP-Anschluss und die Messdatenübertragung erfolgt über eine private WLAN-Verbindung. Nach Parametrierung des Feinstaubensors und Anmeldung auf einem Internetportal werden Messwerte vom Sensor geliefert und können am Internetportal eingesehen, aber auch für weitere Auswertungen vom jeweiligen Sensorbetreiber heruntergeladen werden. Genaue Informationen sind unter <http://luftdaten.info/> zu finden. Es sind in Deutschland und Österreich, aber auch weltweit Sensoren im Einsatz. Die aktuellen Messwerte können über die oben angeführte Adresse abgerufen werden.

Bild 1: Wetterschutz und technische Konfiguration des Feinstaubensors SDS011 im privaten Bereich

Bild 2: weltweite installation der Feinstaubsensoren

4.1.2. Einbau der Feinstaubsensoren in Wetterschutzgehäuse für netzunabhängigen Betrieb

Es sollten diverse technische Konfigurationen getestet werden (z.B. netzunabhängiger Betrieb). Dafür wurden die Bauteile in einem speziellen Wetterschutzgehäuse für elektrische Bauteile verbaut, da im Wetterschutz laut *Bild 1* die zusätzlichen Bauteile wie Akku und mobilen WLAN-Router keinen Platz gefunden hätten.

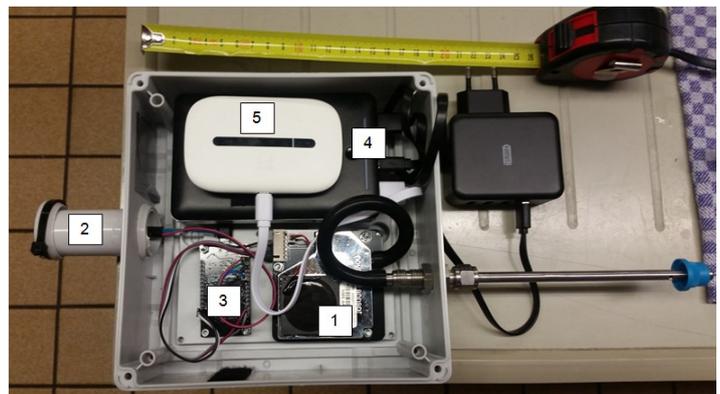
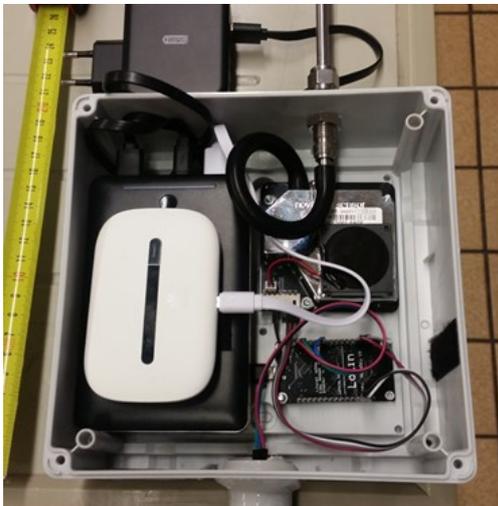


Bild 3: Konfiguration für netzunabhängigen Betrieb. [1] Staubsensor SDS011, [2] Feuchte- und Temperatursensor, [3] WLAN-Modul, [4] Akkupack, [5] WLAN-Router, sichtbar auch die Ansaugsonde aus Edelsathl mit Wetterschutz über den Ansaugöffnungen (blau). Einsatzlage ist senkrecht.

Die Gesamtkosten der dargestellten Sensoreinheit inkl. Solarmodul liegen bei etwa € 200,-

4.1.3. Test eines netzunabhängigen Betriebes von Staubsensoren mit Akkubetrieb und Datenübertragung mittels mobilen WLAN-Routers

Die unter 4.1.2 ersichtliche Messkonfiguration wurde im ersten Schritt auf Einsetzbarkeit im netzunabhängigen Betrieb getestet. Grund hierfür war, dass z.B. bei einem flächendeckenden Messnetz die Sensoren einfach an Laternenmasten und anderen leicht zugänglichen Einrichtungen angebracht und so ohne direkte Strom- und Internetan-

bindung Feinstaubwerte generiert werden könnten. Vorgabe war, dass die Messkonfiguration zumindest eine Woche, besser einen Monat unabhängig Daten liefert (Tausch des Akkupacks im Wochen- bzw. Monatsrhythmus).

Leider hat sich bei den Tests herausgestellt, dass diese Messkonfiguration nur über die Dauer von wenigen Tagen unabhängig Messwerte liefern kann und dann die Akkuleistung für den Betrieb zu gering wird. Auch mit der zusätzlichen Unterstützung eines Solarpaneels konnten keine besseren Ergebnisse erzielt werden. Grund hierfür ist offensichtlich der Energieverbrauch des WLAN-Routers, wobei die Datenübertragung auf einen Datensatz pro 5 min konfiguriert wurde.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Langzeittest mit netzunabhängigem Sensorbetrieb vorerst verworfen und die Sensoren mit direktem Netzanschluss und Datenanbindung mittels mobilen WLAN-Routers bei gleicher Datenübertragungsrate (alle 5 min) getestet. Für den Messort wurde die Immissionsmessstation S431 Linz-Römerberg gewählt.

4.1.4. Installation von zwei parallelen Sensoreinheiten bei der Messstation S431 Linz-Römerberg

Um die Qualität der Sensordaten bewerten zu können, wurden zwei Sensoreinheiten bei einer ortsfesten Immissionsmessstation installiert.



Bild 4: Situierung der Staubsensoren bei der ortsfesten Immissionsmessstation S431 Linz-Römerberg

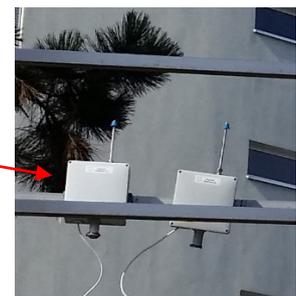


Bild 4: Staubsensoren im Einsatz

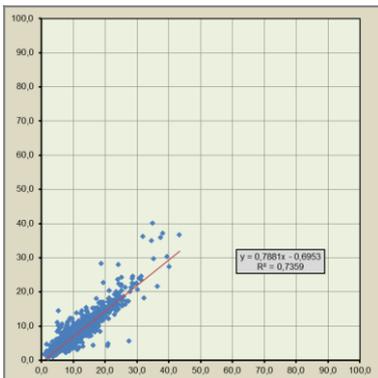
Wie bereits erwähnt, wurde bei den Staubsensoren eine Datenübertragungsrate von 5 min (IST-Wert) parametrierung. Aus diesen wurden Halbstundenmittelwerte berechnet, die als Datenbasis für den Datenvergleich herangezogen wurden. Für den Datenvergleich wurden alle verfügbaren Werte herangezogen, es wurden keine Ausreißer- oder andere statistische Tests vor dem Datenvergleich durchgeführt. Halbstundenmittelwerte stellen die größte verfügbare Auflösung bei den Datenpaaren dar.

4.2. Erste Ergebnisse der Feinstaubmessungen

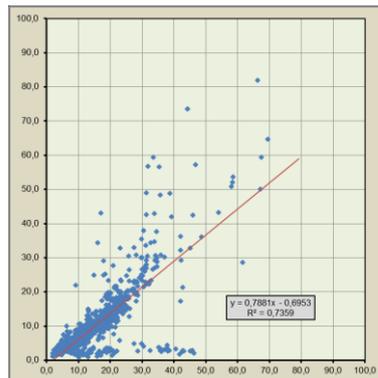
Es liegen Messwerte über neun Monate vor. Die Verfügbarkeit der Sensoreinheiten ist gut, allerdings sind einige Sensoreinheiten ausgefallen. Zur Bewertung der Datenqualität wurden die Messdaten des in der Messstation S431 Linz-Römerberg eingesetzten kontinuierlichen Feinstaubmessgerätes (Grimm) herangezogen. Zur Bewertung der relativen Aussagen über die Luftqualität wurden die Ergebnisse der Sensoren am selben Messort gegenübergestellt.

4.2.1 Vergleich von Halbstundenmittelwerte

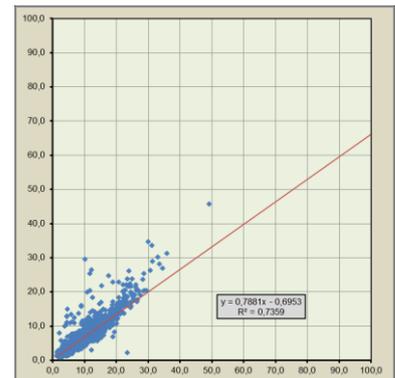
4.2.1.1 Vergleich der Halbstundenmittelwerte, Sensor A - Sensor B (Station Römerberg) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



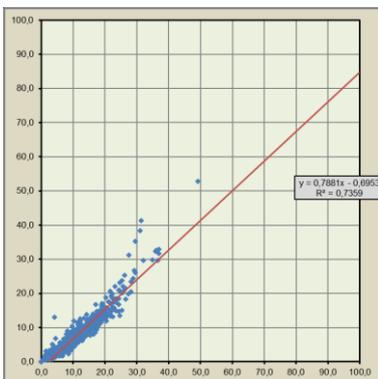
Grafik 1: Sensor A – Sensor B für April 2018



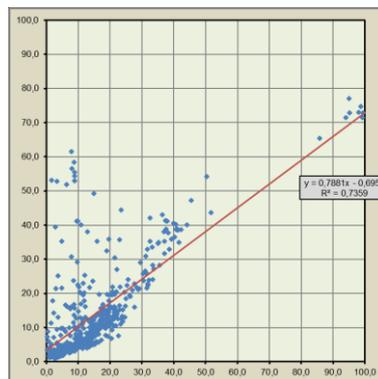
Grafik 2: Sensor A – Sensor B für Mai 2018



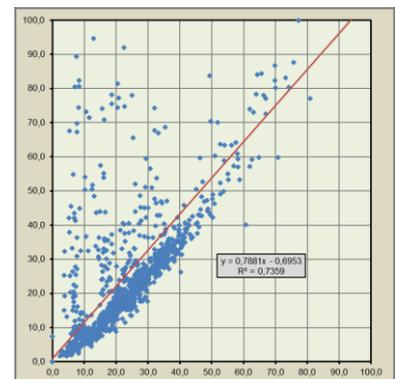
Grafik 3: Sensor A – Sensor B für Juni 2018



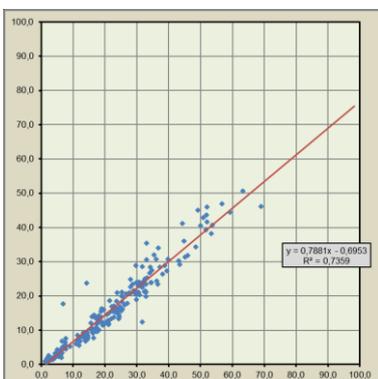
Grafik 4: Sensor A – Sensor B für Juli 2018



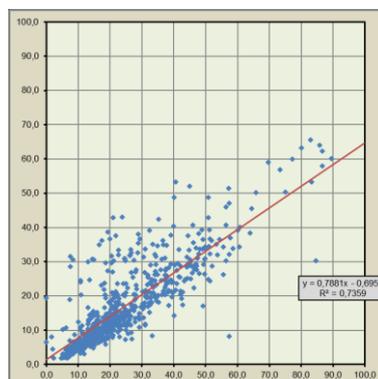
Grafik 5: Sensor A – Sensor B für Okt. 2018



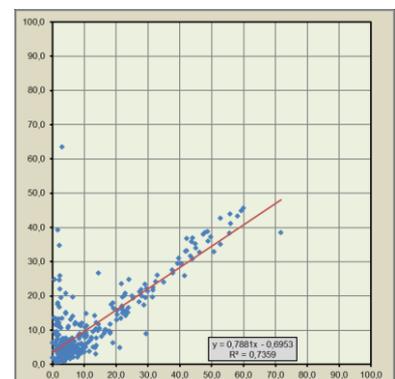
Grafik 6: Sensor A – Sensor B für Nov. 2018



Grafik 7: Sensor A – Sensor B für Dez. 2018

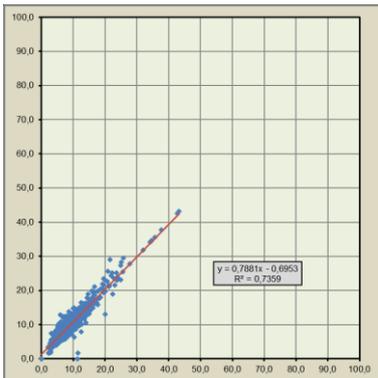


Grafik 8: Sensor A – Sensor B für Feb. 2019

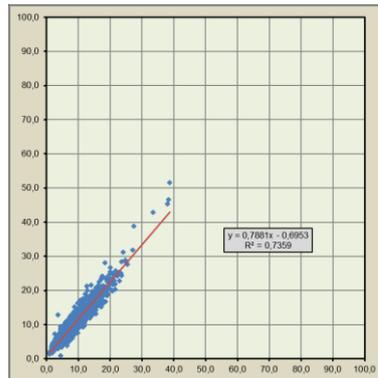


Grafik 9: Sensor A – Sensor B für März 2019

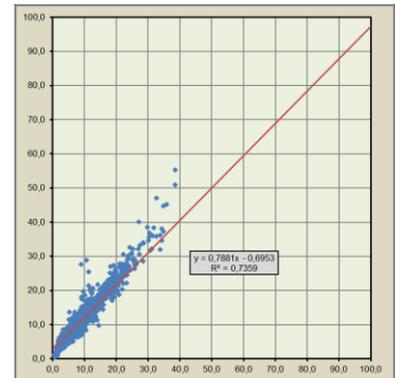
4.2.1.2 Vergleich der Halbstundenmittelwerte, Sensor C - Sensor D (Station Neues Rathaus) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



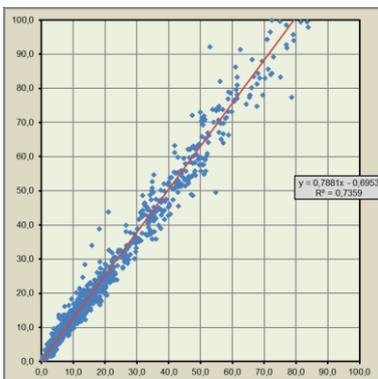
Grafik 10: Sensor C – Sensor D für Juli 2018



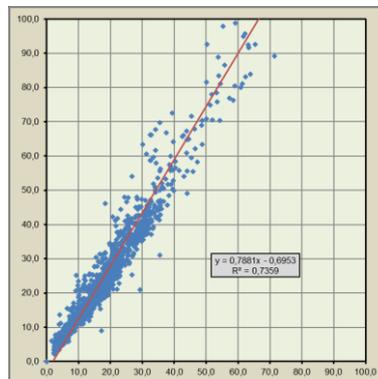
Grafik 11: Sensor C – Sensor D für Aug. 2018



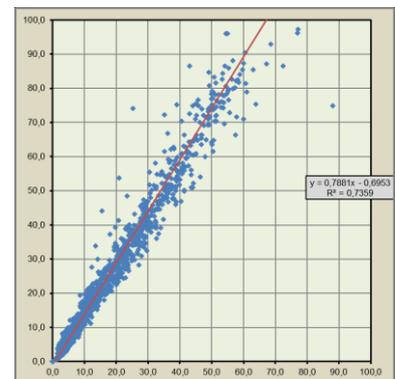
Grafik 12: Sensor C – Sensor D für Sep. 2018



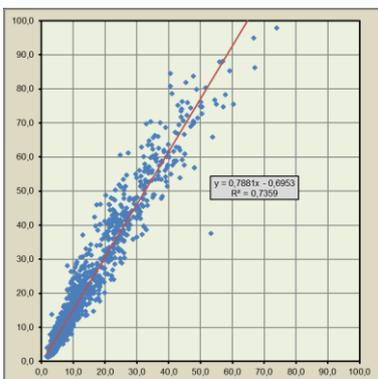
Grafik 13: Sensor C – Sensor D für Okt. 2018



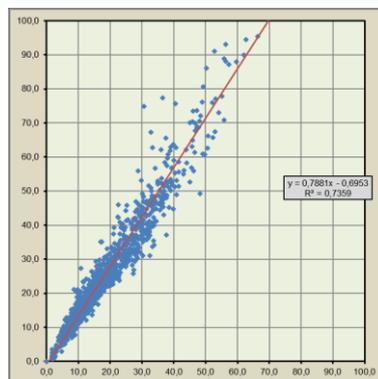
Grafik 14: Sensor C – Sensor D für Nov. 2018



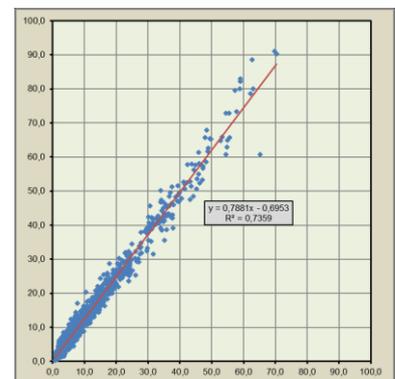
Grafik 15: Sensor C – Sensor D für Dez. 2018



Grafik 16: Sensor C – Sensor D für Jan. 2019



Grafik 17: Sensor C – Sensor D für Feb. 2019

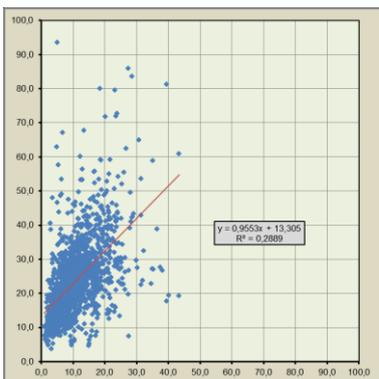


Grafik 18: Sensor C – Sensor D für März 2019

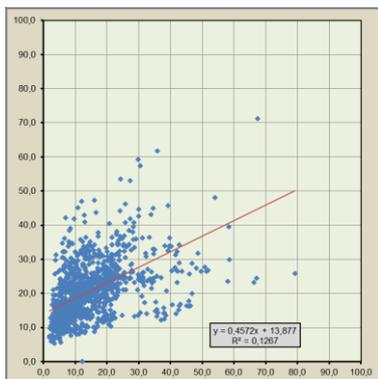
Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Korrelation der Feinstaubwerte ist gut
- Im Bereich des Nullpunktes liefern die Sensoren ähnliche Werte
- Bei höheren Konzentrationen wird die Streuung der Feinstaubwerte größer
- Generell liefern die Sensoren aber deutlich unterschiedliche Feinstaubwerte (ergibt sich aus der Steigung der Ausgleichsgeraden)
- Es treten Artefakte auf, die näher untersucht werden sollten
- Relativaussagen sind nur bedingt möglich

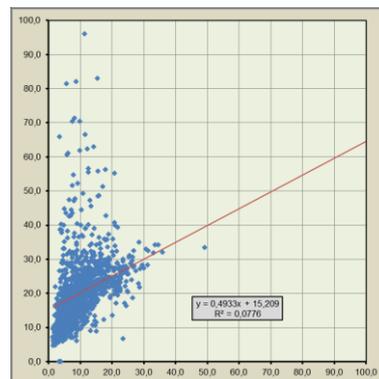
4.2.1.3 Vergleich der Halbstundenmittelwerte, Sensor A - kontinuierliche Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



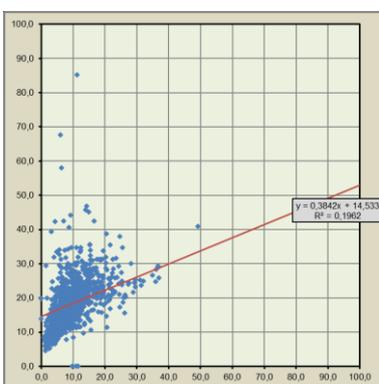
Grafik 19: Sensor A - Referenz für April 2018



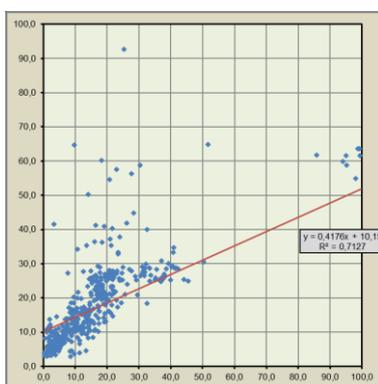
Grafik 20: Sensor A - Referenz für Mai 2018



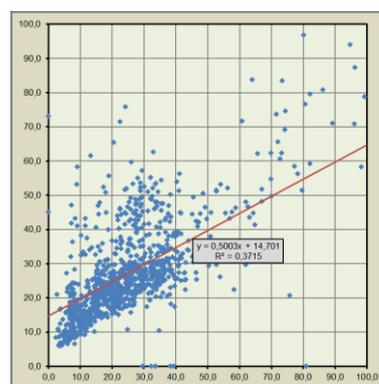
Grafik 21: Sensor A - Referenz für Juni 2018



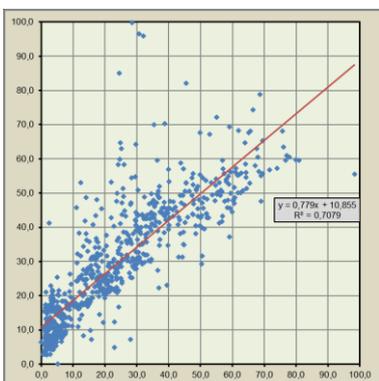
Grafik 22: Sensor A - Referenz für Juli 2018



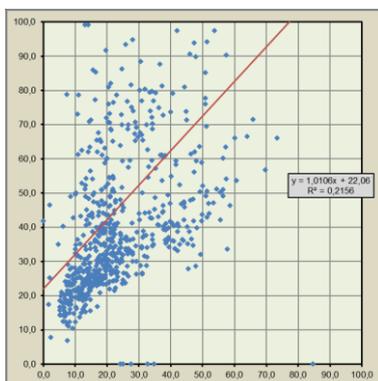
Grafik 23: Sensor A - Referenz für Okt. 2018



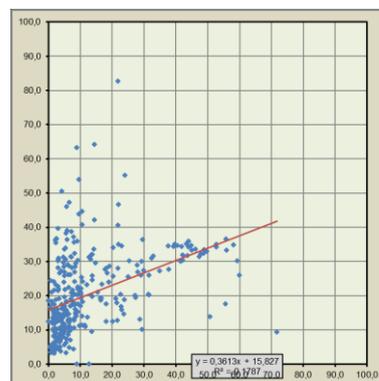
Grafik 24: Sensor A - Referenz für Nov. 2018



Grafik 25: Sensor A - Referenz für Dez. 2018

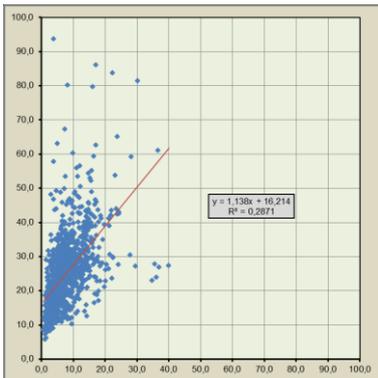


Grafik 26: Sensor A - Referenz für Feb. 2019

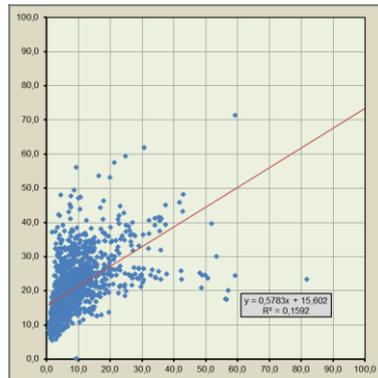


Grafik 27: Sensor A - Referenz für März 2019

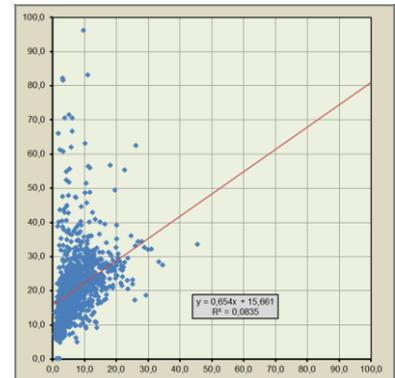
4.2.1.4 Vergleich der Halbstundenmittelwerte, Sensor B - kontinuierliche Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



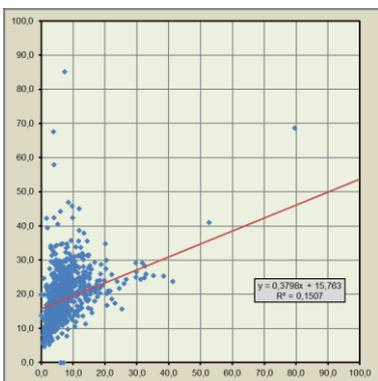
Grafik 28: Sensor B - Referenz für April 2018



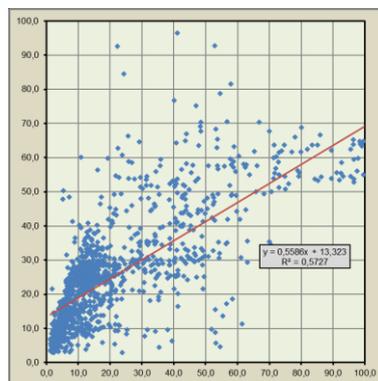
Grafik 29: Sensor B - Referenz für Mai 2018



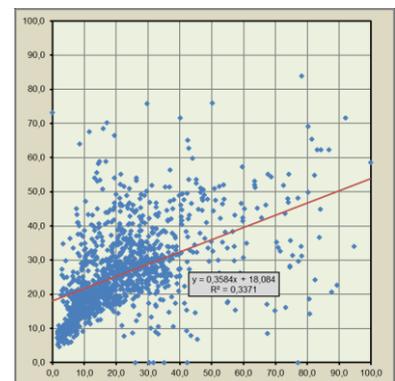
Grafik 30: Sensor B - Referenz für Juni 2018



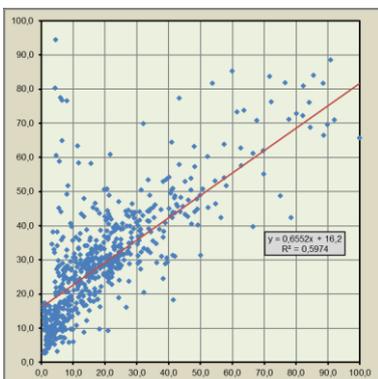
Grafik 31: Sensor B - Referenz für Juli 2018



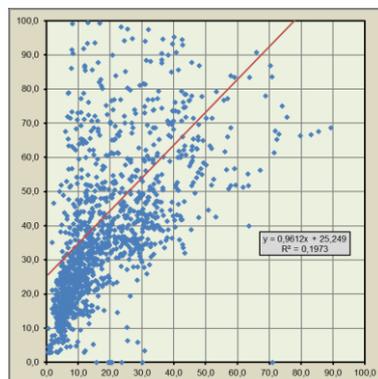
Grafik 32: Sensor B - Referenz für Okt. 2018



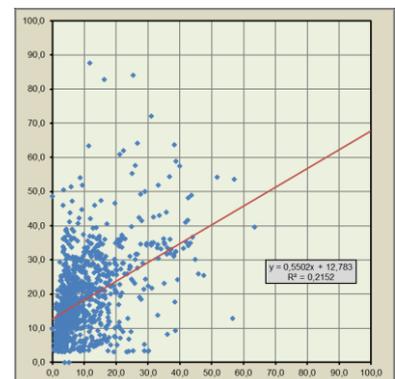
Grafik 33: Sensor B - Referenz für Nov. 2018



Grafik 34: Sensor B - Referenz für Dez. 2018



Grafik 35: Sensor B - Referenz für Feb. 2019



Grafik 36: Sensor B - Referenz für März 2019

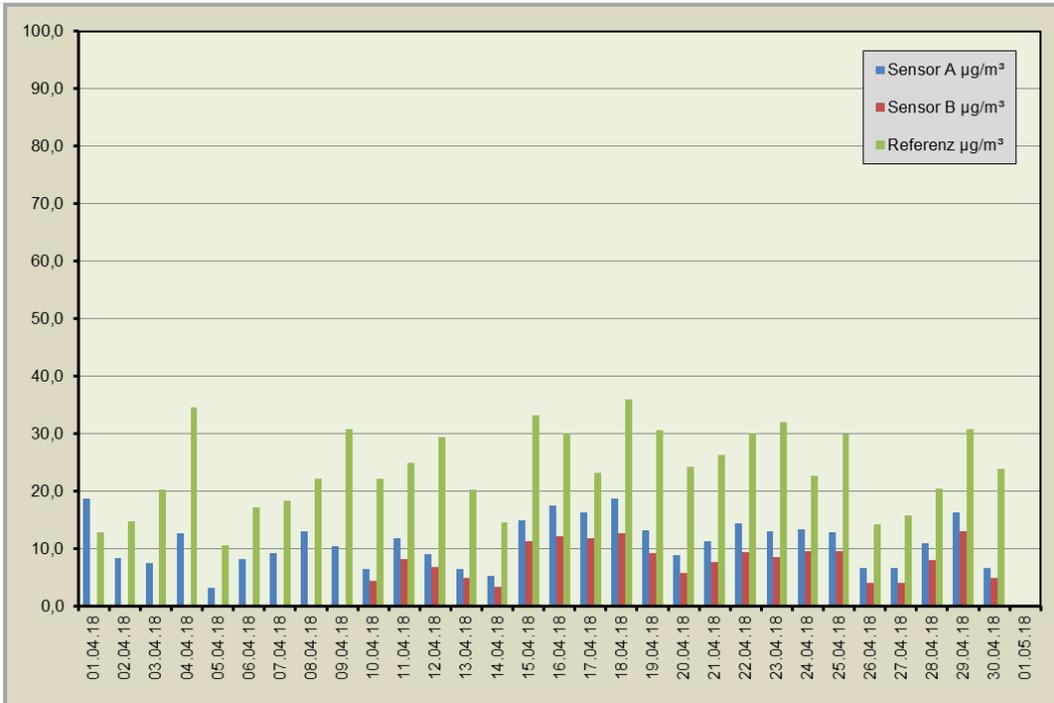
Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Staubsensoren liefern bei geringen Feinstaubkonzentrationen zu niedrige Werte (Ordinatenabstand)
- Die Steigungen der Ausgleichsgeraden ändern sich stark
- Generell liefern die Staubsensoren deutlich andere Feinstaubwerte als das Referenzmessverfahren
- Die Korrelation der Feinstaubwerte ist sehr schlecht und ändert sich

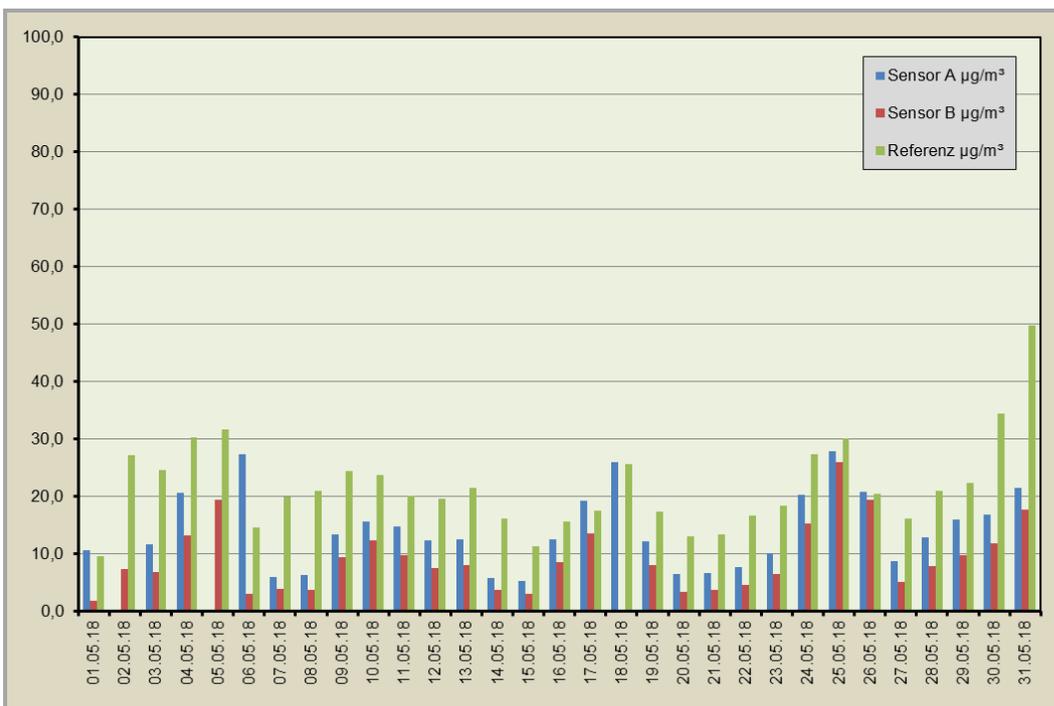
4.2.2 **Vergleich von Tagesmittelwerten**

4.2.2.1 **Feinstaubmesswerte der Sensoren A, B und des Referenzmessverfahrens (Station Römerberg)**

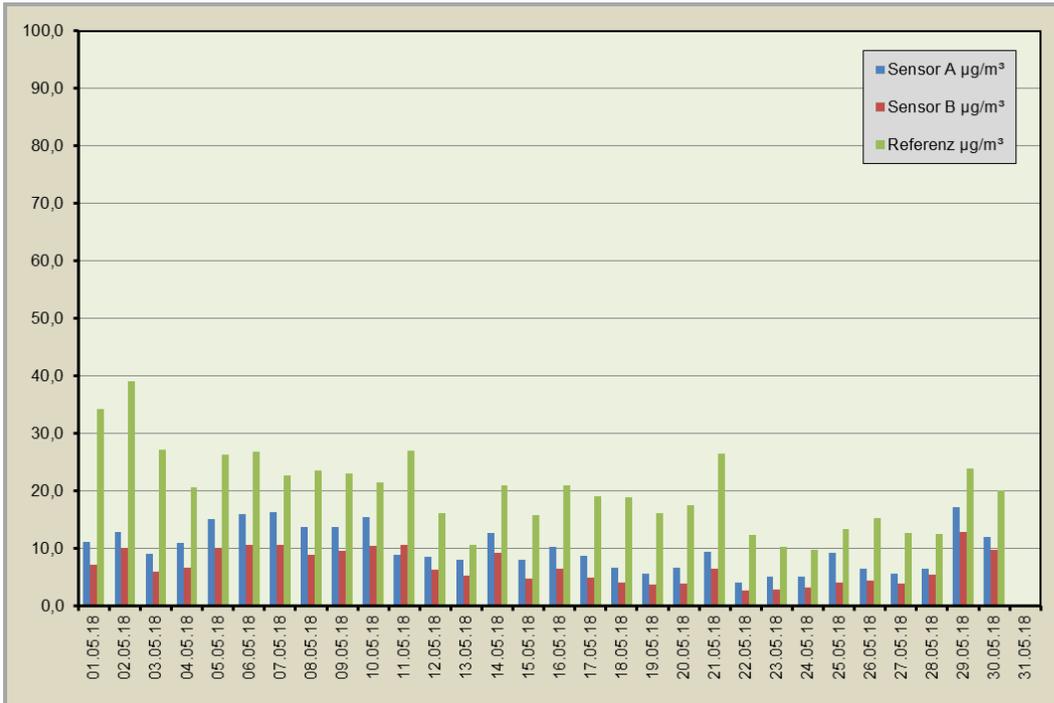
Tagesmittelwerte sind bei der Feinstaubmessung eine wichtige Kenngröße (Grenzwert). Aus diesem Grund ist der Vergleich von Sensordaten zu Referenzmessverfahren wesentlich. Dafür wurden aus den Sensordaten Tagesmittelwerte berechnet (wird von den Anwendern üblicherweise nicht durchgeführt, da Kurzzeitwerte betrachtet werden).



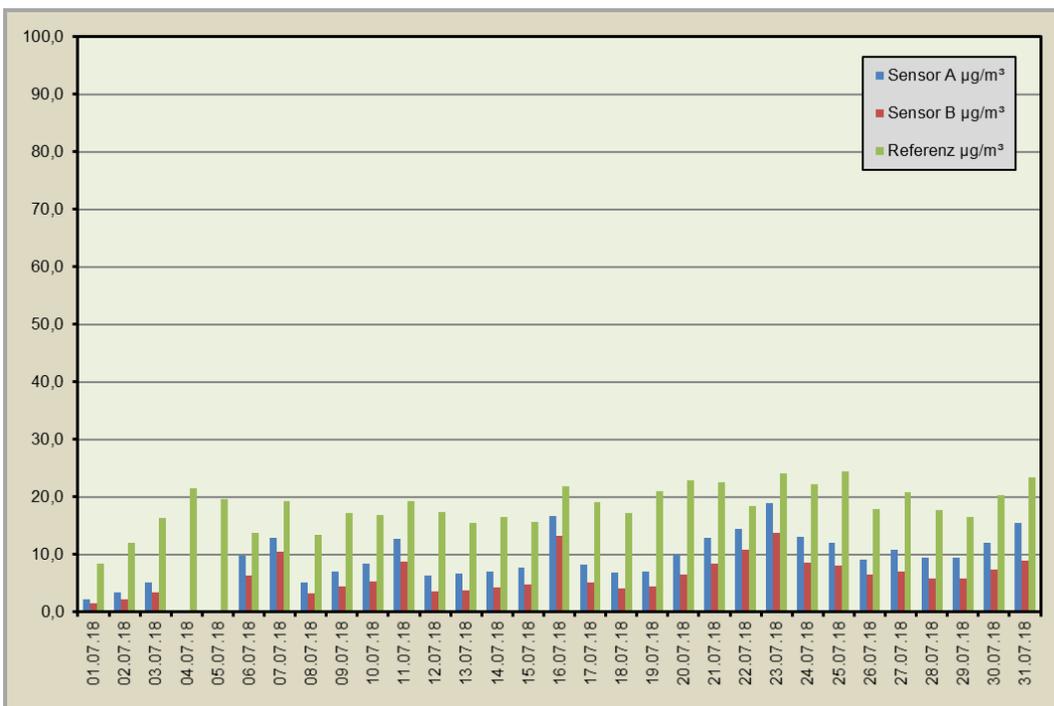
Grafik 37: Tagesmittelwerte für April 2018 [µg/m³]



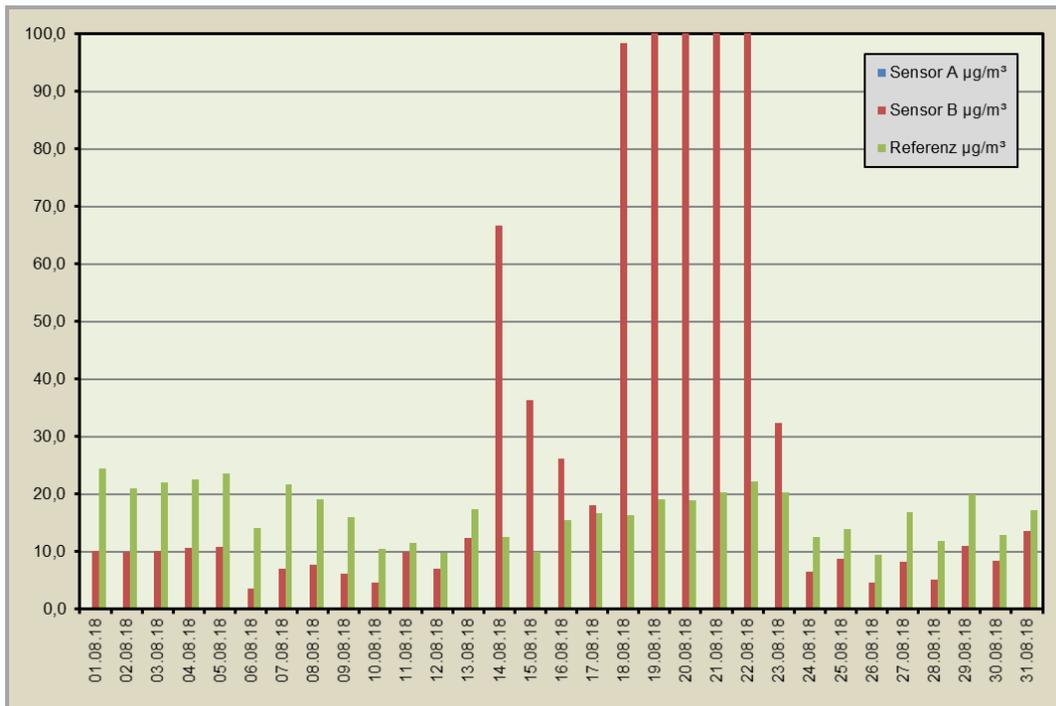
Grafik 38: Tagesmittelwerte für Mai 2018 [µg/m³]



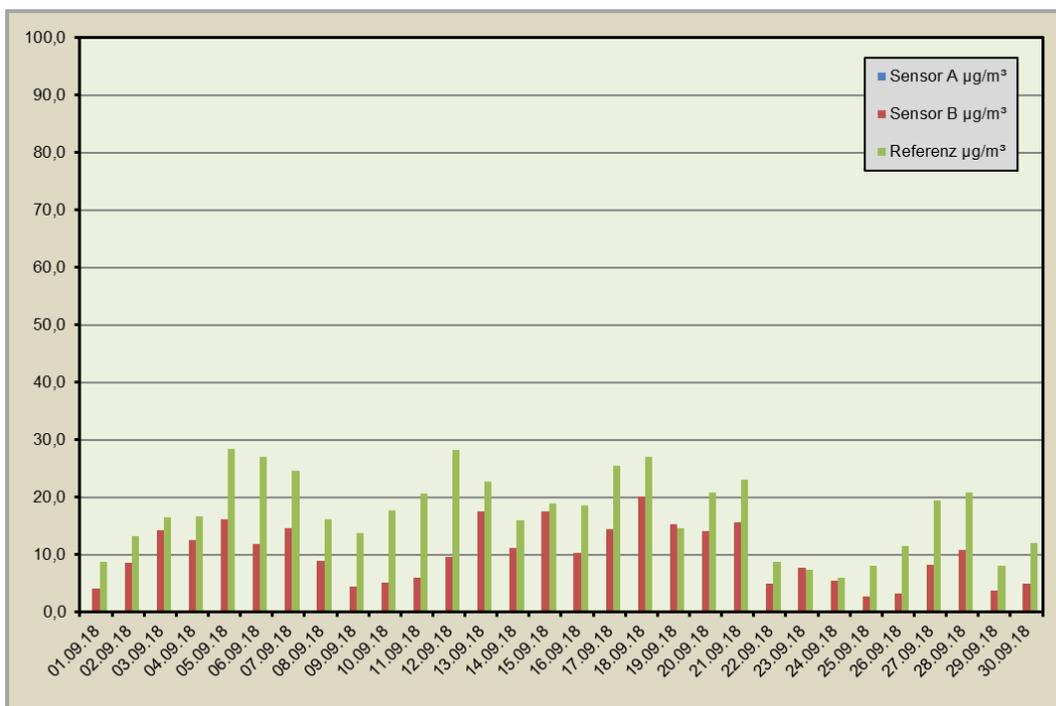
Grafik 39: Tagesmittelwerte für Juni 2018 [µg/m³]



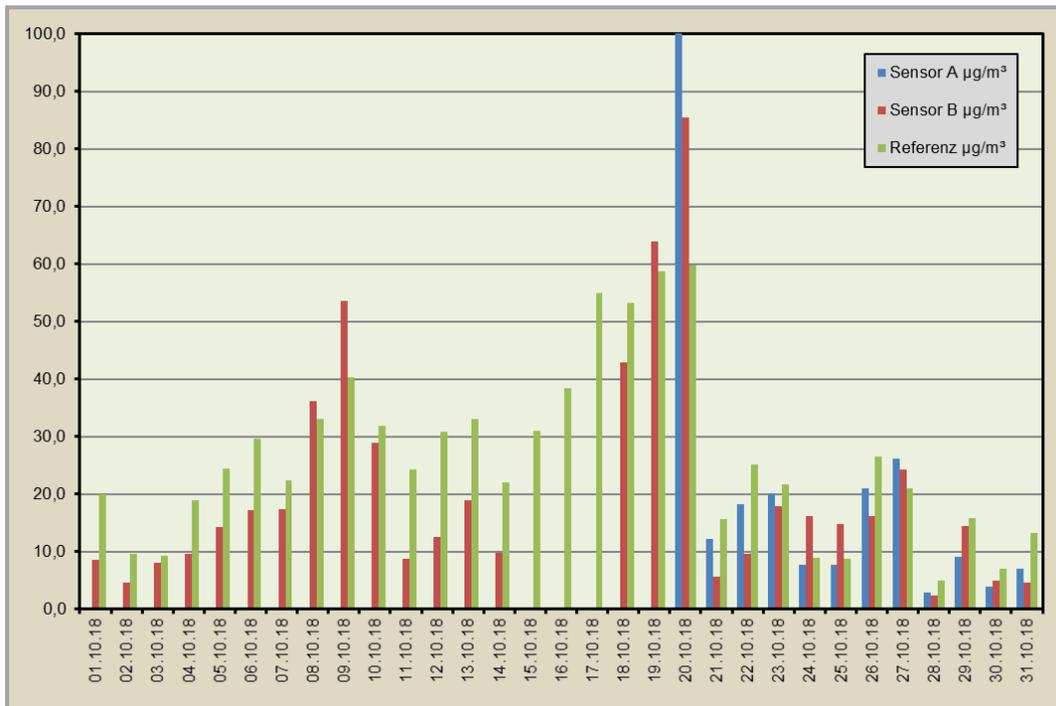
Grafik 40: Tagesmittelwerte für Juli 2018 [µg/m³]



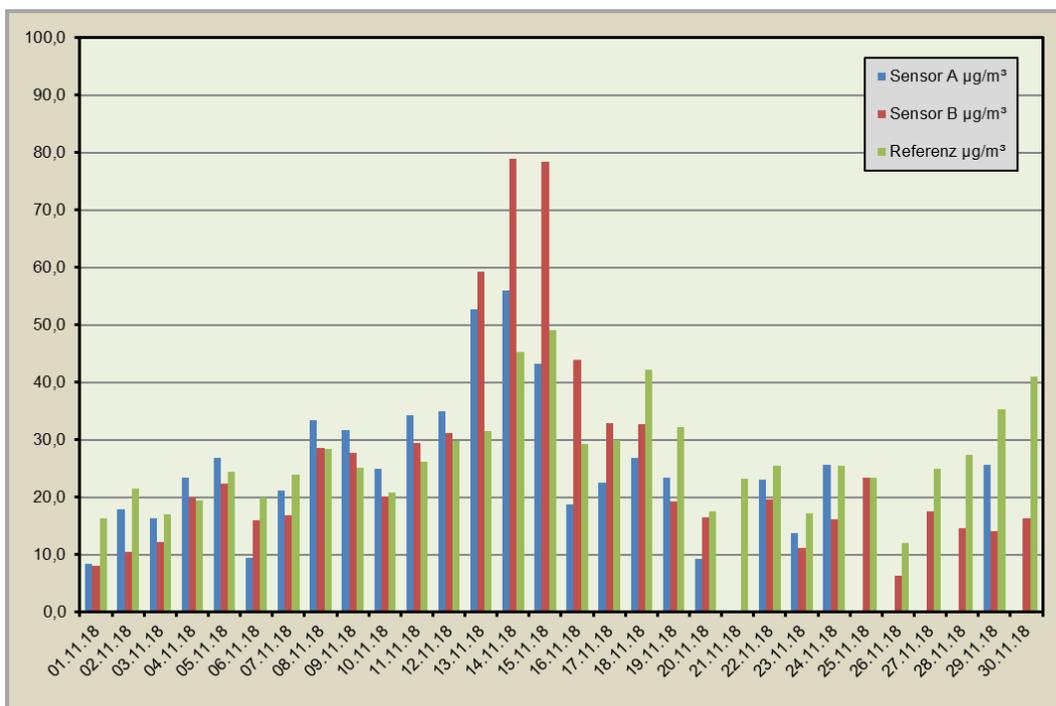
Grafik 41: Tagesmittelwerte für August 2018 [µg/m³]



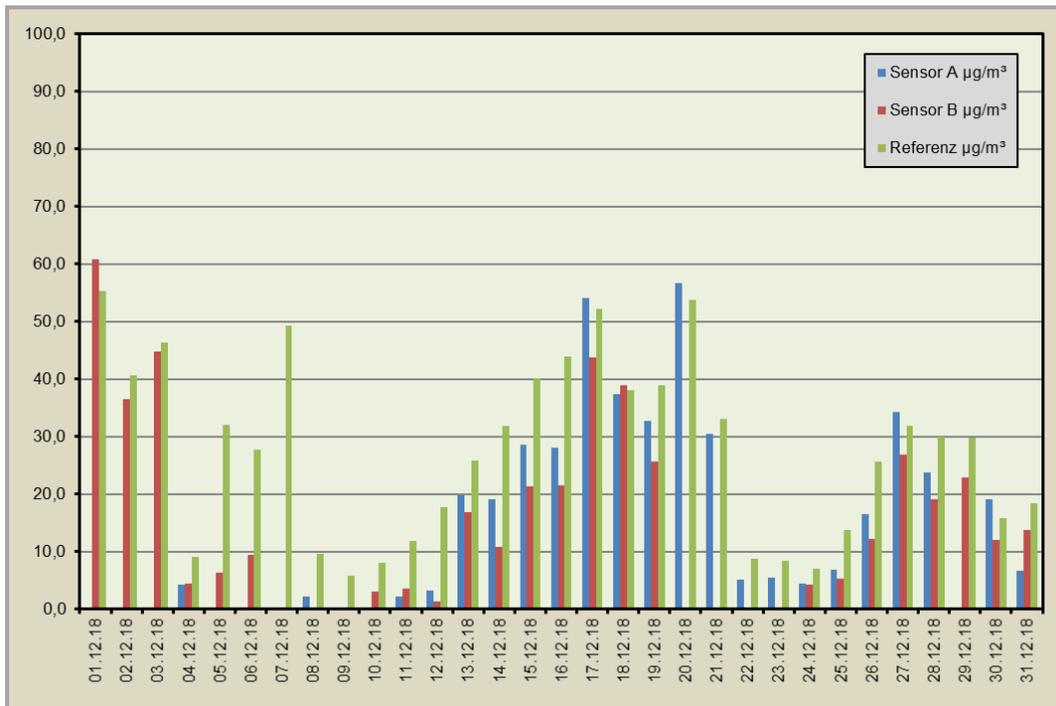
Grafik 42: Tagesmittelwerte für September 2018 [µg/m³]



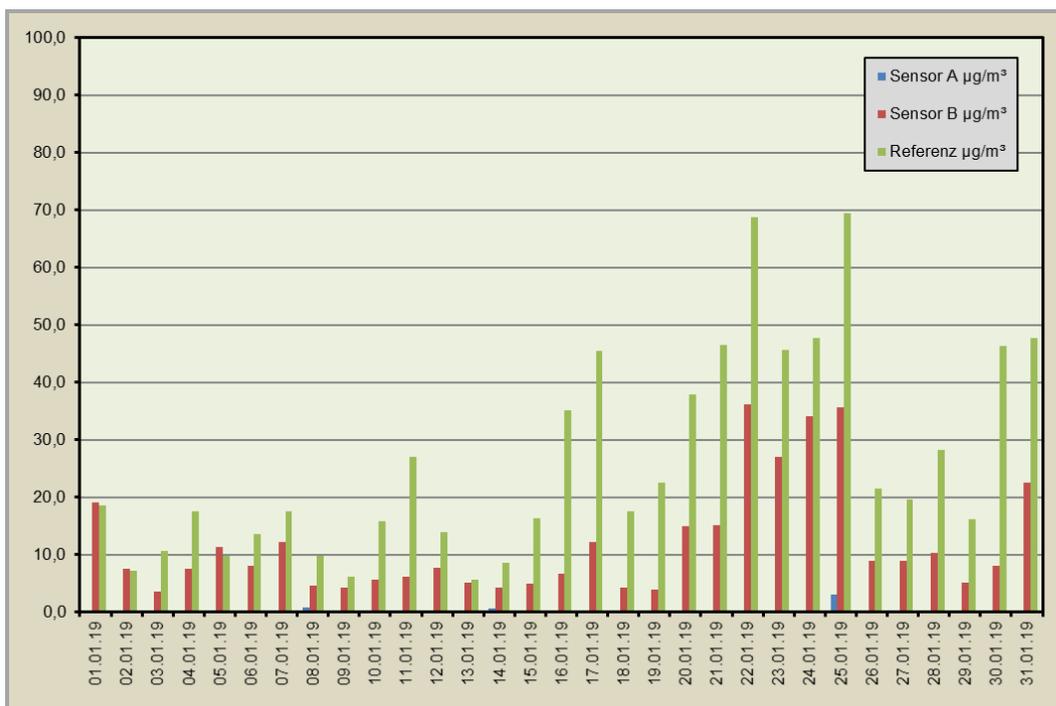
Grafik 43: Tagesmittelwerte für Oktober 2018 [µg/m³]



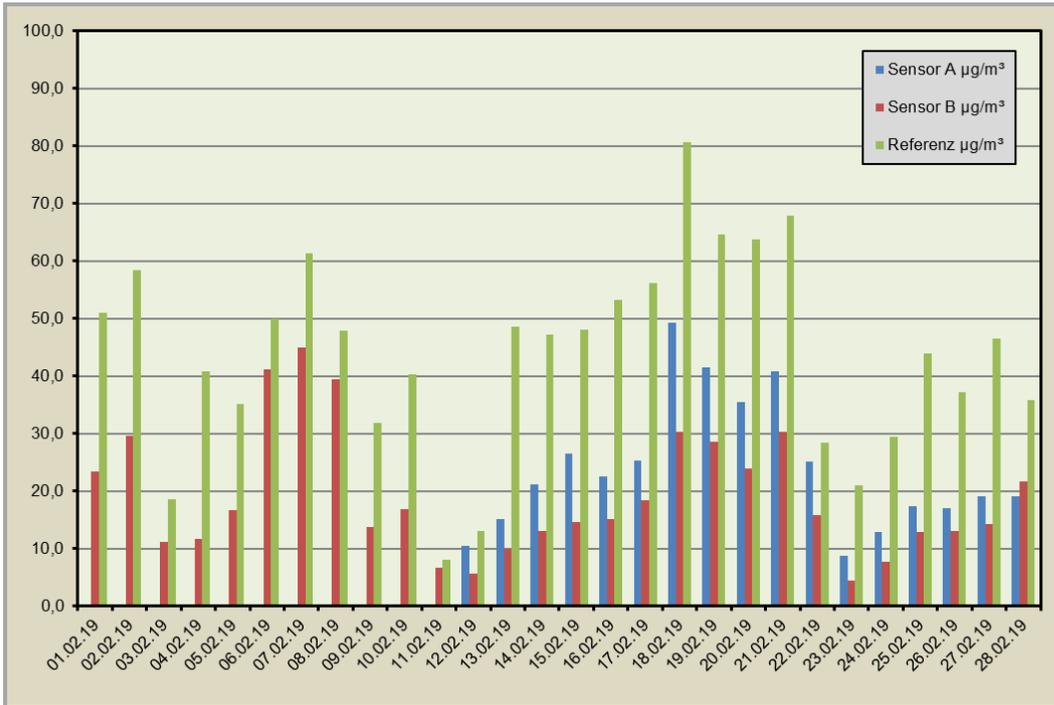
Grafik 44: Tagesmittelwerte für November 2018 [µg/m³]



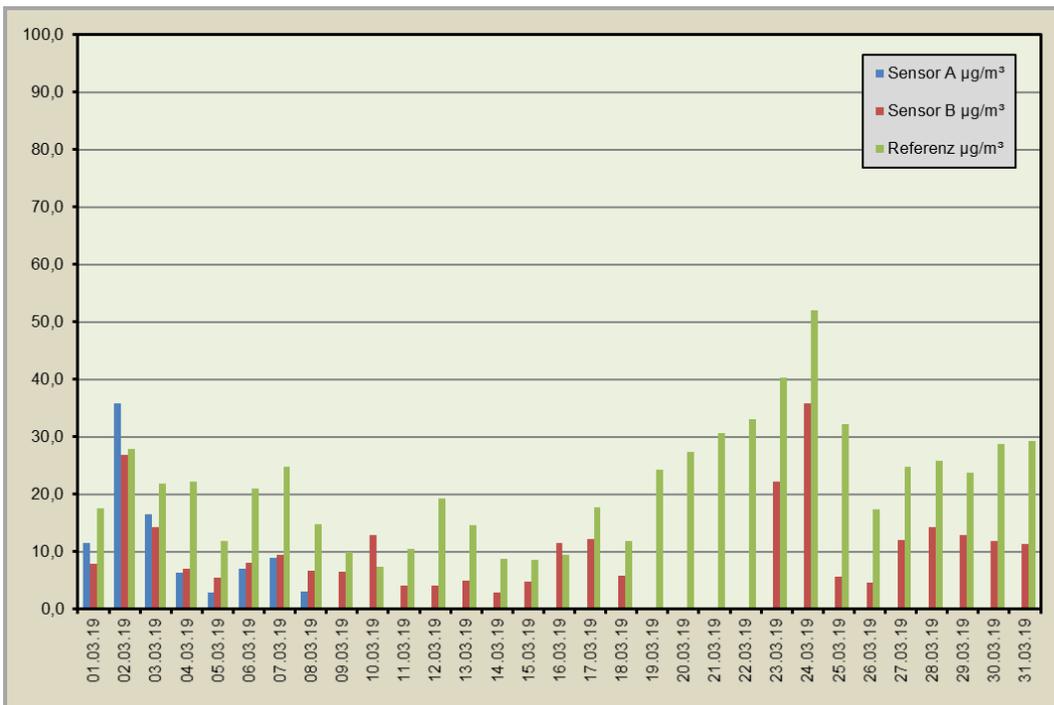
Grafik 45: Tagesmittelwerte für Dezember 2018 [µg/m³]



Grafik 46: Tagesmittelwerte für Jänner 2019 [µg/m³]

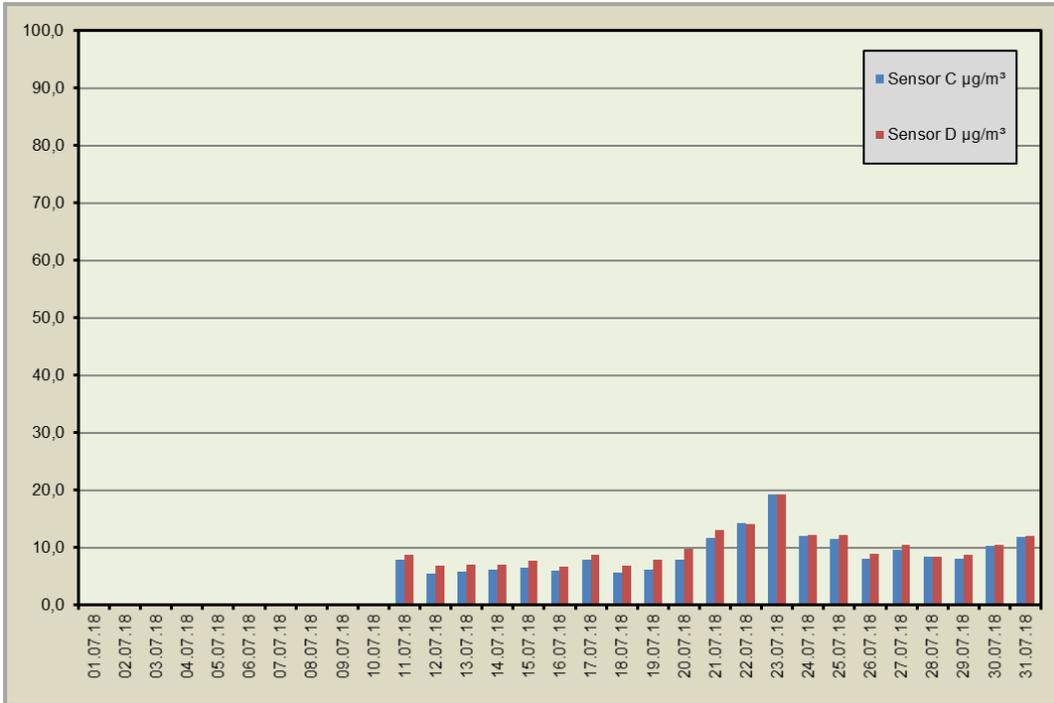


Grafik 47: Tagesmittelwerte für Februar 2019 [µg/m³]

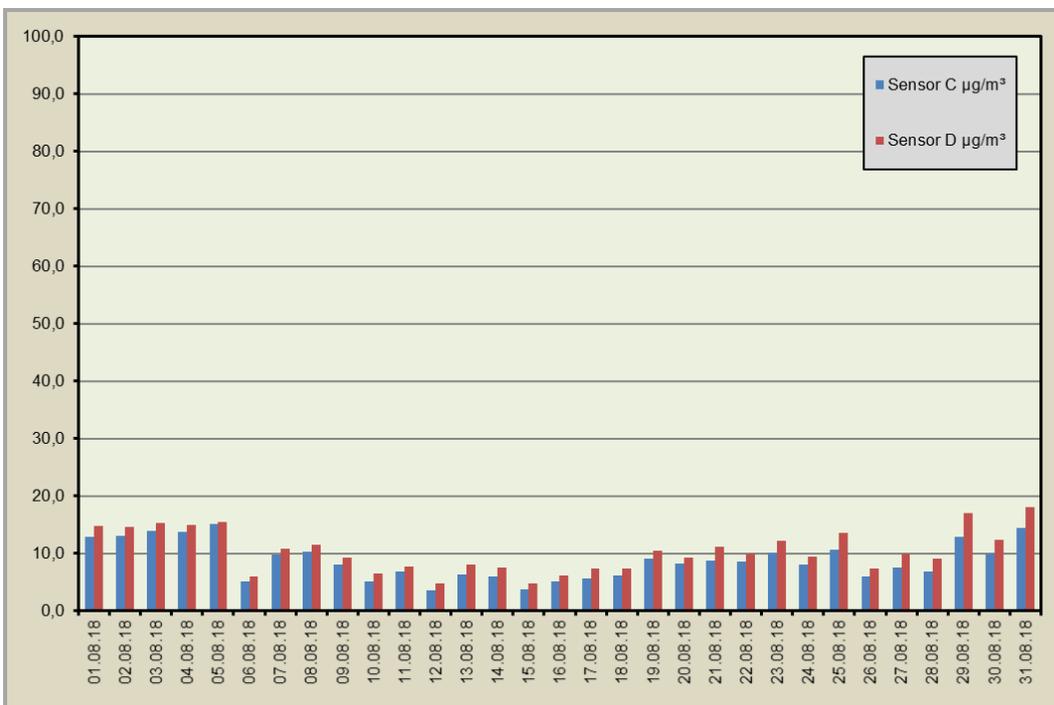


Grafik 48: Tagesmittelwerte für März 2019 [µg/m³]

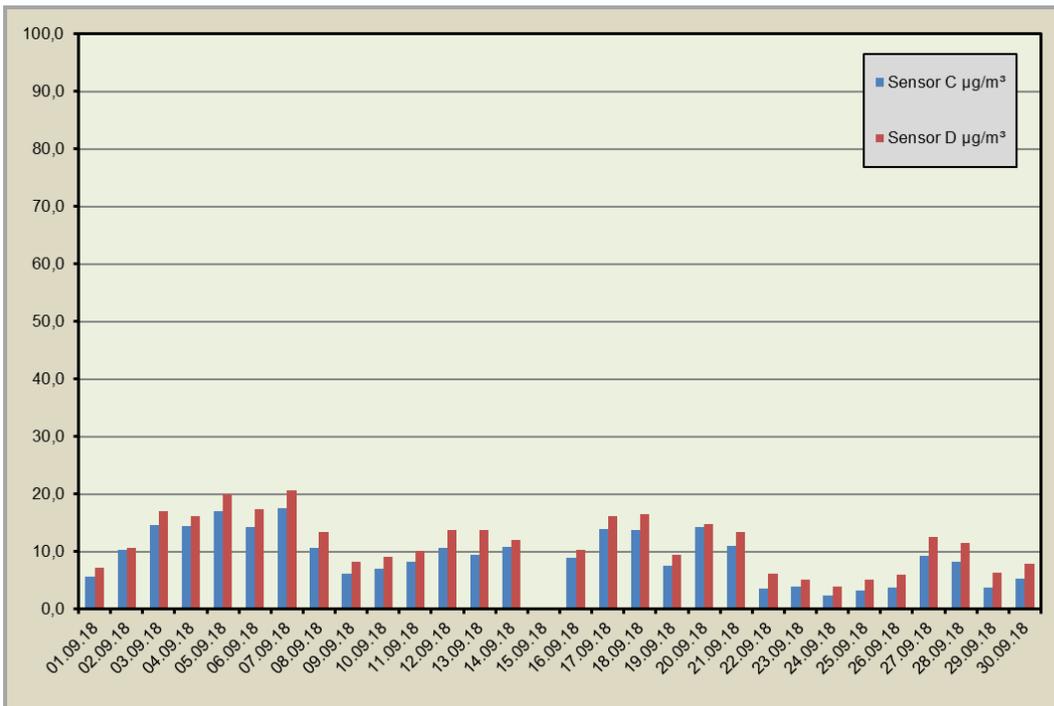
4.2.2.2 Feinstaubmesswerte der Sensoren C und D (Station Neues Rathaus)



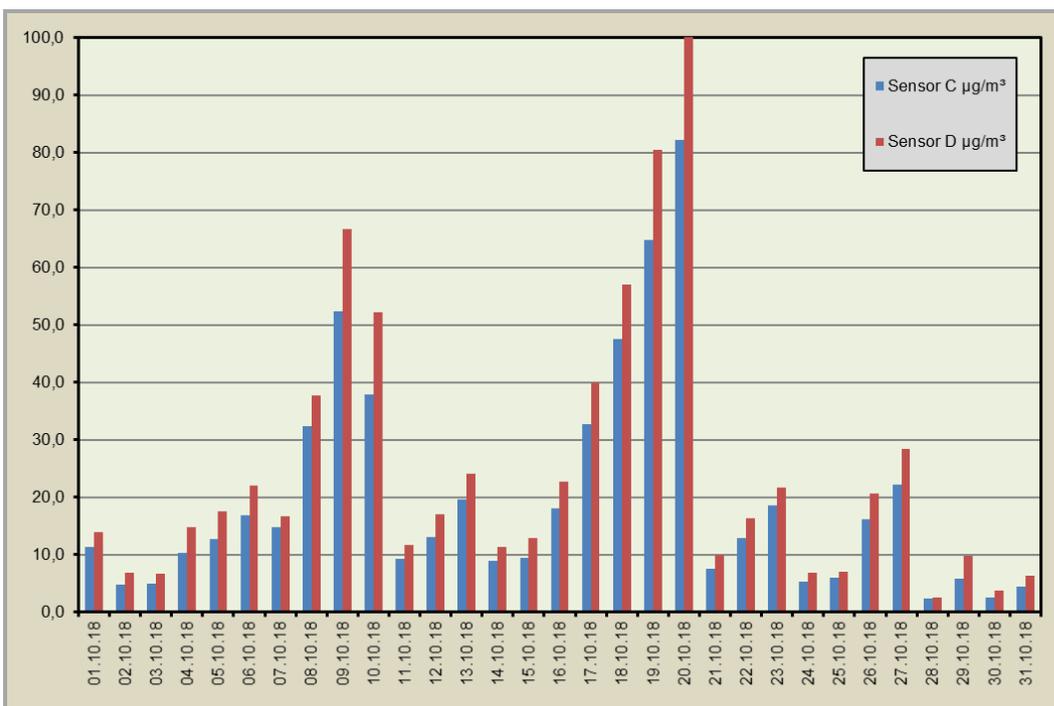
Grafik 49: Tagesmittelwerte für Juli 2018 [µg/m³]



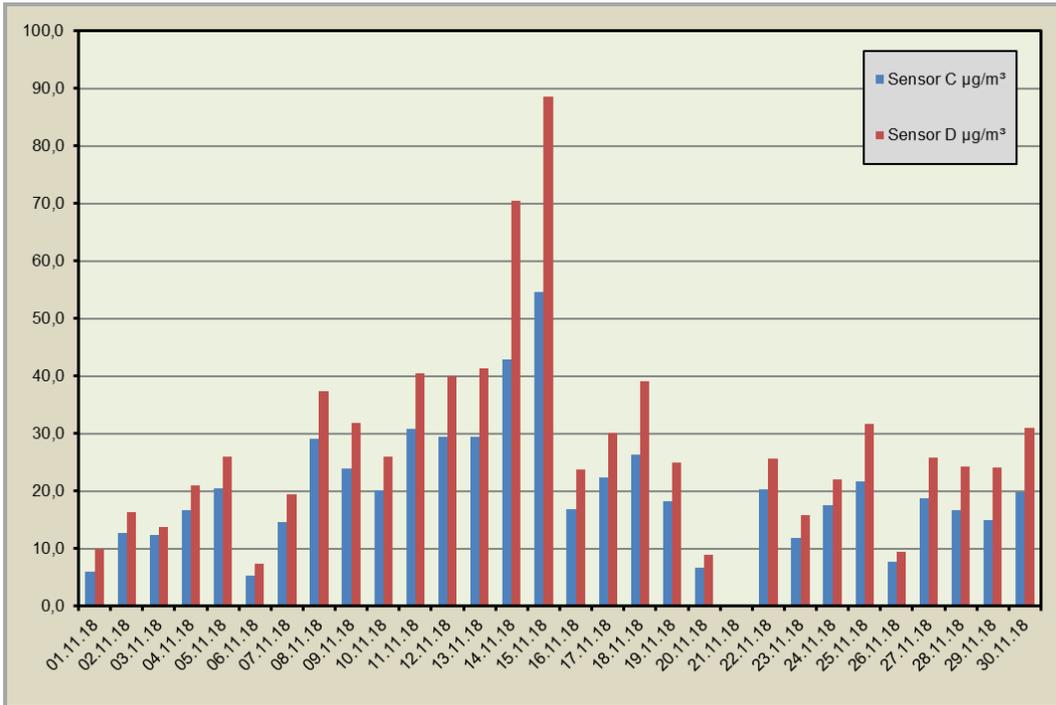
Grafik 50: Tagesmittelwerte für August 2018 [µg/m³]



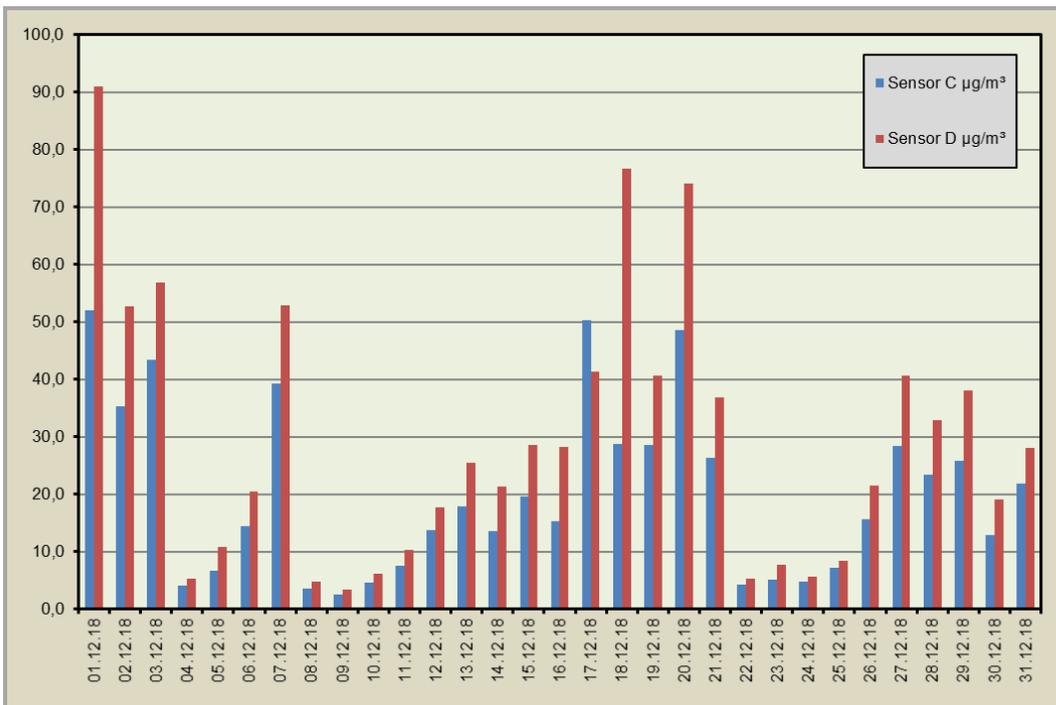
Grafik 51: Tagesmittelwerte für September 2018 [µg/m³]



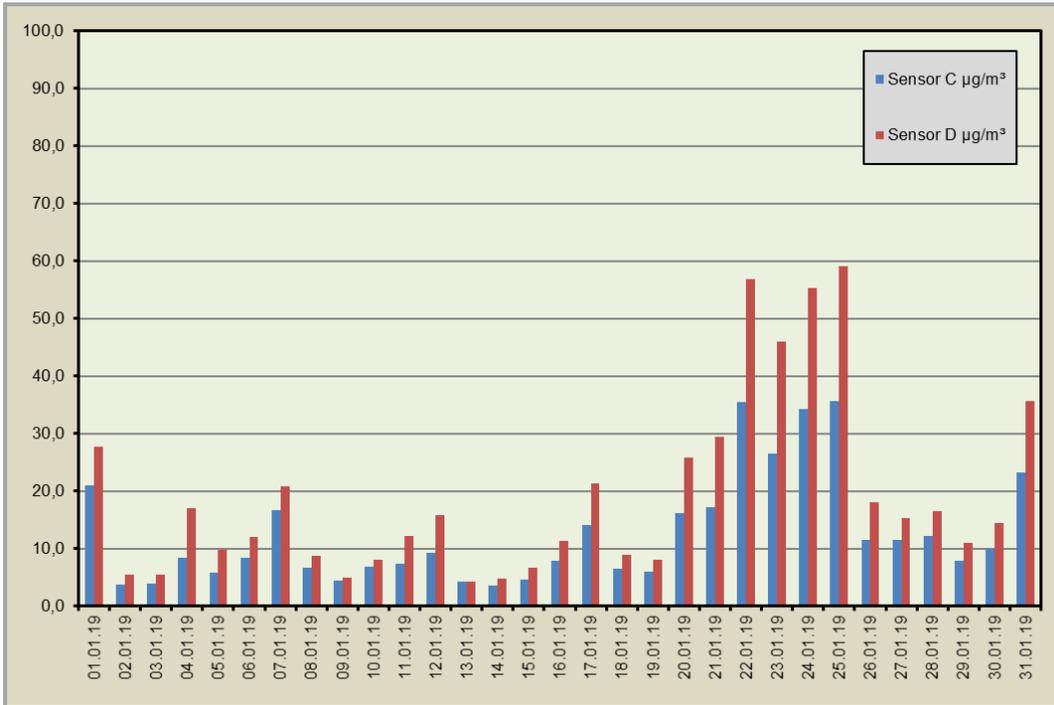
Grafik 52: Tagesmittelwerte für Oktober 2018 [µg/m³]



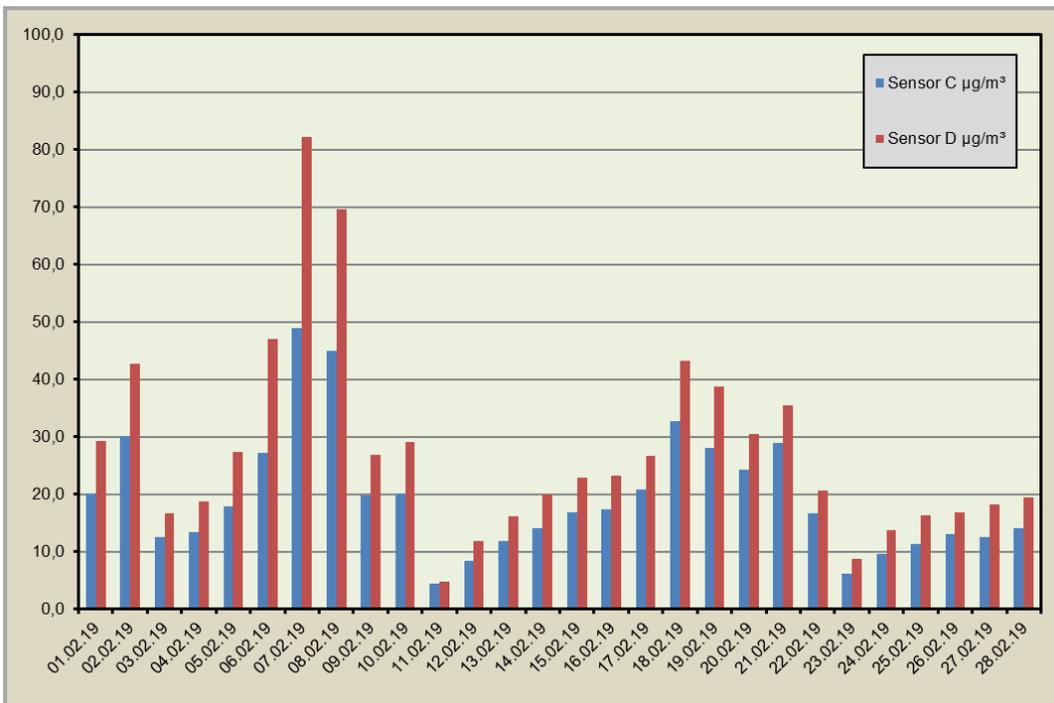
Grafik 53: Tagesmittelwerte für November 2018 [µg/m³]



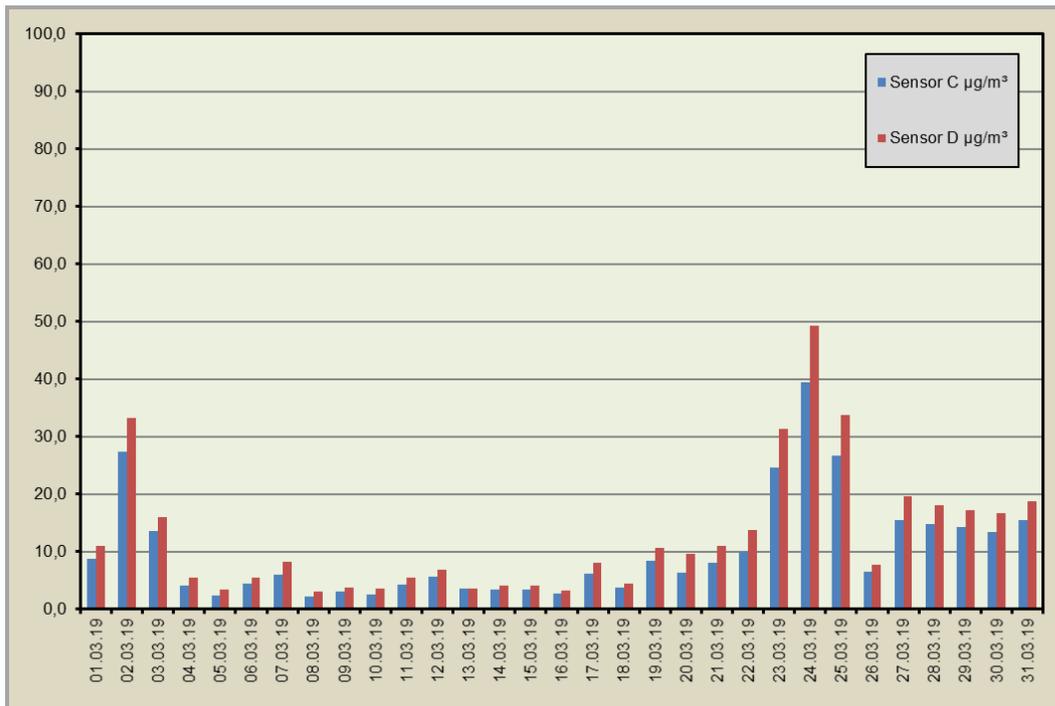
Grafik 54: Tagesmittelwerte für Dezember 2018 [µg/m³]



Grafik 55: Tagesmittelwerte für Jänner 2019 [µg/m³]



Grafik 56: Tagesmittelwerte für Februar 2019 [µg/m³]

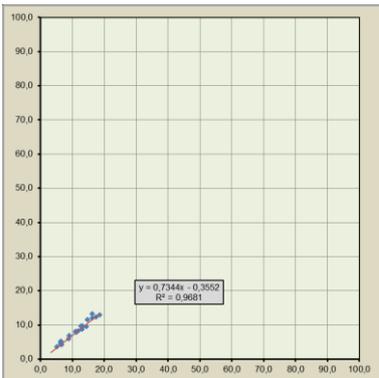


Grafik 57: Tagesmittelwerte für März 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

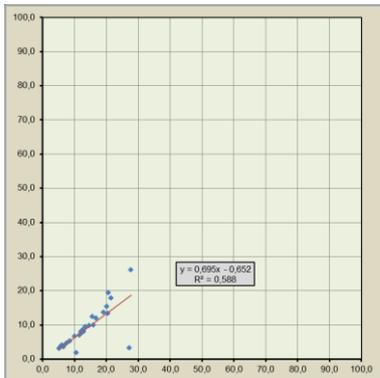
Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die aus den Sensordaten ermittelte Tagesmittelwerte ergeben signifikant niedrigere Feinstaubwerte als das Referenzmessgerät.
- Bei geringen Messwerten liefern die Sensoren ähnliche Tagesmittelwerte, die allerdings deutlich vom Referenzmessverfahren abweichen.
- Bei hohen Messwerten liefern die Sensoren teilweise deutlich unterschiedliche Tagesmittelwerte, die auch deutlich vom Referenzmessverfahren abweichen.

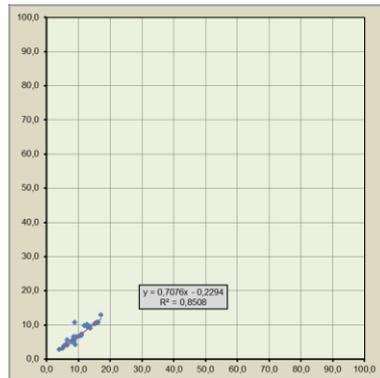
4.2.2.2 Vergleich der Tagesmittelwerte, Sensor A - Sensor B [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



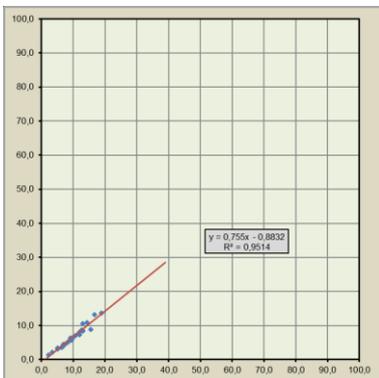
Grafik 58: Sensor A – Sensor B für April 2018



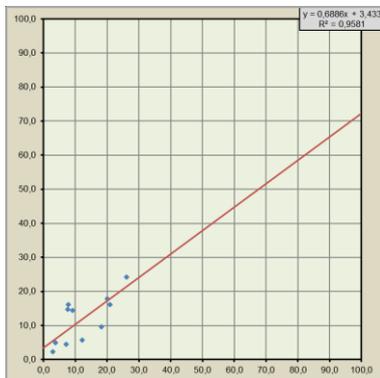
Grafik 59: Sensor A – Sensor B für Mai 2018



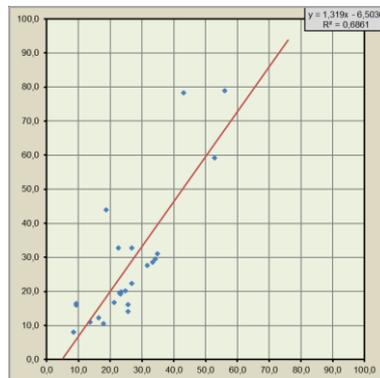
Grafik 60: Sensor A – Sensor B für Juni 2018



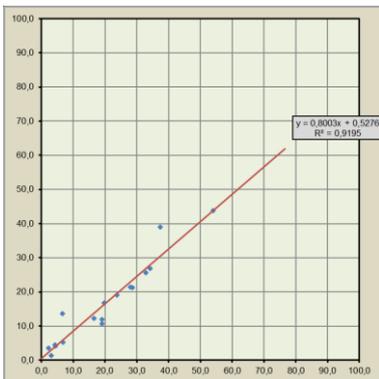
Grafik 61: Sensor A – Sensor B für Juli 2018



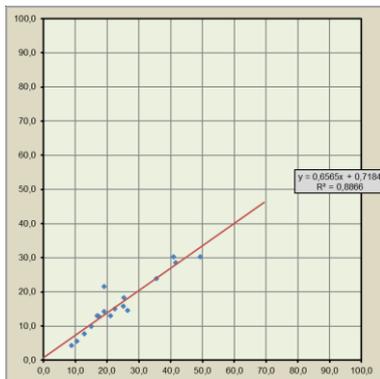
Grafik 62: Sensor A – Sensor B für Okt. 2018



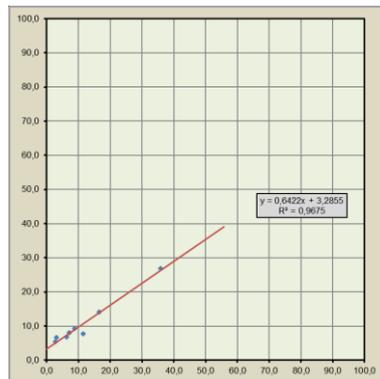
Grafik 63: Sensor A – Sensor B für Nov. 2018



Grafik 64: Sensor A – Sensor B für Dez 2018

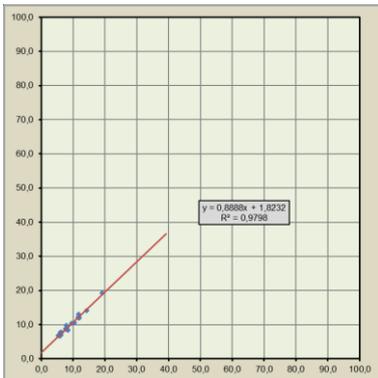


Grafik 65: Sensor A – Sensor B für Feb. 2019

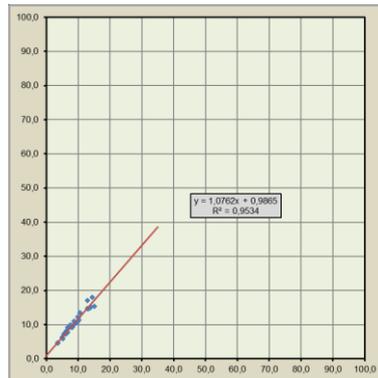


Grafik 66: Sensor A – Sensor B für März 2019

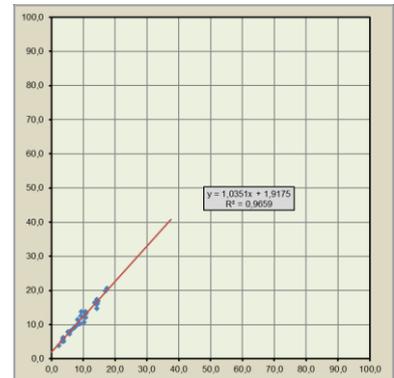
4.2.2.3 Vergleich der Tagesmittelwerte, Sensor C - Sensor D [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



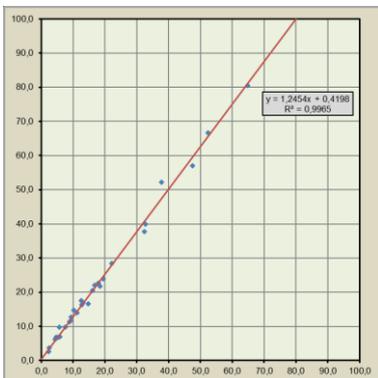
Grafik 67: Sensor C – Sensor D für Juli 2018



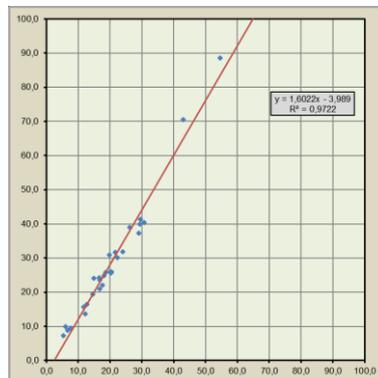
Grafik 68: Sensor C – Sensor D für Aug. 2018



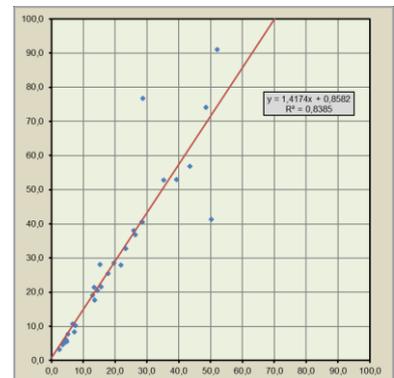
Grafik 69: Sensor C – Sensor D für Sep. 2018



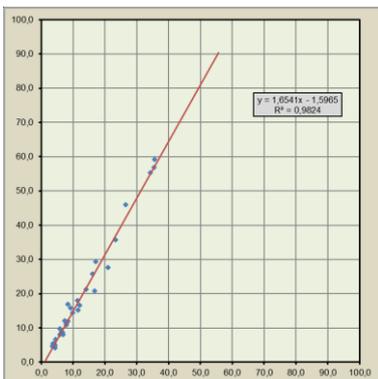
Grafik 70: Sensor C – Sensor D für Okt. 2018



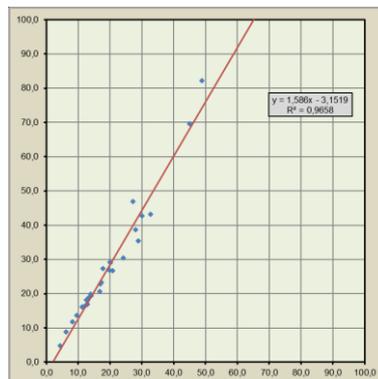
Grafik 71: Sensor C – Sensor D für Nov. 2018



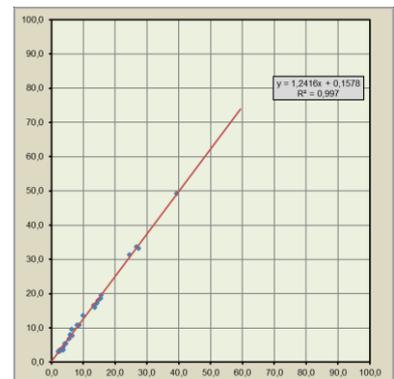
Grafik 72: Sensor C – Sensor D für Dez. 2018



Grafik 73: Sensor C – Sensor D für Jän. 2019



Grafik 74: Sensor C – Sensor D für Feb. 2019

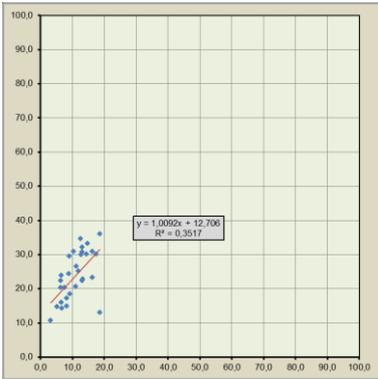


Grafik 75: Sensor C – Sensor D für März 2019

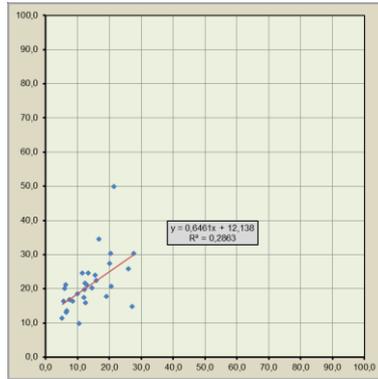
Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Korrelation der aus den Sensordaten ermittelten Tagesmittelwerte ist sehr gut
- Im Bereich des Nullpunktes liefern die aus den Sensordaten ermittelten Tagesmittelwerte ähnliche Werte
- Bei höheren Konzentrationen wird die Streuung der aus den Sensordaten ermittelten Tagesmittelwerte größer
- Generell werden aber deutlich unterschiedliche Tagesmittelwerte ermittelt (ergibt sich aus der Steigung der Ausgleichsgeraden)
- Relativaussagen sind nur bedingt möglich

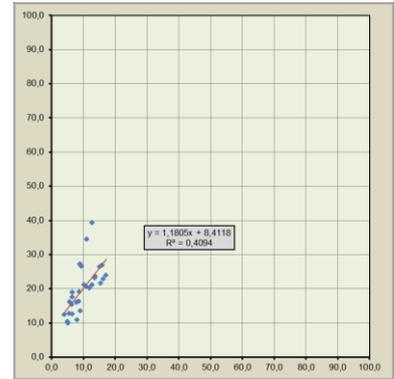
4.2.2.5 Vergleich der Tagesmittelwerte, Sensor A - kontinuierliche Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



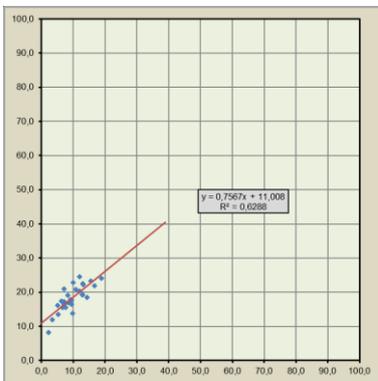
Grafik 76: Sensor A - Referenz für April 2018



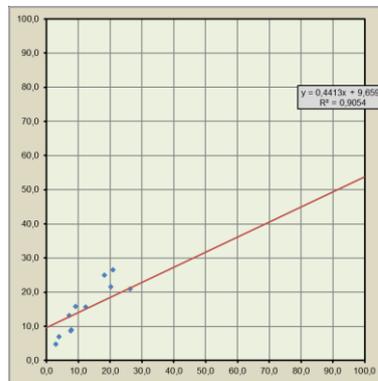
Grafik 77: Sensor A - Referenz für Mai 2018



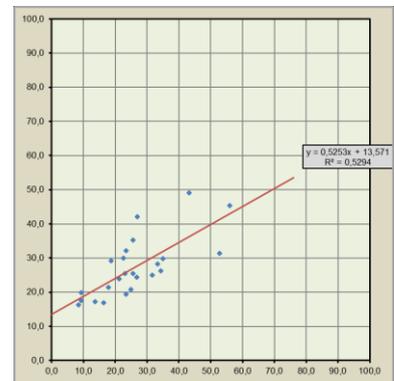
Grafik 78: Sensor A - Referenz für Juni 2018



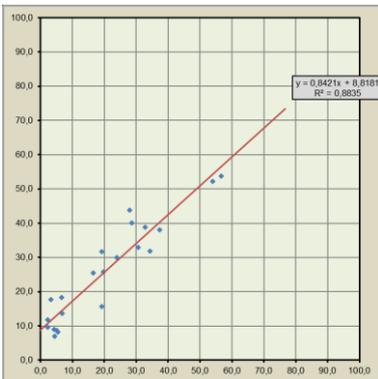
Grafik 79: Sensor A - Referenz für Juli 2018



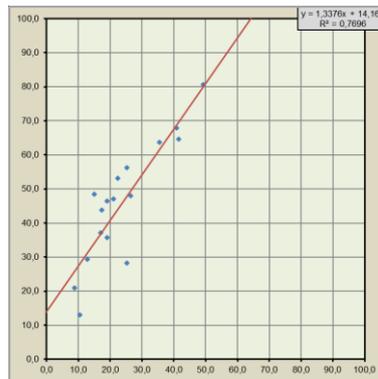
Grafik 80: Sensor A - Referenz für Okt. 2018



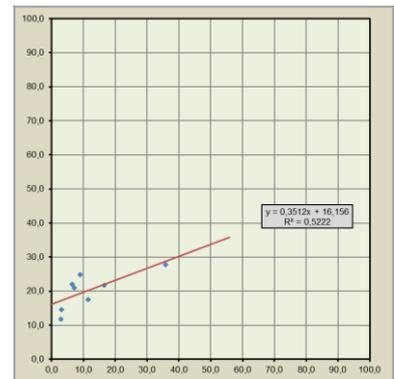
Grafik 81: Sensor A - Referenz für Nov 2018



Grafik 82: Sensor A - Referenz für Dez. 2018

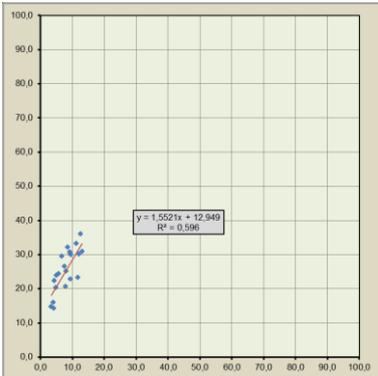


Grafik 83: Sensor A - Referenz für Feb. 2019

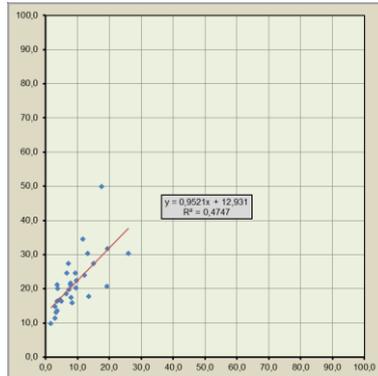


Grafik 84: Sensor A - Referenz für Mär. 2019

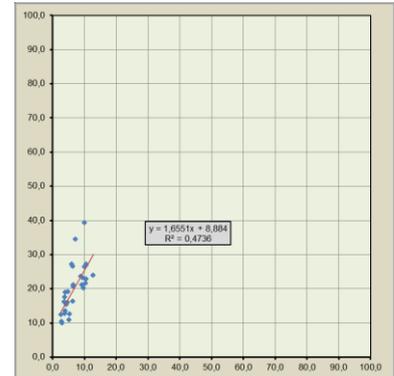
4.2.2.3 Vergleich der Tagesmittelwerte, Sensor B - kontinuierliche Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



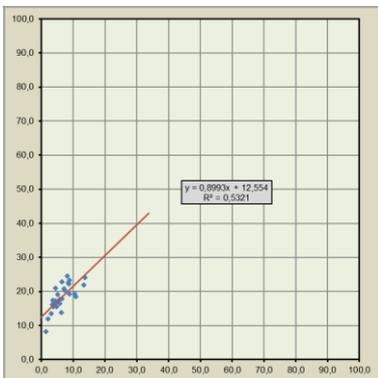
Grafik 85: Sensor B - Referenz für April 2018



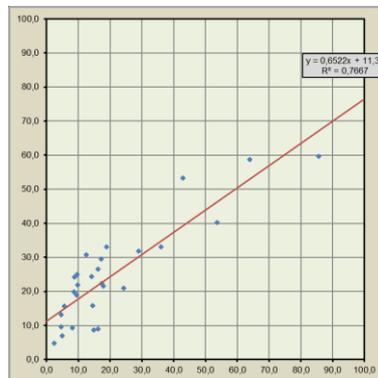
Grafik 86: Sensor B - Referenz für Mai 2018



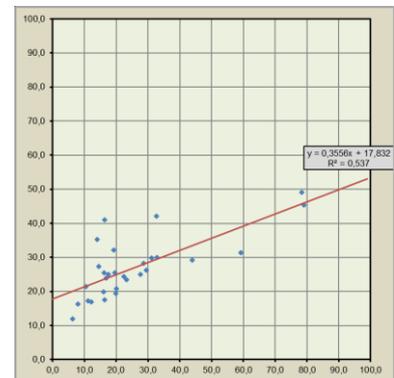
Grafik 87: Sensor B - Referenz für Juni 2018



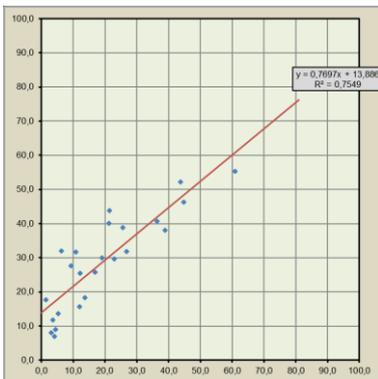
Grafik 88: Sensor B - Referenz für Juli 2018



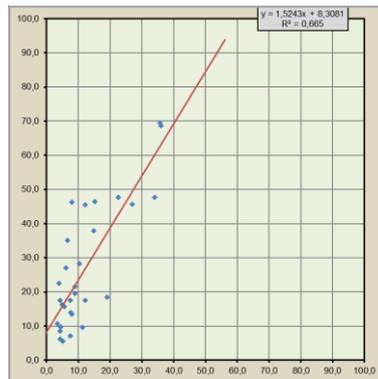
Grafik 89: Sensor B - Referenz für Okt 2018



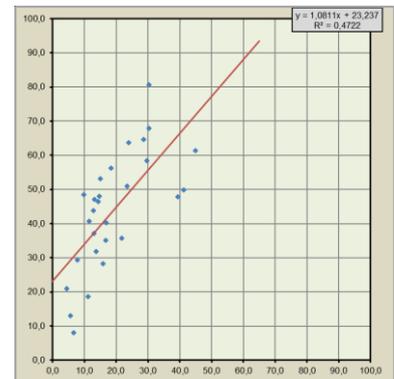
Grafik 90: Sensor B - Referenz für Juni 2019



Grafik 91: Sensor B - Referenz für Dez. 2018



Grafik 92: Sensor B - Referenz für Jän. 2019



Grafik 93: Sensor B - Referenz für Feb 2019

Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Staubsensoren liefern bei geringen Feinstaubkonzentrationen zu niedrige Werte (Ordinatenabstand)
- Die Steigungen der Ausgleichsgeraden ändern sich stark
- Generell liefern die Staubsensoren deutlich andere Feinstaubwerte als das Referenzmessverfahren
- Die Korrelation der Feinstaubwerte ist gut, ändert sich aber stark im Betrachtungszeitraum

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die getesteten Staubsensoren derzeit keine befriedigende Datenqualität liefern können. Die angezeigten Werte der Staubsensoren lassen keine seriösen Aussagen über die Luftqua-

lität zu. Halbstunden- und Tagesmittelwerte, die aus den aktuellen Anzeigewerten der Staubsensoren berechnet wurden, zeigen im Praxistest einen unbefriedigenden Zusammenhang mit Messwerten des Referenzmessverfahrens. Daraus kann aber auch geschlossen werden, dass die aktuellen Anzeigewerte der Staubsensoren derzeit bestenfalls in den Bereich „Schätzungen“ eingestuft werden können. Positive Ansätze sind in der doch guten Korrelation von angezeigten Staubwerten getesteten Sensoren zu sehen.

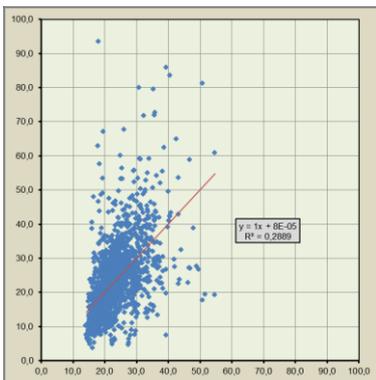
Problematisch ist dieses Ergebnis insofern, da die Sensorwerte in der Internetanzeige farblich graduiert auf den Tagesgrenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dargestellt werden. Der Nutzer kann sich aber nicht darauf verlassen, dass die dort angezeigte Luftqualität auch mit der tatsächlichen übereinstimmt.

4.2.3 **Korrektur von Sensordaten und rechnerischer Bezug auf das Referenzmessverfahren**

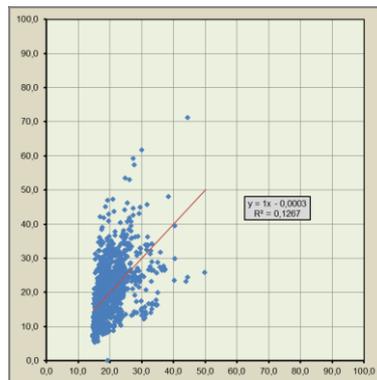
4.2.3.1 **Grundlagen**

Es stellt sich natürlich die Frage, ob Sensordaten korrigiert und durch Bezug auf das Referenzmessverfahren die Datenqualität der Sensoren verbessert werden kann. Ansatz könnte sein, dass bei einer Immissionsmessstation im Messgebiet ein „Korrekturfaktor“ ermittelt wird, mit dem die Sensordaten verrechnet werden. Ein generelles Problem für die Verrechnung stellt der bei den Vergleichstests mit dem Referenzmessverfahren festgestellte Ordinatenabstand (in diesem Bereich sind bei Messwertkorrektur die Sensoren dann „blind“) und die stark unterschiedlichen Steigungen der Ausgleichsgeraden dar. Für die Datenkorrektur wurden Halbstundenmittelwerte gewählt, da diese die größte verfügbare Auflösung der Datenpaare darstellen.

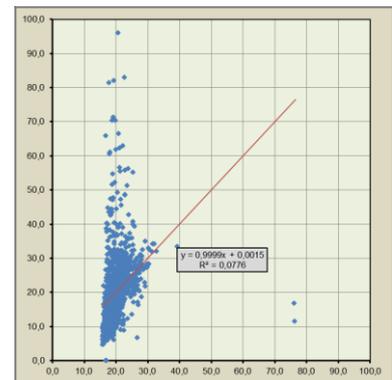
4.2.3.2 **Vergleich der Halbstundenmittelwerte, Sensor A_k korrigiert - kontinuierlicher Feinstaubmessung (Grimm) [µg/m³]**



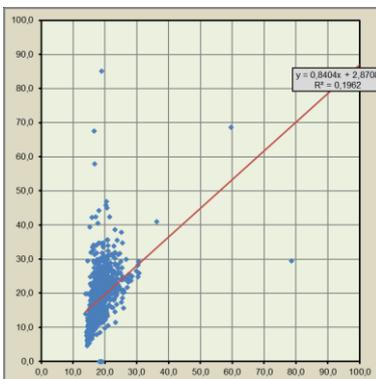
Faktor: 0,9553xSensoranzeige+13
Grafik 95: Sensor A_k - Referenz für April 2018



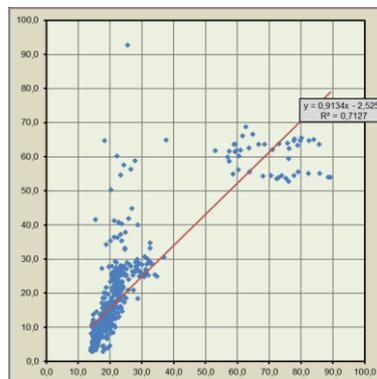
Faktor: 0,4572xSensoranzeige+13
Grafik 96: Sensor A_k - Referenz für Mai 2018



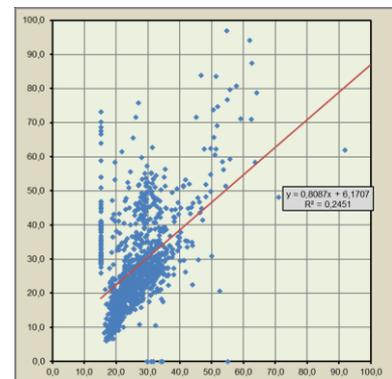
Faktor: 0,4933xSensoranzeige+15
Grafik 97: Sensor A_k - Referenz für Juni 2018



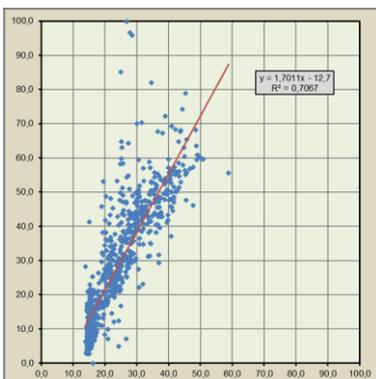
Faktor: 0,4572xSensoranzeige+14
Grafik 98: Sensor A_k - Referenz für Juli 2018



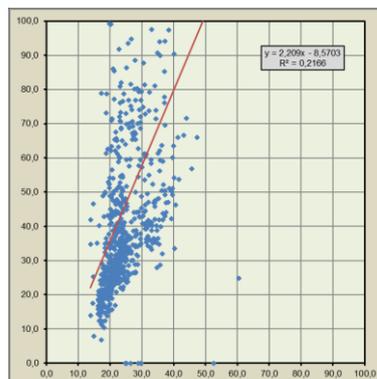
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16
Grafik 99: Sensor A_k - Referenz für Okt. 2018



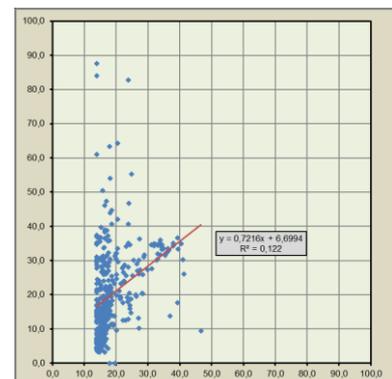
Faktor: 0,4933xSensoranzeige+15
Grafik 100: Sensor A_k - Referenz für Nov. 2018



Faktor: 0,4572xSensoranzeige+14
Grafik 101: Sensor A_k - Referenz für Dez 2018

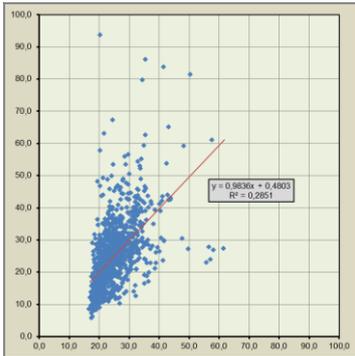


Faktor: 0,4572xSensoranzeige+14
Grafik 102: Sensor A_k - Referenz für Feb. 2019



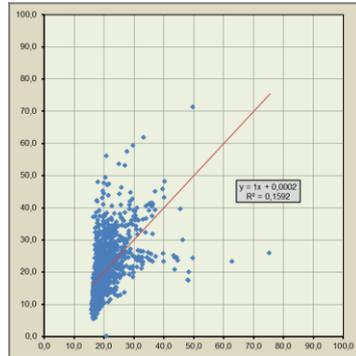
Faktor: 0,4572xSensoranzeige+14
Grafik 103: Sensor A_k - Referenz für März 2019

4.2.3.3 Vergleich der Halbstundenmittelwerte, Sensor B_k korrigiert - kontinuierlicher Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



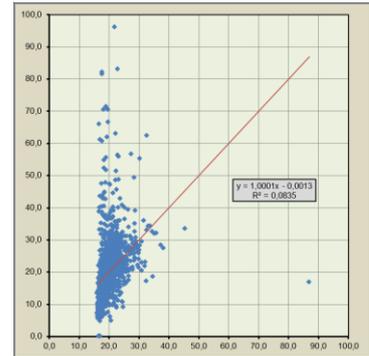
Faktor: 1,138xSensoranzeige+16

Grafik 104: Sensor B_k - Referenz für April 2018



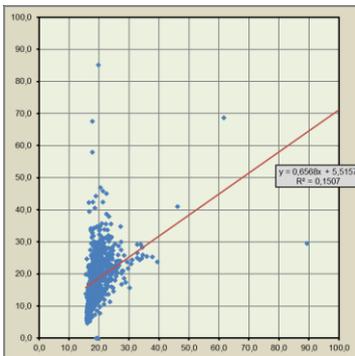
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 105: Sensor B_k - Referenz für Mai 2018



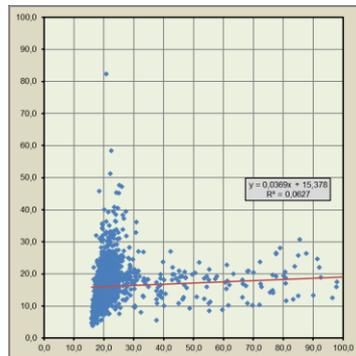
Faktor: 0,654xSensoranzeige+16

Grafik 106: Sensor B_k - Referenz für Juni 2018



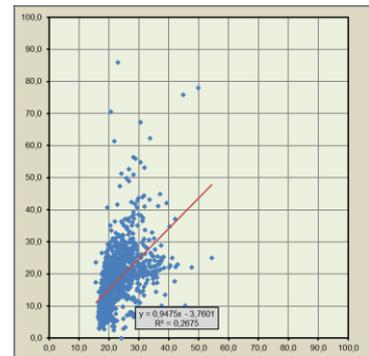
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 107: Sensor B_k - Referenz für Juli 2018



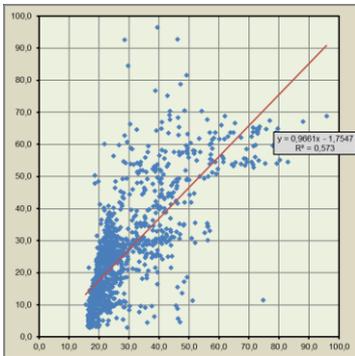
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 108: Sensor B_k - Referenz für Aug. 2018



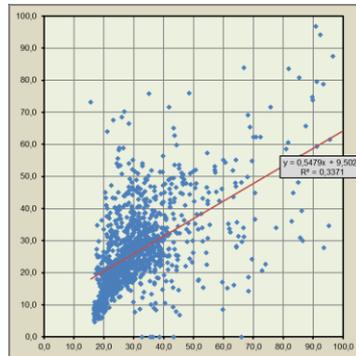
Faktor: 0,654xSensoranzeige+16

Grafik 109: Sensor B_k - Referenz für Sep. 2018



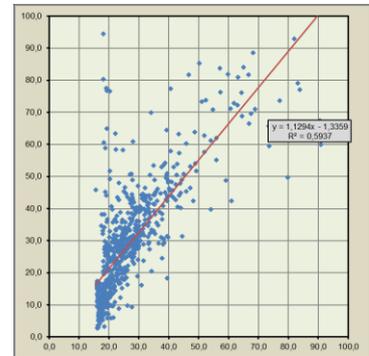
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 110: Sensor B_k - Referenz für Okt. 2018



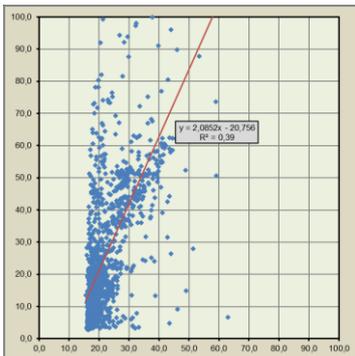
Faktor: 0,654xSensoranzeige+16

Grafik 111: Sensor B_k - Referenz für Nov.. 2018



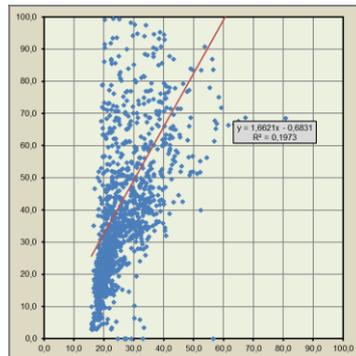
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 112: Sensor B_k - Referenz für Dez. 2018



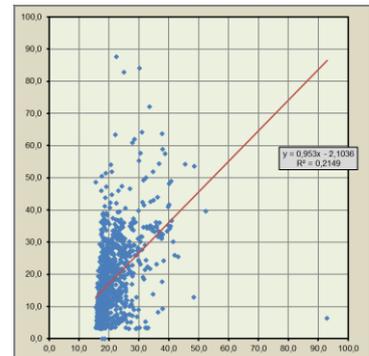
Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 113: Sensor B_k - Referenz für Jän. 2019



Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 114: Sensor B_k - Referenz für Feb. 2019



Faktor: 0,5783xSensoranzeige+16

Grafik 115: Sensor B_k - Referenz für März 2019

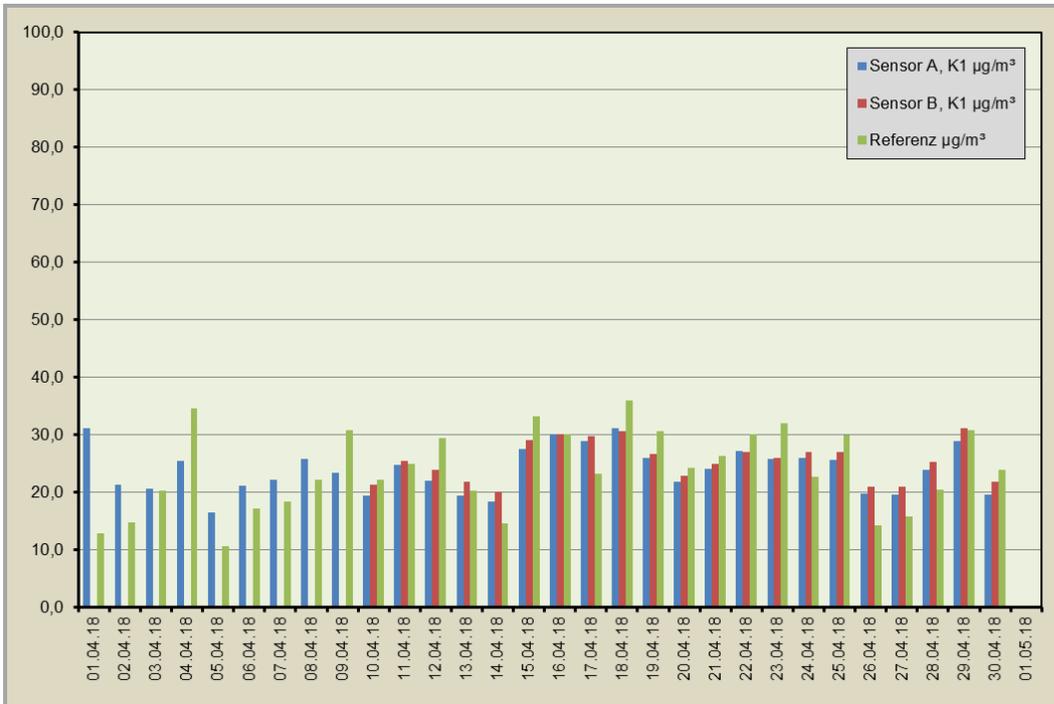
Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Korrelationen der Feinstaubwerte ändern sich stark
- Die Korrekturfaktoren ändern sich stark und sind nicht konstant
- Staubsensoren haben bei Korrektur der Sensordaten eine Mindestanzeige
- Die Steigungen der Ausgleichsgerade ändern sich stark
- Die Staubsensoren liefern auch bei Korrektur deutlich andere Feinstaubwerte als das Referenzmessverfahren

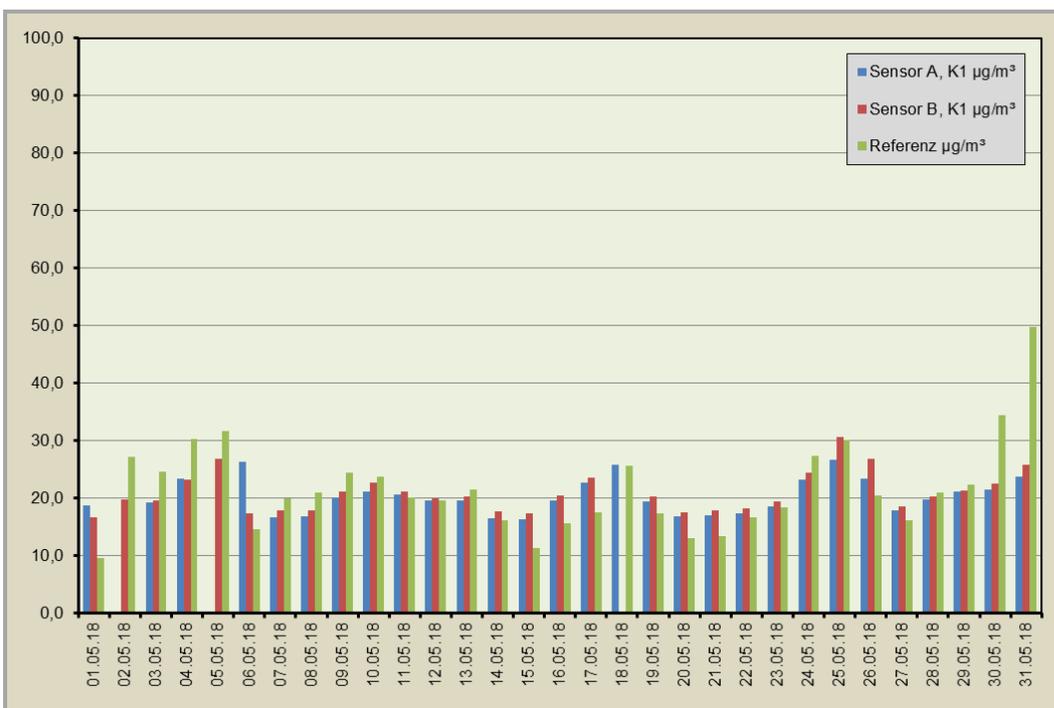
4.2.4 Vergleich von Tagesmittelwerten bei korrigierten Sensordaten

4.2.4.1 Korrigierte Feinstaubmesswerte der Sensoren A, B und Werte des Referenzmessverfahrens (Station Römerberg)

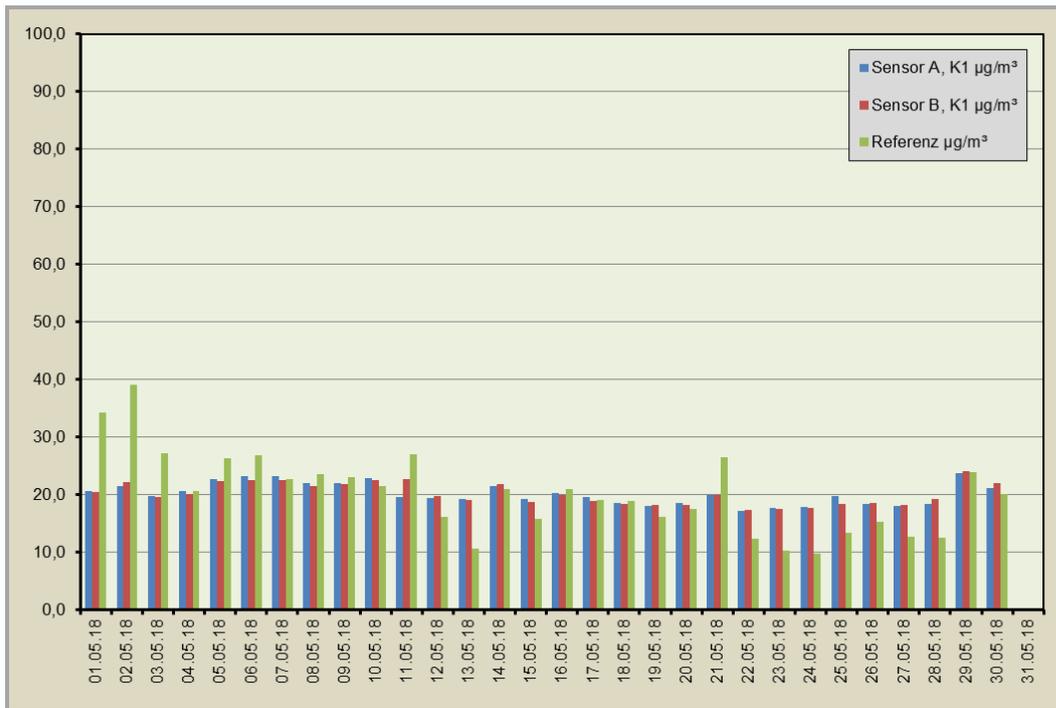
Aus den korrigierten Halbstundenmittelwerten wurde Tagesmittelwerten berechnet. (wird von den Anwendern üblicherweise nicht durchgeführt, da Kurzzeitwerte betrachtet werden):



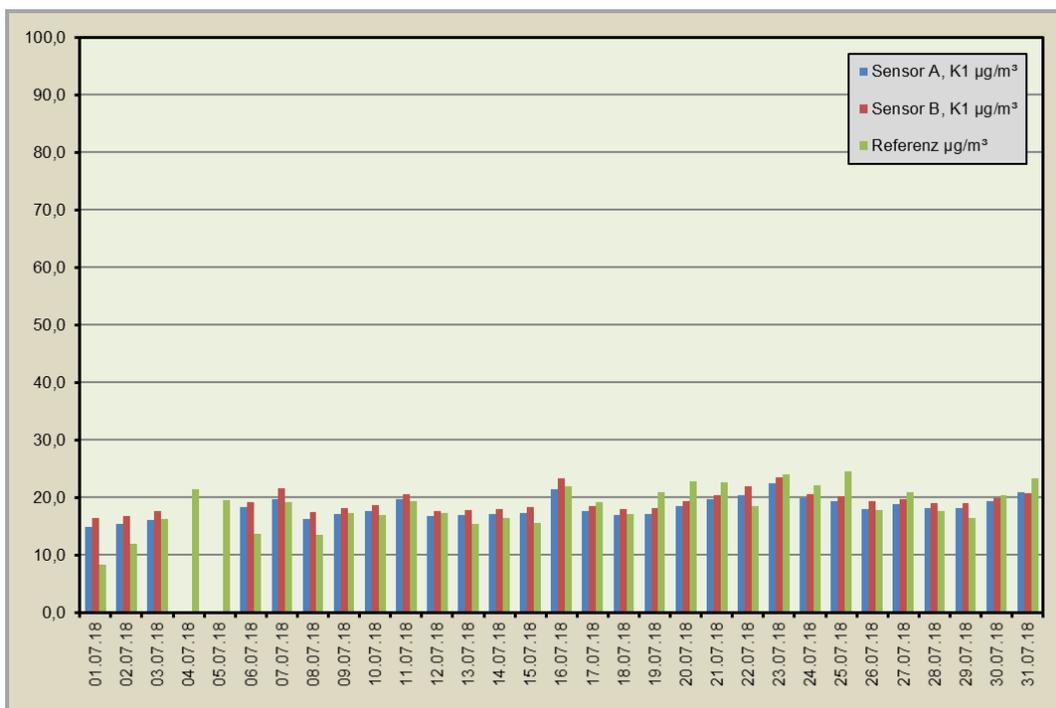
Grafik 116: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für April 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



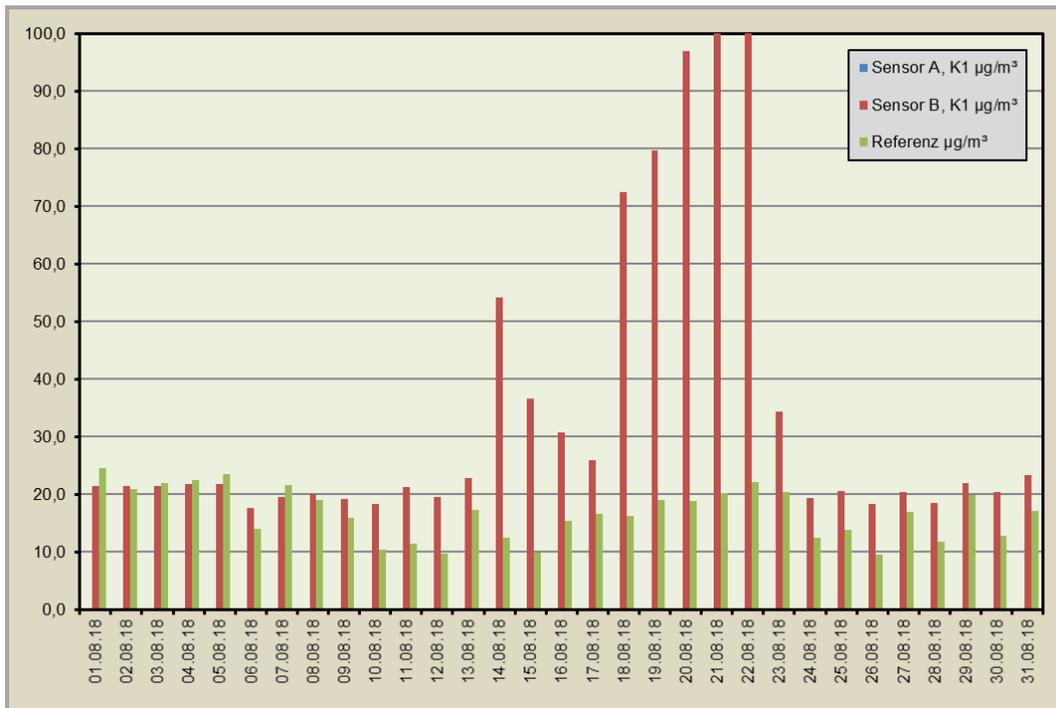
Grafik 117: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Mai 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



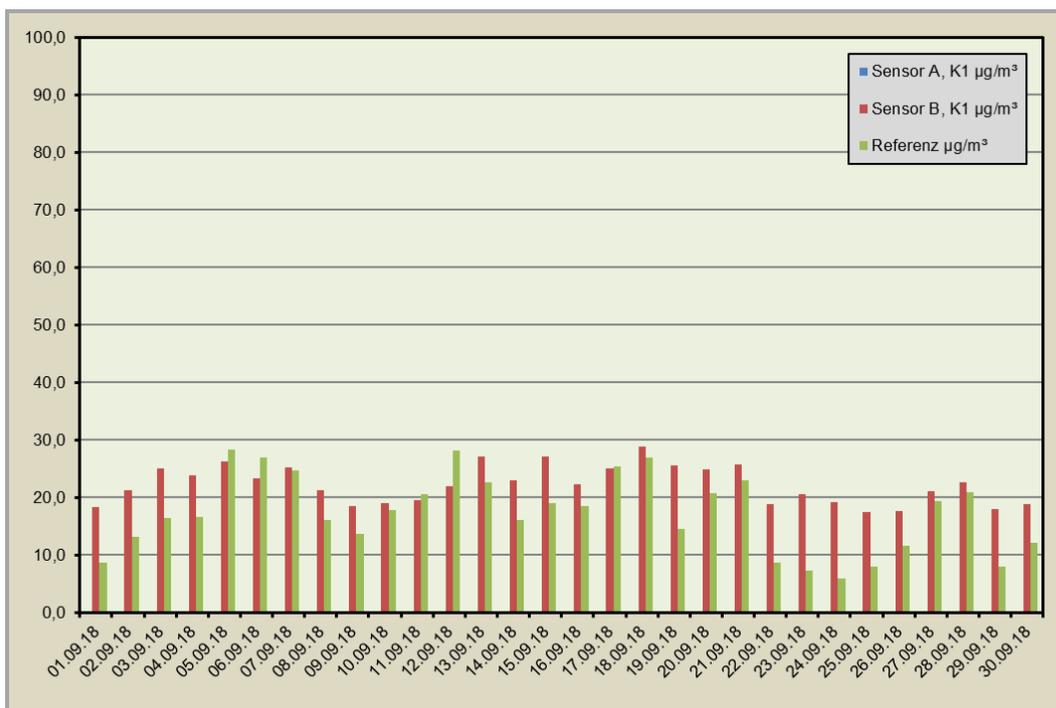
Grafik 118: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Juni 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



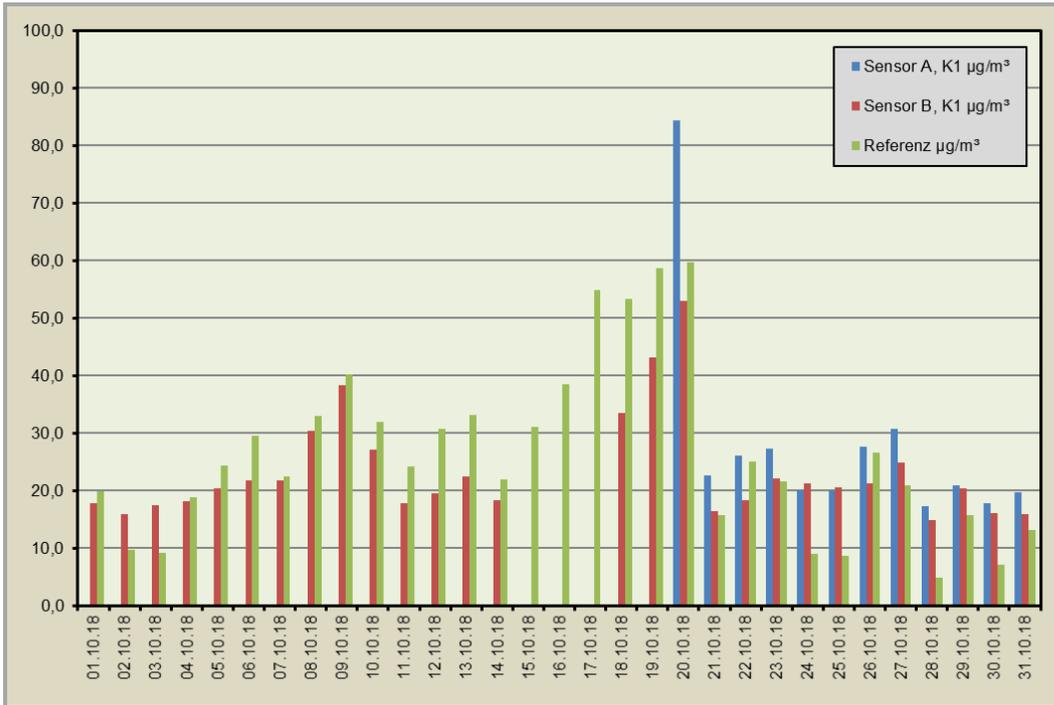
Grafik 119: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Juli 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



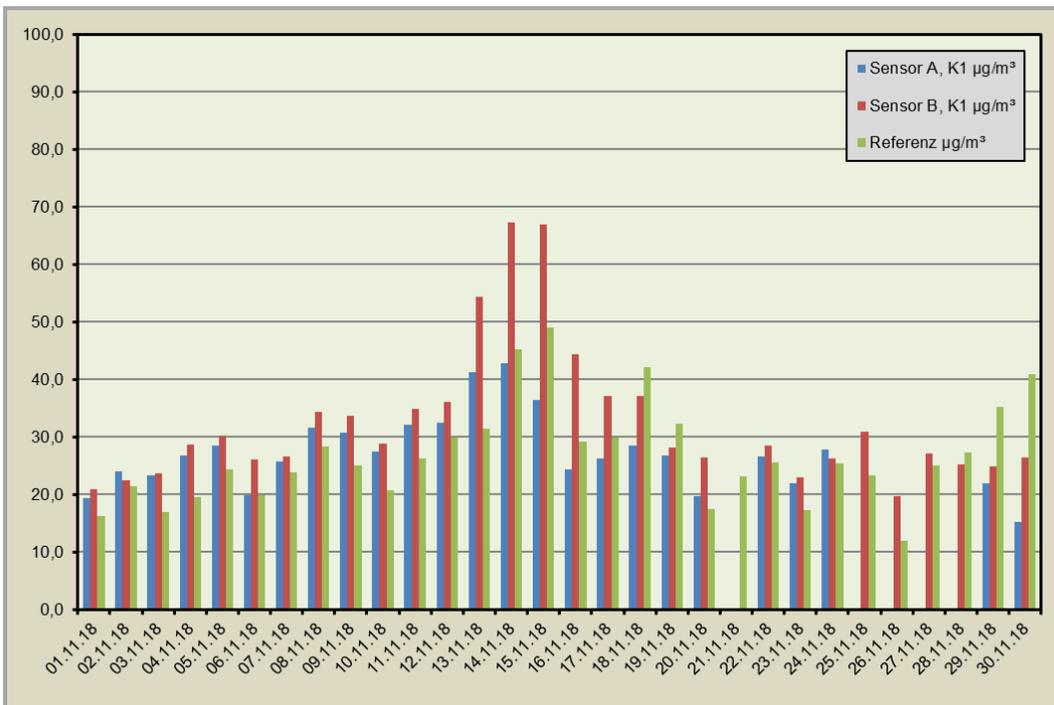
Grafik 120: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für August 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



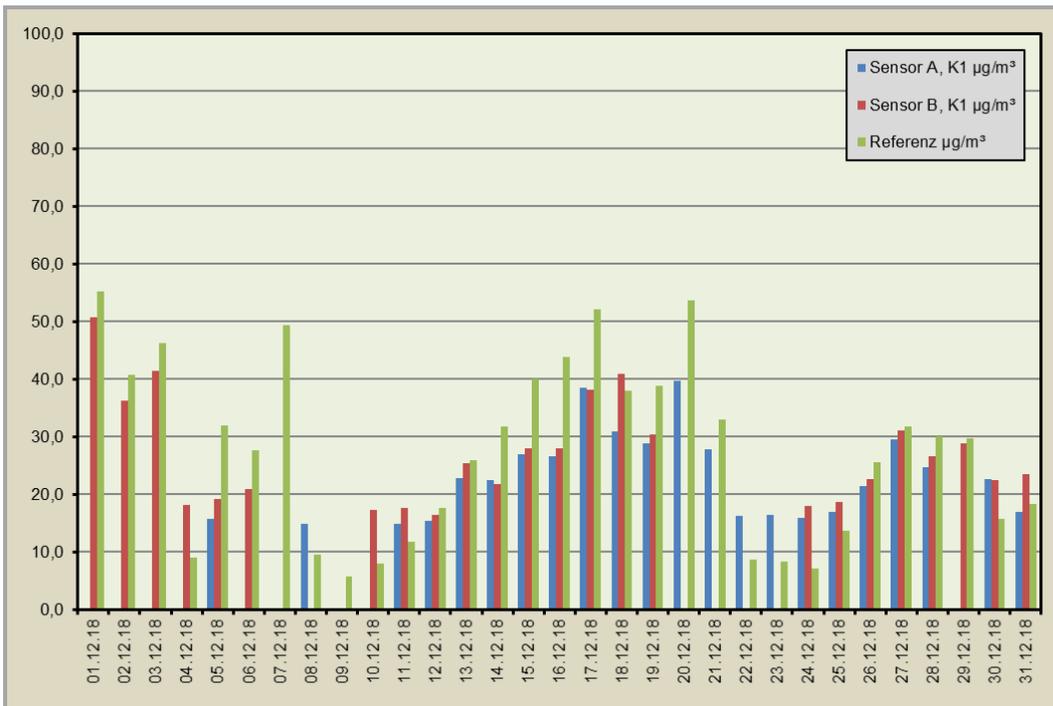
Grafik 121: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für September 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



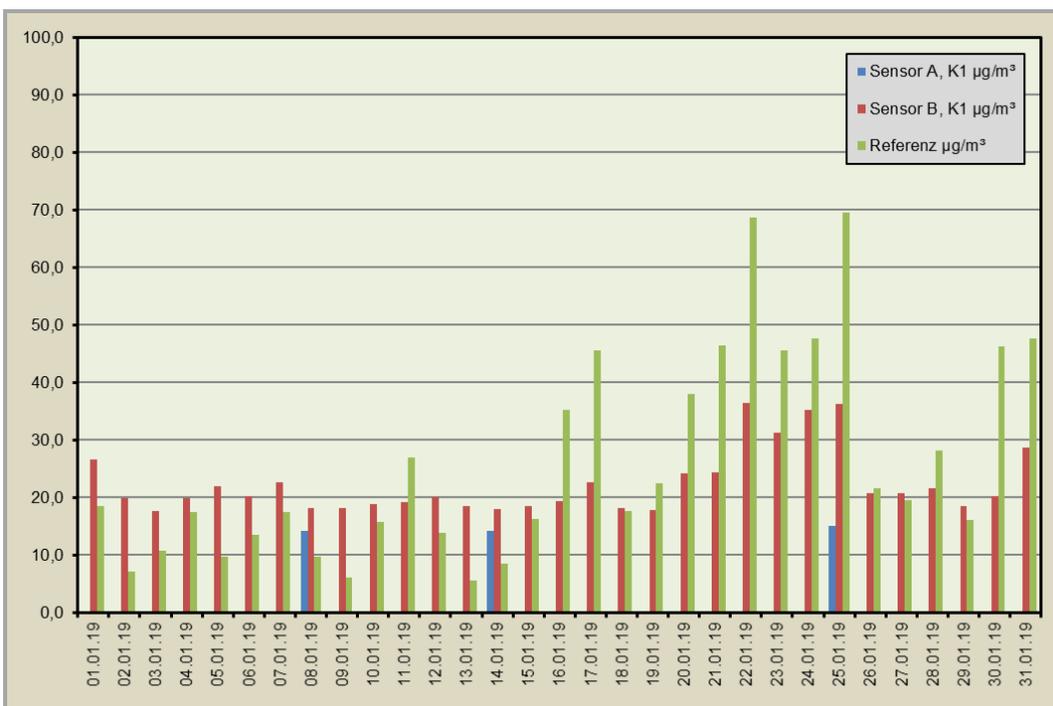
Grafik 122: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Oktober 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



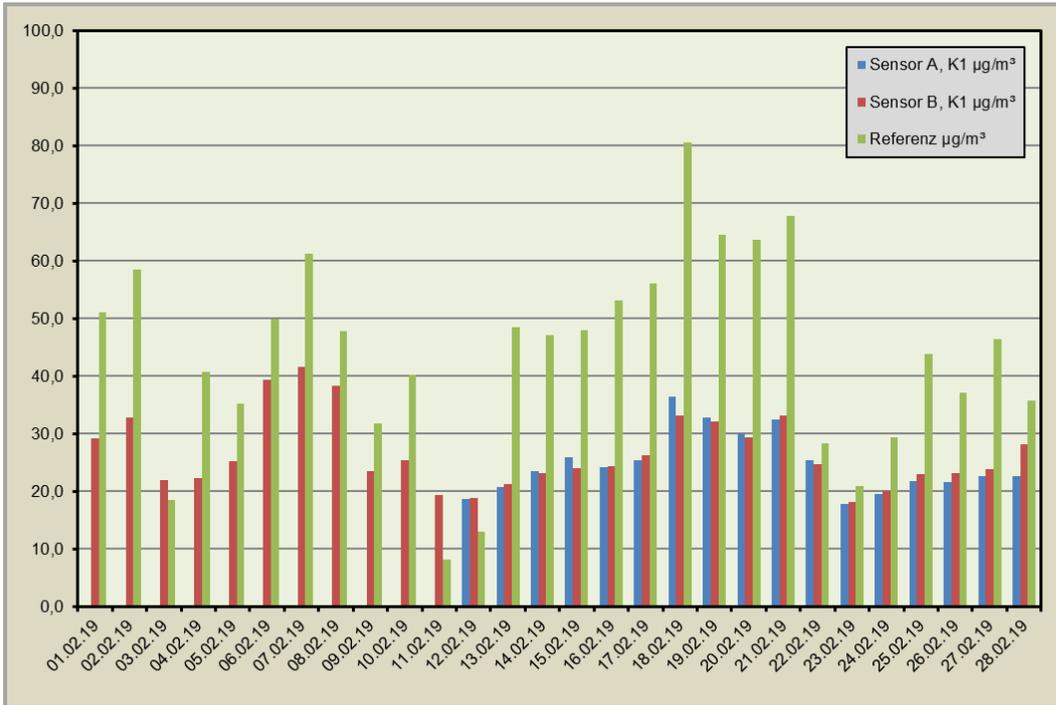
Grafik 123: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für November 2018 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



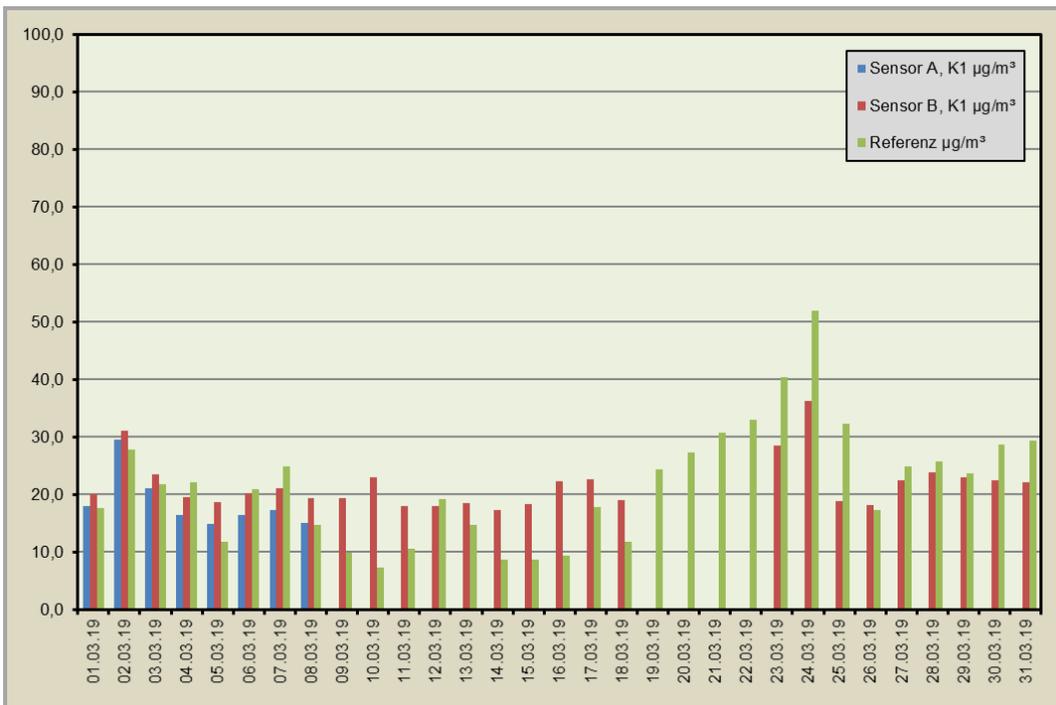
Grafik 124: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Dezember 2018 [µg/m³]



Grafik 125: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Jänner 2019 [µg/m³]

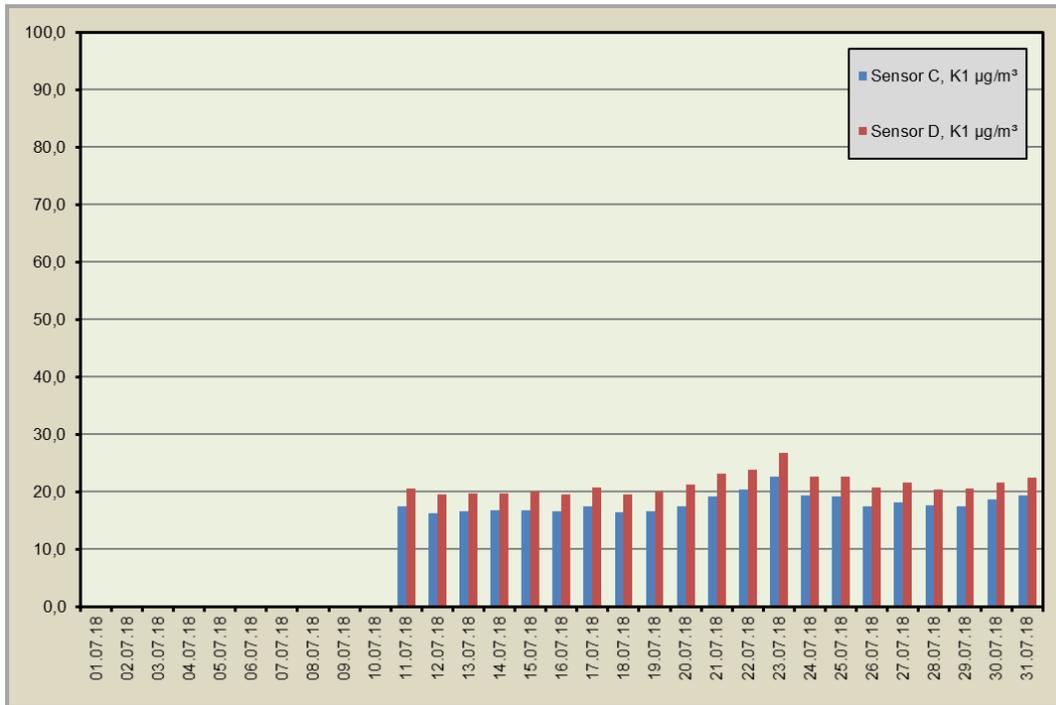


Grafik 126: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für Februar 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

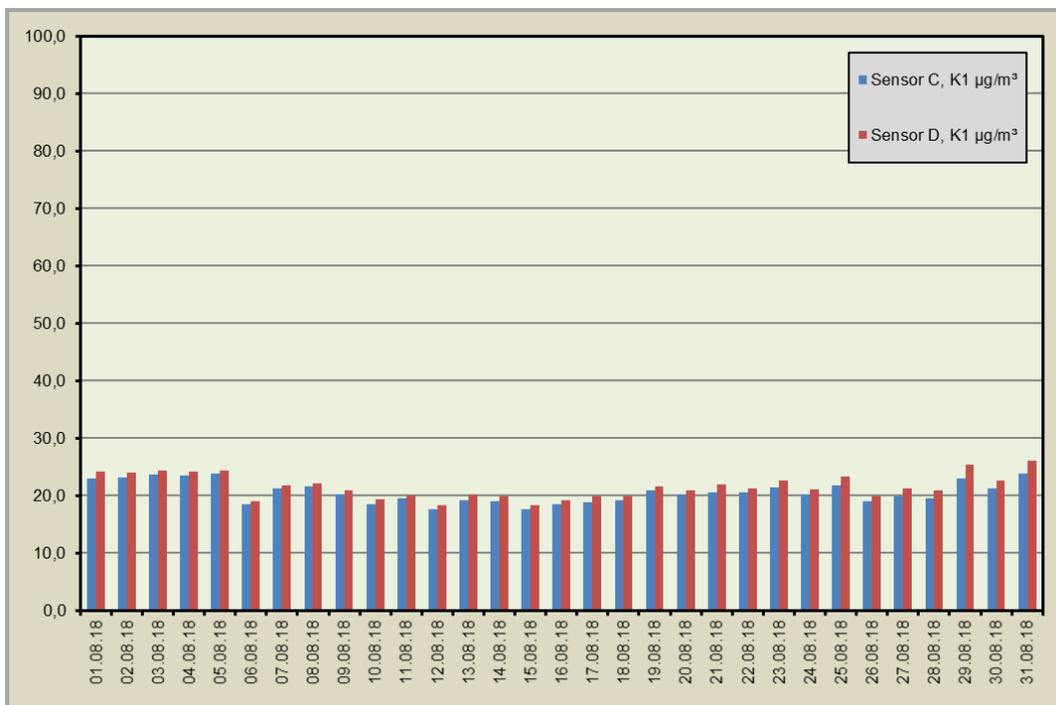


Grafik 127: Tagesmittelwerte aus den korrigierten Sensordaten für die Halbstundenmittelwerte, für März 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

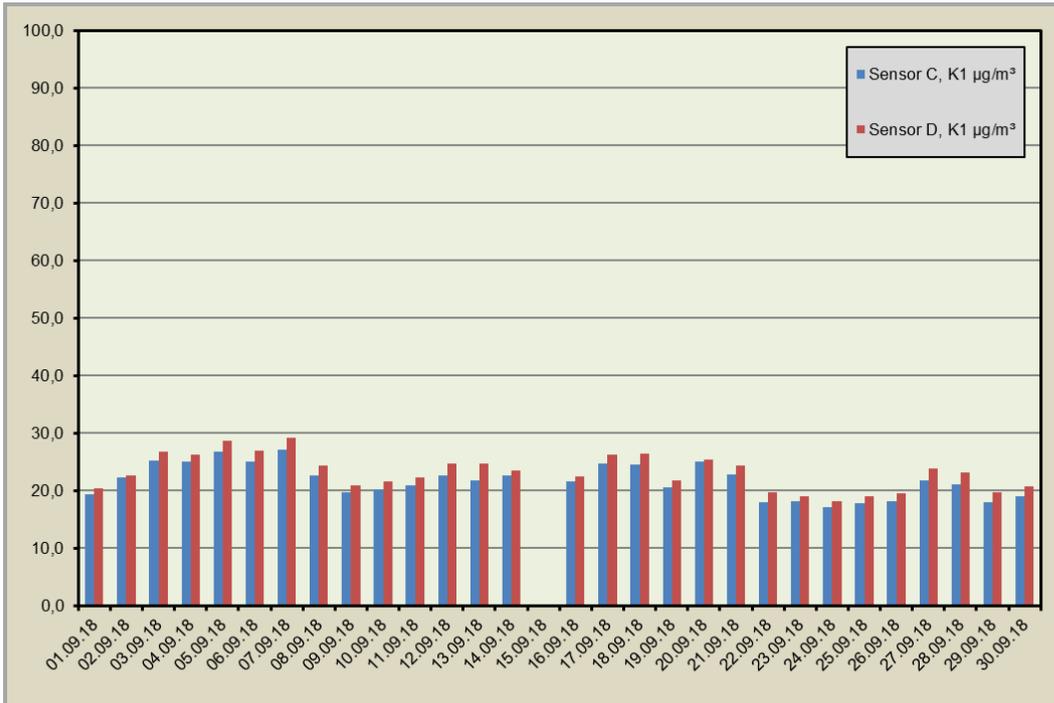
4.2.4.2 Korrigierte Feinstaubmesswerte der Sensoren C und D (Station Neues Rathaus)



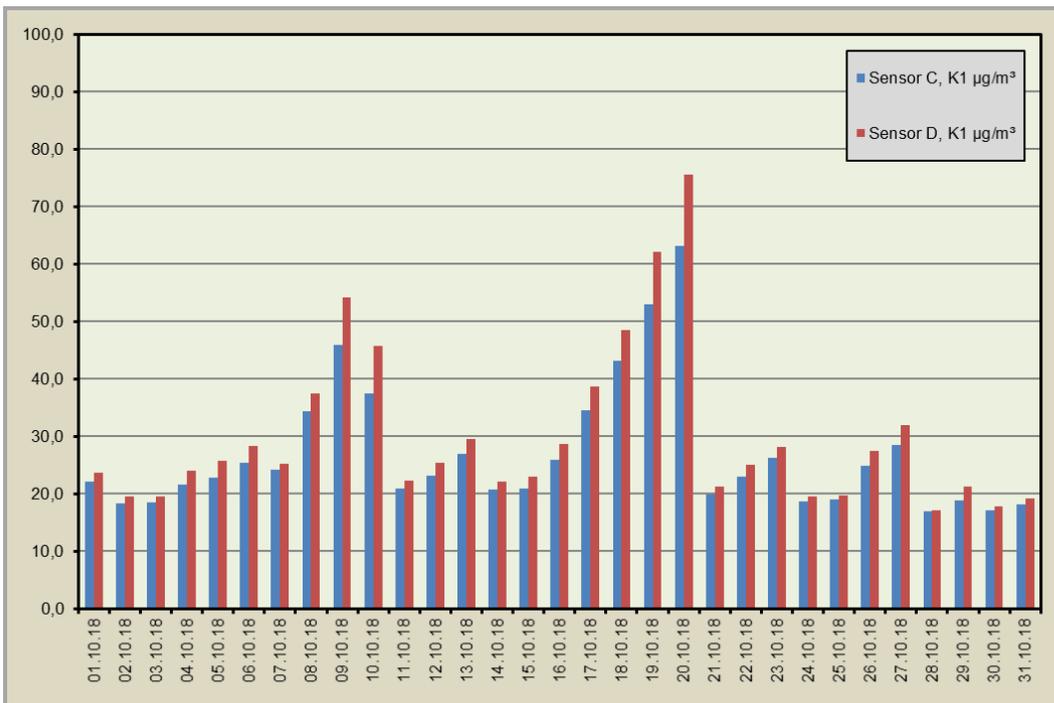
Grafik 128: Tagesmittelwerte für Juli 2018 [µg/m³]



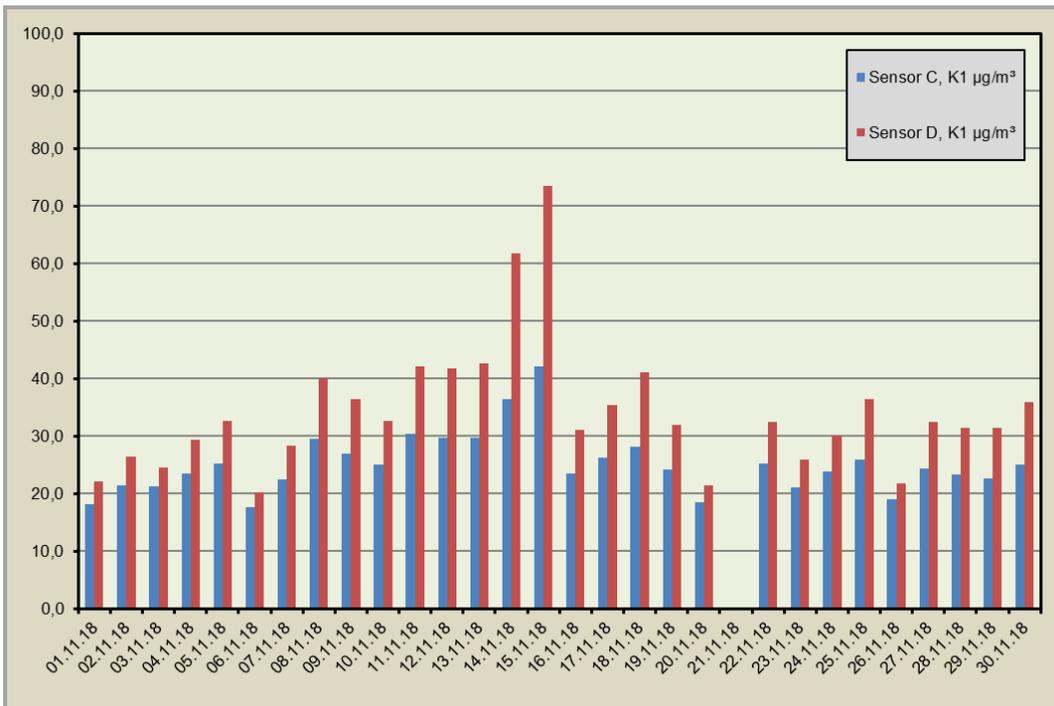
Grafik 129: Tagesmittelwerte für August 2018 [µg/m³]



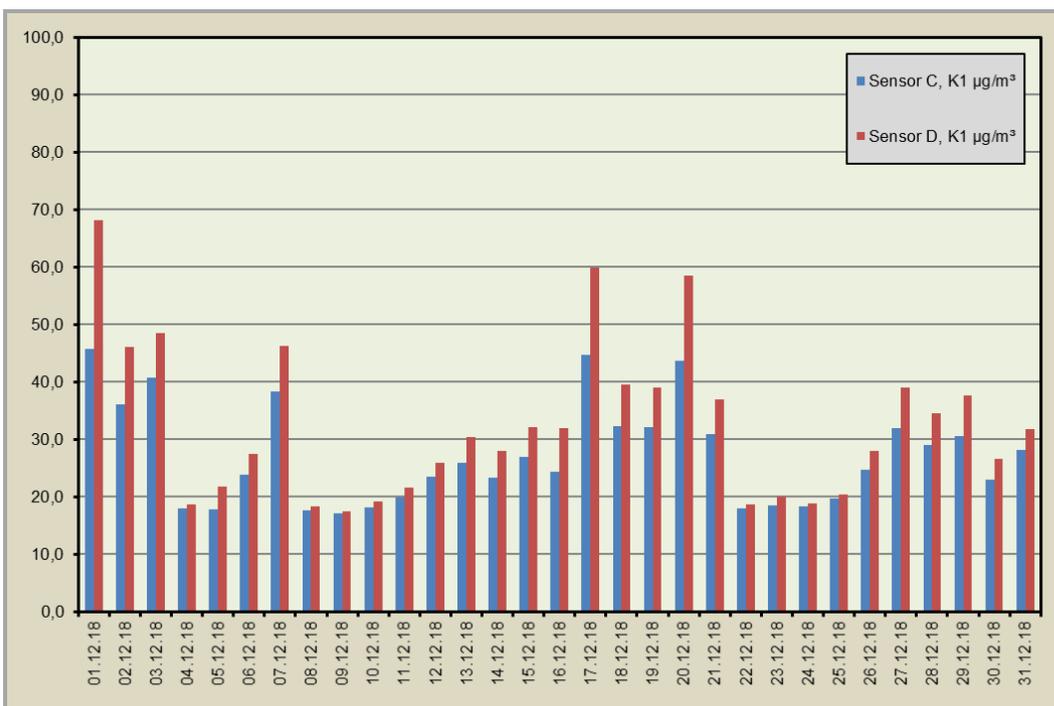
Grafik 130: Tagesmittelwerte für September 2018 [µg/m³]



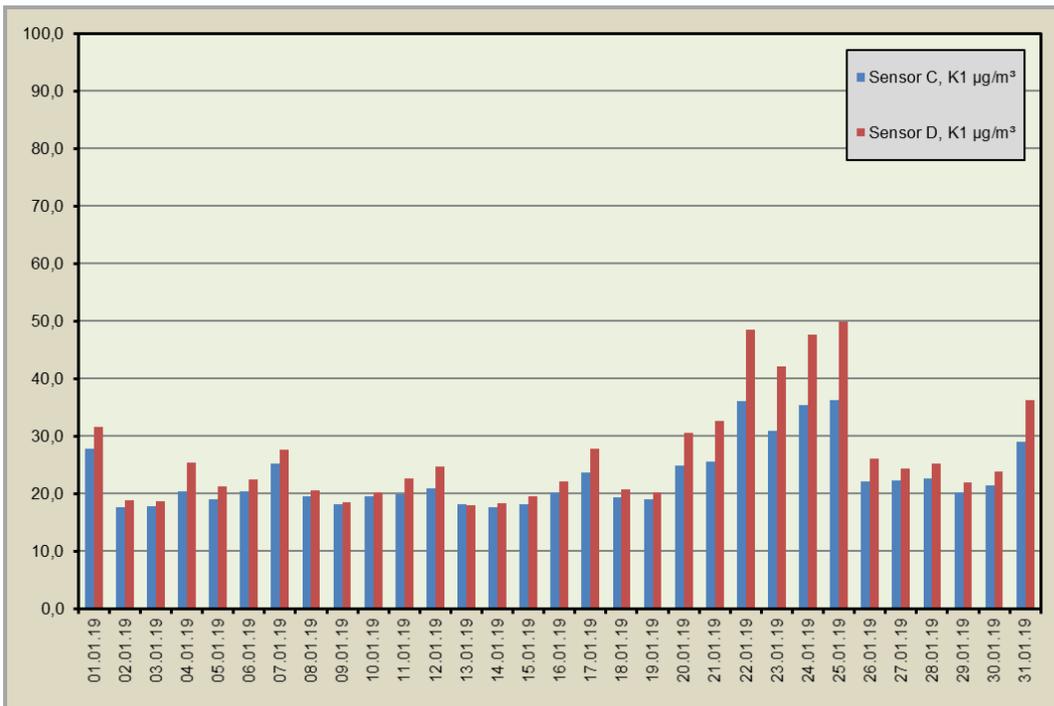
Grafik 131: Tagesmittelwerte für Oktober 2018 [µg/m³]



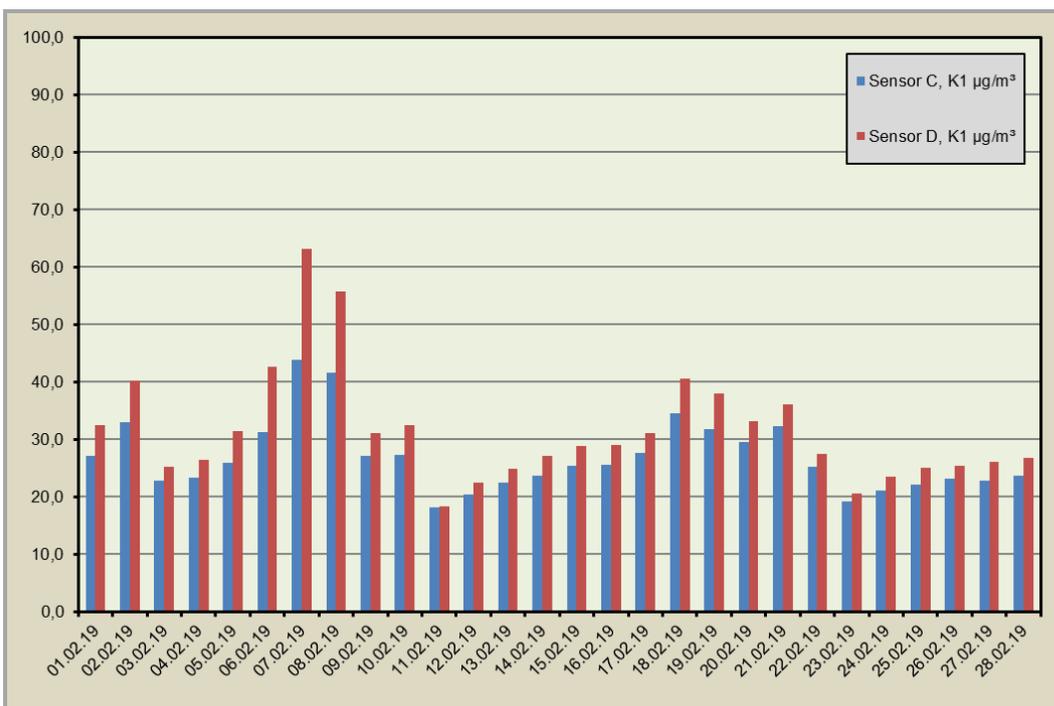
Grafik 132: Tagesmittelwerte für November 2018 [µg/m³]



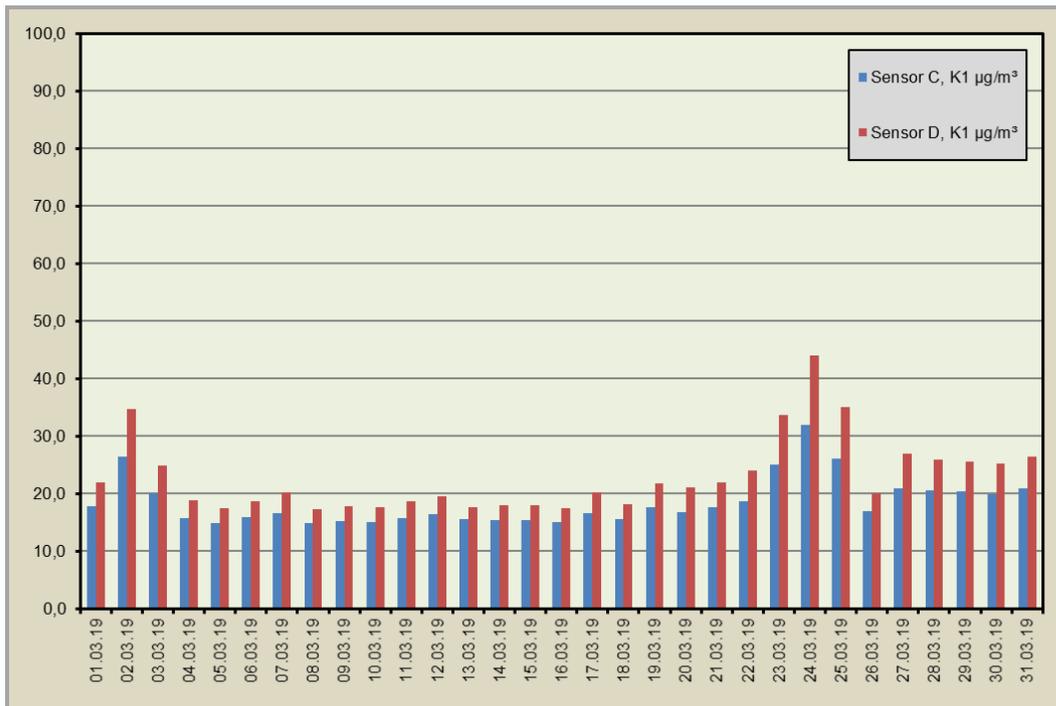
Grafik 133: Tagesmittelwerte für Dezember 2018 [µg/m³]



Grafik 134: Tagesmittelwerte für Jänner 2019 [µg/m³]



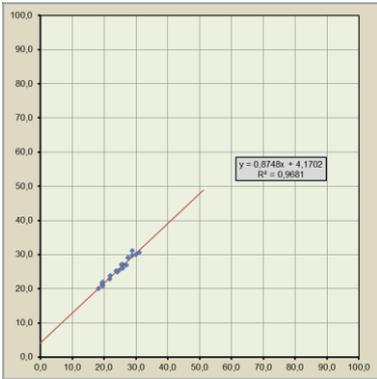
Grafik 135: Tagesmittelwerte für Februar 2019 [µg/m³]



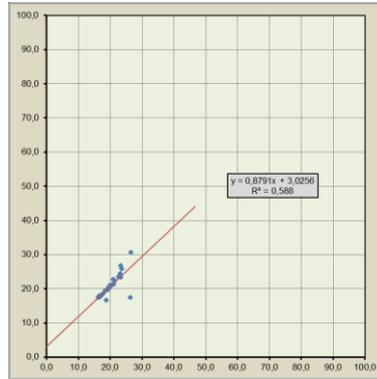
Grafik 136: Tagesmittelwerte für März 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Die aus den korrigierten Halbstundenmittelwerten der Sensoren ermittelten Tagesmittelwerte erzielen auch keine befriedigende Übereinstimmung mit dem Referenzmessverfahren.

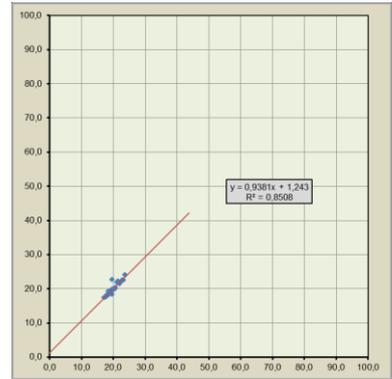
4.2.4.3 Vergleich der korrigierten Tagesmittelwerte, Sensor A kor. - Sensor B kor. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



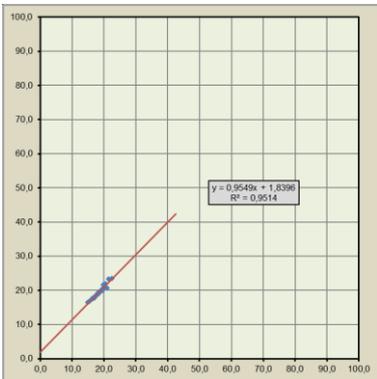
Grafik 137: Sensor Ak – Sensor Bk für April 2018



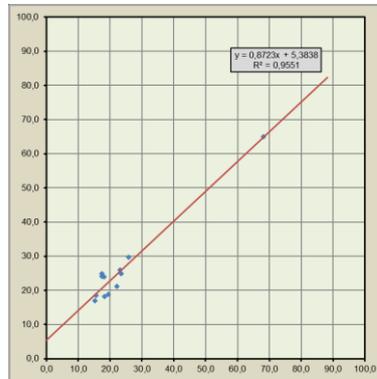
Grafik 138: Sensor Ak – Sensor Bk für Mai 2018



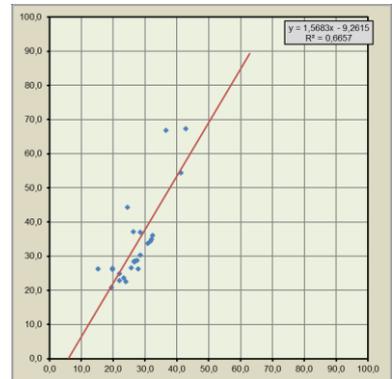
Grafik 139: Sensor Ak – Sensor Bk für Juni 2018



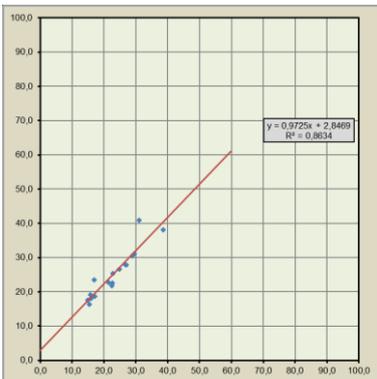
Grafik 140: Sensor Ak – Sensor Bk für Juli 2018



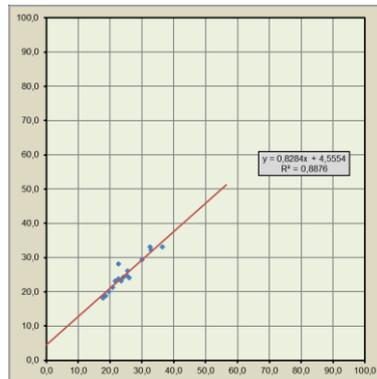
Grafik 141: Sensor Ak – Sensor Bk für Okt. 2018



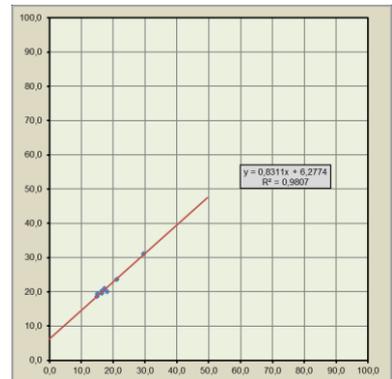
Grafik 142: Sensor Ak – Sensor Bk für Nov. 2018



Grafik 143: Sensor Ak – Sensor Bk für Dez. 2018

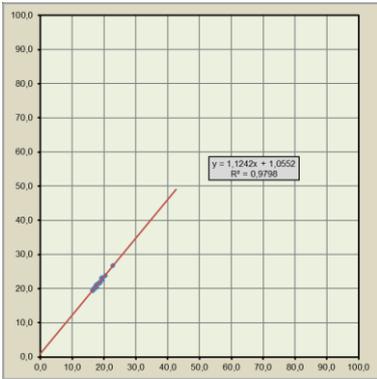


Grafik 144: Sensor Ak – Sensor Bk für Feb. 2019

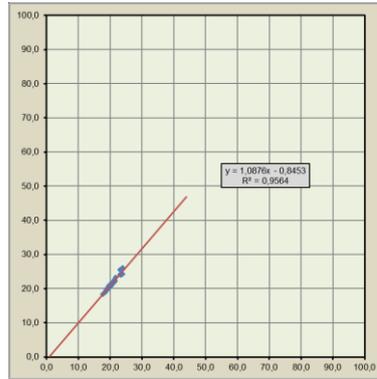


Grafik 145: Sensor Ak – Sensor Bk für März 2019

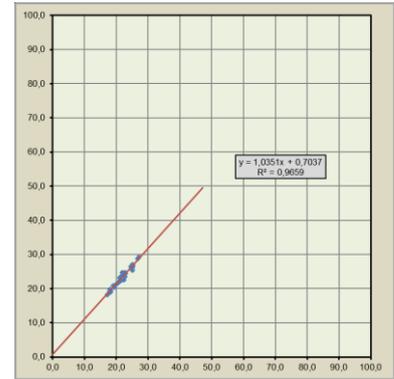
4.2.4.4 Vergleich der korrigierten Tagesmittelwerte, Sensor C kor. - Sensor D kor. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



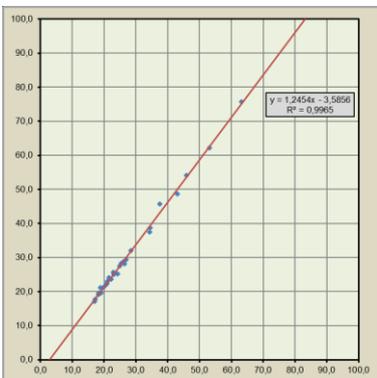
Grafik 146: Sensor Ck – Sensor Dk für Jul. 2018



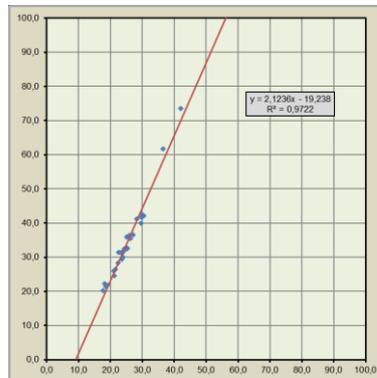
Grafik 147: Sensor Ck – Sensor Dk für Aug. 2018



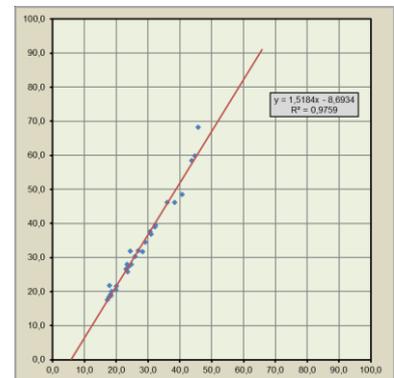
Grafik 148: Sensor Ck – Sensor Dk für Sep. 2018



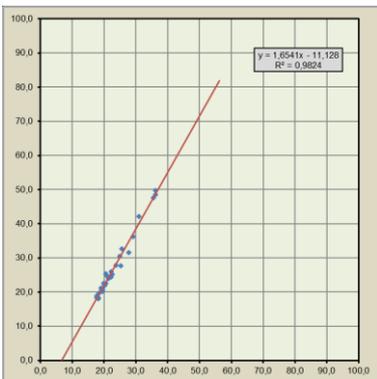
Grafik 149: Sensor Ck – Sensor Dk für Okt. 2018



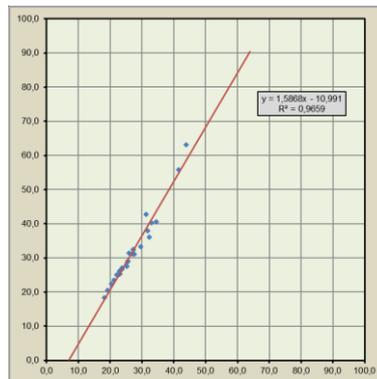
Grafik 150: Sensor Ck – Sensor Dk für Nov. 2018



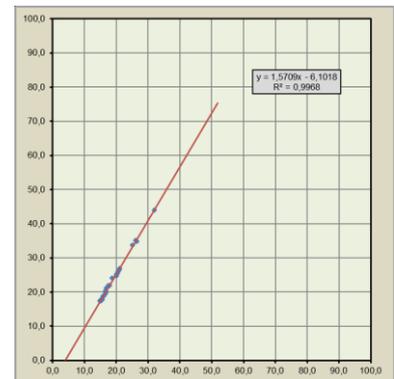
Grafik 151: Sensor Ck – Sensor Dk für Dez. 2018



Grafik 152: Sensor Ck – Sensor Dk für Jän. 2019



Grafik 153: Sensor Ck – Sensor Dk für Feb. 2019

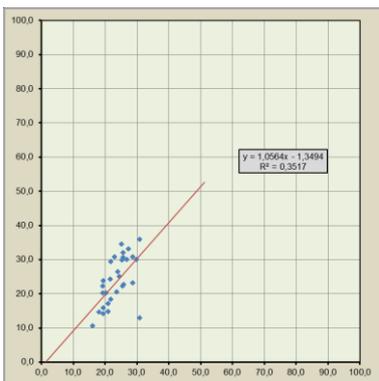


Grafik 154: Sensor Ck – Sensor Dk für Mär. 2019

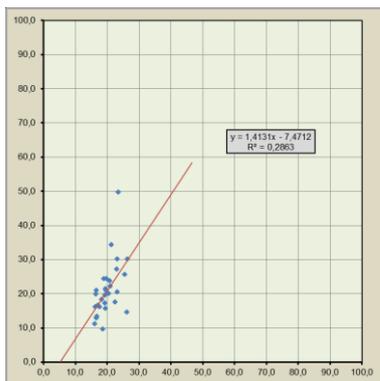
Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Korrelation der aus den Sensordaten ermittelten Tagesmittelwerte ist sehr gut.
- Ausgleichsgerade schneidet meist nicht den Nullpunkt.
- Generell werden aber auch bei den korrigierten Sensordaten deutlich unterschiedliche Tagesmittelwerte ermittelt (ergibt sich aus der Steigung der Ausgleichsgeraden).
- Relativaussagen sind auch hier nur bedingt möglich

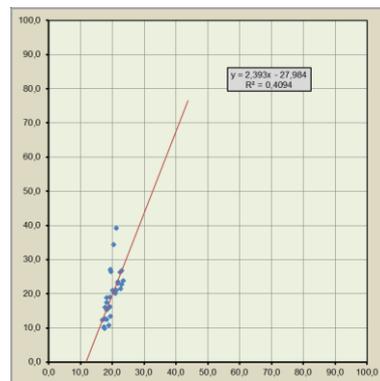
4.2.4.5 Vergleich der korrigierten Tagesmittelwerte, Sensor A kor. - kontinuierliche Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



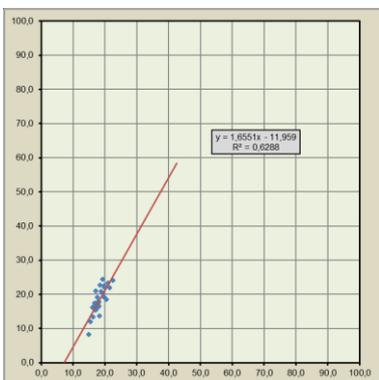
Grafik 155: Sensor Ak - Referenz für April 2018



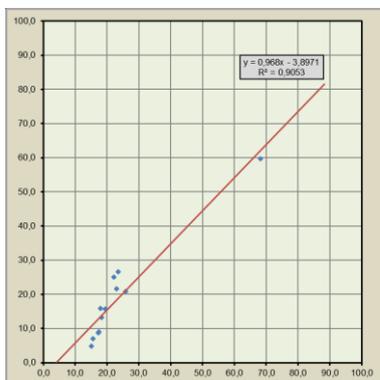
Grafik 156: Sensor Ak - Referenz für Mai 2018



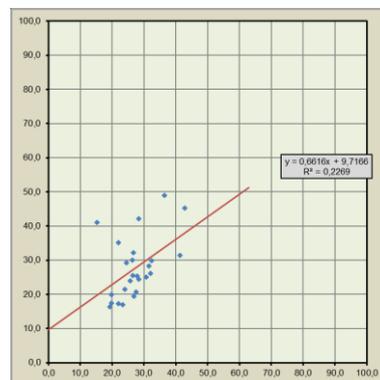
Grafik 157: Sensor Ak - Referenz für Juni 2018



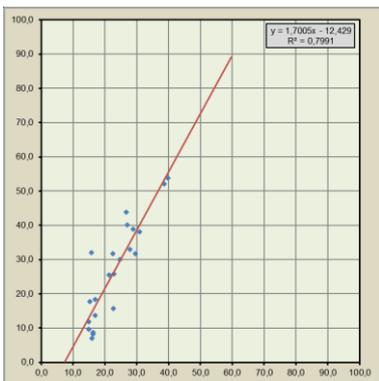
Grafik 158: Sensor Ak - Referenz für Juli 2018



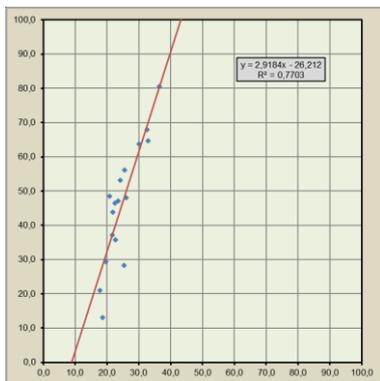
Grafik 159: Sensor Ak - Referenz für Okt. 2018



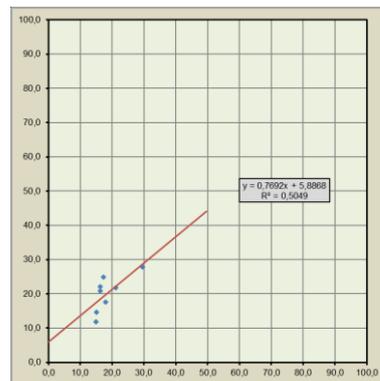
Grafik 160: Sensor Ak - Referenz für Nov. 2018



Grafik 161: Sensor Ak - Referenz für Dez. 2018

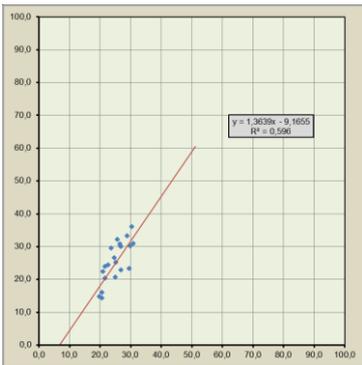


Grafik 162: Sensor Ak - Referenz für Feb. 2019

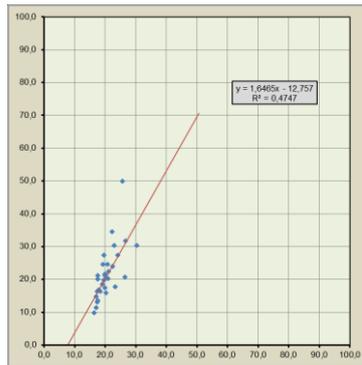


Grafik 163: Sensor Ak - Referenz für März 2019

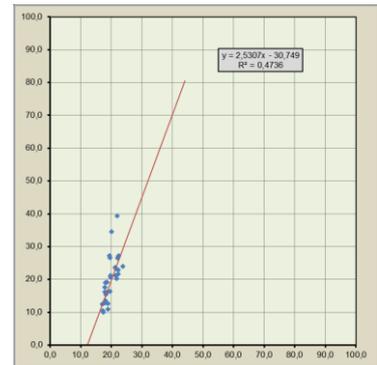
4.2.4.6 Vergleich der korrigierten Tagesmittelwerte, Sensor B kor. - kontinuierliche Feinstaubmessung (Grimm) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



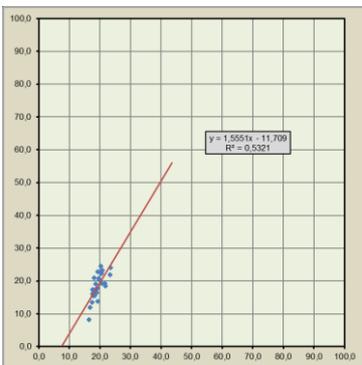
Grafik 164: Sensor Bk - Referenz für April 2018



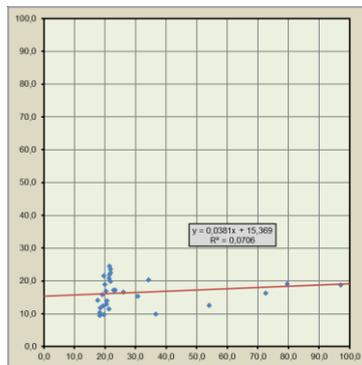
Grafik 165: Sensor Bk - Referenz für Mai 2018



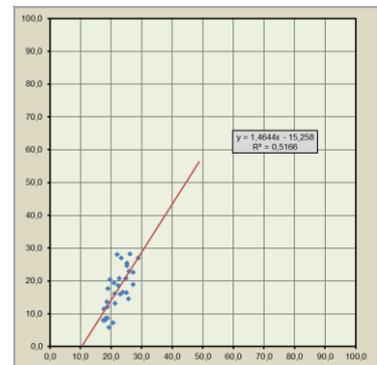
Grafik 166: Sensor Bk - Referenz für Juni 2018



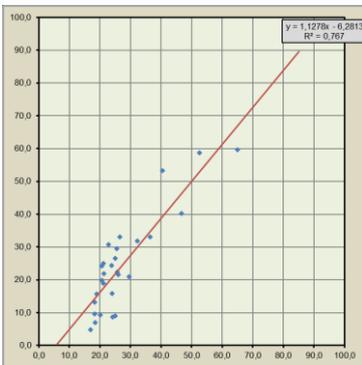
Grafik 167: Sensor Bk - Referenz für Juli 2018



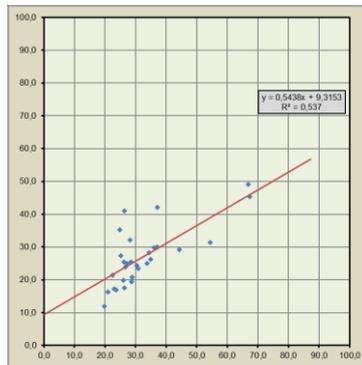
Grafik 168: Sensor Bk - Referenz für Aug. 2018



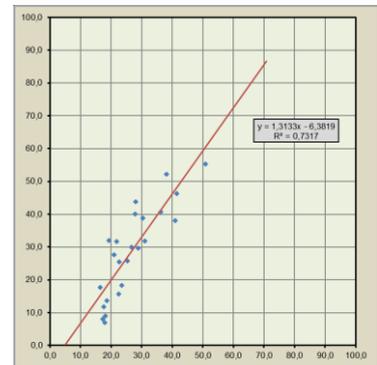
Grafik 169: Sensor Bk - Referenz für Sep. 2018



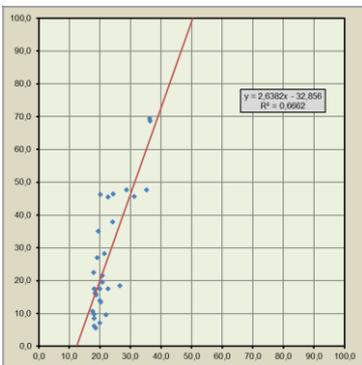
Grafik 170: Sensor Bk - Referenz für Okt. 2018



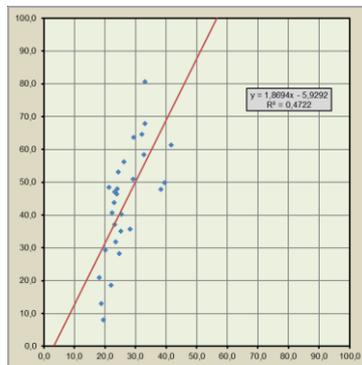
Grafik 171: Sensor Bk - Referenz für Nov. 2018



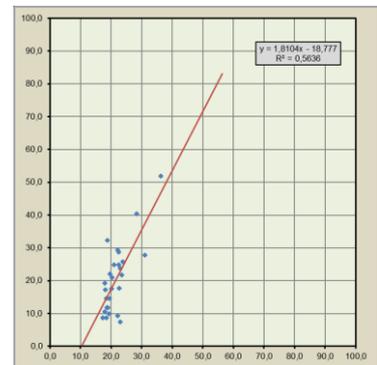
Grafik 172: Sensor Bk - Referenz für Dez. 2018



Grafik 173: Sensor Bk - Referenz für Jan. 2019



Grafik 174: Sensor Bk - Referenz für Feb. 2019



Grafik 175: Sensor Bk - Referenz für März 2019

Aus den Grafiken ist folgendes abzuleiten:

- Die Ausgleichsgeraden schneiden nicht den Nullpunkt
- Die Steigungen der Ausgleichsgeraden ändern sich stark
- Generell liefern die Staubsensoren deutlich andere Feinstaubwerte als das Referenzmessverfahren
- Die Korrelation der Feinstaubwerte ist gut, ändert sich aber stark im Betrachtungszeitraum

Auch die Ergebnisse der berechneten Halbstunden- und Tagesmittelwerte aus den korrigierten Daten der Staubsensoren müssen differenziert betrachtet werden. Es wurden die Halbstundenmittelwerte als größte verfügbare Auflösung bei den Datenpaaren rechnerisch korrigiert.

Die sehr gute Korrelation der parallel betriebenen Sensoren ist hervorzuheben. Allerdings sind auch hier unterschiedliche Ergebnisse der Sensoren zu erwarten, sodass die Messwerte weiterhin nicht vergleichbar sind.

Ein generelles Problem für die Korrekturrechnung stellt der bei den Vergleichstests mit dem Referenzmessverfahren festgestellte Ordinatenabstand dar. Bei geringen Messwerten sind die Sensoren „blind“ bzw. geringe Messwerte können nicht angezeigt werden.

Die Steigung der Ausgleichsgeraden ändert sich mit der Zeit, teilweise stark. Diese Tatsache ist insofern problematisch, da für jeden Betrachtungszeitraum eine neue Korrekturfunktion ermittelt werden müsste. In der Realität ist das kaum durchführbar.

5. Zusammenfassung

5.1. Netzunabhängiger Betrieb von Staubsensoren mit Akkubetrieb und Datenübertragung mittels mobilen WLAN-Routern

Leider hat sich herausgestellt, dass die Messkonfiguration nur über die Dauer von wenigen Tagen unabhängig Messwerte liefern kann und dann die Akkuleistung für den Betrieb zu gering wird. Auch mit der zusätzlichen Unterstützung eines Solarpanels konnten keine besseren Ergebnisse erzielt werden. Grund hierfür ist offensichtlich der Energieverbrauch des WLAN-Routers.

5.2. Erste Ergebnisse der Feinstaubmessungen mit Sensoren und Vergleich mit Referenzmessverfahren

Derzeit liegen Messwerte über zwölf Monate vor. Die Verfügbarkeit der Sensoreinheiten ist gut, auch wenn fallweise Sensoren ausfallen. Zur Bewertung der Datenqualität wurden die Messdaten des in der Messstation S431 Linz-Römerberg eingesetzten kontinuierlichen Feinstaubmessgerätes (Grimm) herangezogen.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die getesteten Staubsensoren derzeit keine befriedigende Datenqualität liefern können. Die angezeigten Werte der Staubsensoren lassen keine seriösen Aussagen über die Luftqualität zu. Halbstunden- und Tagesmittelwerte, die aus den aktuellen Anzeigewerten der Staubsensoren berechnet wurden, zeigen im Praxistest einen unbefriedigenden Zusammenhang mit Messwerten des Referenzmessverfahrens. Daraus kann aber auch geschlossen werden, dass die aktuellen Anzeigewerte der Staubsensoren derzeit bestenfalls in den Bereich „grobe Schätzungen“ eingestuft werden können. Auch Relativaussagen sind nicht möglich.

Problematisch ist dieses Ergebnis insofern, da die Sensorwerte in der Internetanzeige farblich graduiert auf den Tagesgrenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dargestellt werden. Der Nutzer kann sich aber nicht darauf verlassen, dass die dort angezeigte Luftqualität auch mit der tatsächlichen übereinstimmt. Diese Aussagen decken sich auch mit den Bewertungen von anderen Testergebnissen [1], [2].

5.3. Korrektur von Sensordaten und rechnerischer Bezug auf das Referenzmessverfahren

Es stellt sich natürlich die Frage, ob durch Bezug der Sensordaten auf das Referenzmessverfahren die Datenqualität der Sensoren verbessert werden könnte. Ansatz könnte sein, dass bei einer Immissionsmessstation im Messgebiet ein „Korrekturfaktor“ ermittelt wird, mit dem die Sensordaten verrechnet werden. Für die Datenkorrektur wurden Halbstundenmittelwerte gewählt, da diese die größte verfügbare Auflösung der Datenpaare darstellen.

Zusammenfassend muss hier ebenfalls festgestellt werden, dass auch bei „korrigierten Sensordaten“ die Staubsensoren derzeit keine befriedigende Datenqualität liefern können. Die angezeigten Werte der Staubsensoren lassen keine seriösen Aussagen über die Luftqualität zu.

6. Weitere Vorgangsweise

Die zusammenfassenden Ergebnisse bzw. Feststellungen gelten derzeit, international wird intensiv an diesem Thema geforscht. Es ist zu erwarten, dass in absehbarer Zeit taugliche Sensoren verfügbar sind.

Linz, am 22. November 2019

Binder Gerald

Amtssachverständiger Umweltmesstechnik

[1] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011 (2017)

[2] Vergleich von Sensordaten mit Ergebnissen von Referenzmessverfahren in Graz (2017)

[3] Magistrat Linz, PTU, Zwischenbericht [2018]

