

Potenzial und Grenzen des kostengünstigen SDS011 Partikelsensors bei der Überwachung urbaner Luftqualität

Matthias Budde^{1*}, Almuth D. Schwarz², Thomas Müller³, Bernd Laquai⁴, Norbert Streibl⁵, Gregor Schindler¹, Marcel Köpke¹, Till Riedel¹, Achim Dittler², Michael Beigl¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Telematik, Lehrstuhl für Pervasive Computing Systems / TECO, Karlsruhe, Deutschland

²Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM), Arbeitsgruppe Gas-Partikel-Systeme, Karlsruhe

³Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS), Leipzig

⁴Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Abteilung Reinhaltung der Luft, Stuttgart

⁵Unabhängiger Forscher, Leonberg

* E-Mail: budde@teco.edu

Einleitung

Bei der Messung von Feinstaub (PM) werden Entwicklungen hin zu verteilten Messansätzen unter Verwendung kostengünstiger Sensoren gemacht (Snyder et al., 2013). Frühe Generationen kostengünstiger Partikelsensoren wurden mit offiziellen Messstationen verglichen und entsprechende Untersuchungen zeigen, dass sie grundsätzlich die Dynamik der PM-Werte in der Umgebung erfassen können (Budde et al., 2013; Holstius et al., 2014), aber unter geringer Kalibrierungsstabilität leiden, keine Größenklassen unterscheiden können und anfällig für weitere Fehlerquellen sind (Budde et al., 2015). Aktuelle kostengünstige Laser-Streusensoren weisen eine bessere Stabilität und genauere Messwerte auf. Während sie meistens als PM_{2.5}-Sensoren bezeichnet werden, geben einige auch PM₁₀- und / oder PM₁-Werte aus. Als Vertreter dieser Klasse von Sensoren untersuchen wir den SDS011-Sensor (Nova Fitness, 2015). Er wird bereits weltweit in verschiedenen Systemen eingesetzt, von Sensornetzwerken bis zu bürgerwissenschaftlichen Projekten, bei denen Freiwillige Hunderte dieser Sensoren in städtischen Gebieten ausgebracht haben.

In verwandten Arbeiten wurden Co-Lokations-Messungen mit dem SDS011 durchgeführt (LUBW, 2017), deren Ergebnisse darauf hinweisen, dass das Sensorsignal unter bestimmten Bedingungen (relative Luftfeuchtigkeit von 20-50 % und PM10-Massenkonzentrationen $< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eine hinreichende Korrelation aufweist, unter anderen Bedingungen, insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit, aber eine weniger gute. Um die Qualität des Sensors eingehender zu untersuchen, werden in dieser Arbeit die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit zusammen mit einer Reihe von Experimenten dargestellt, um das Potenzial und die Grenzen kostengünstiger Laser-Scattering Sensoren richtig einzuschätzen.

Experimente

Wir haben Laborexperimente durchgeführt, bei denen der Sensor bzw. die Sensoren verschiedenen Konzentrationen von monodispersen und polydispersen Partikeln ausgesetzt wurden, teilweise künstlich erzeugt und teilweise unter der Verwendung von Umgebungsluft.

Monodisperse Partikeln

Um den Einfluss von Konzentration und Partikelgröße auf die Sensormessungen zu bewerten, wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt, bei denen inerte monodisperse Polystyrolpartikeln von SDS011-Sensoren in einer Laborumgebung gemessen wurden, wobei ein Palas PROMO 2000-Gerät mit einem welas 2100-Sensor als Referenz diente. In allen Experimenten wurde ein Aerosolgenerator verwendet, der speziell für die Feinsteuerung der Partikeldispersierung und dabei vorliegender Umgebungsbedingungen (siehe Abbildung 1, rechts).

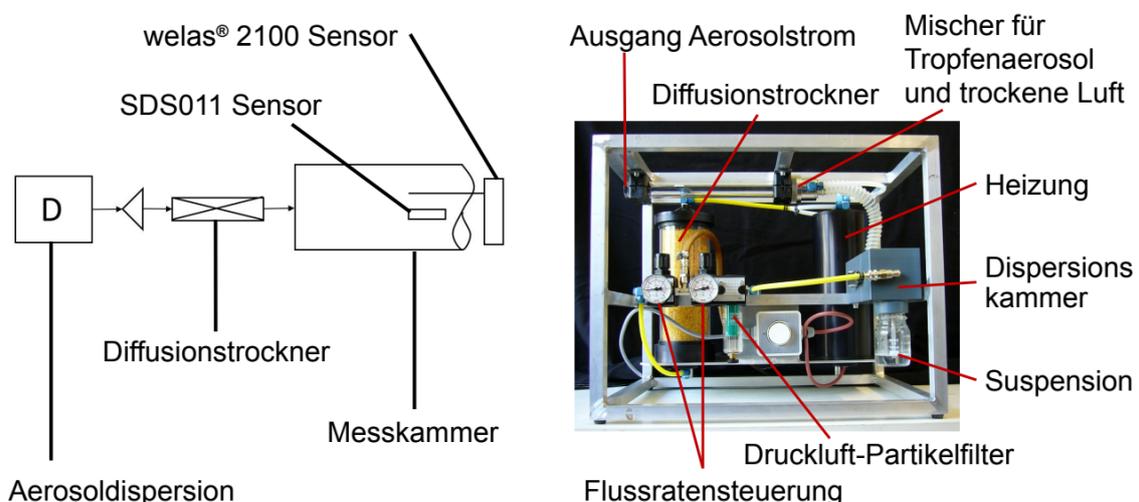


Abb. 1: Unser Versuchsaufbau mit monodispersen Polystyrolpartikeln.

Homogene wässrige Suspensionen, die die Zielpartikeln enthalten, werden durch eine Venturidüse dispergiert. Die Tropfen, die einzelne Partikeln enthalten, gelangen in eine Kammer, wo sie mit einem erhitzten Strom trockener, partikelfreier Luft gemischt werden, die sie trocknet und die Temperatur während des Experiments bestimmt. Der in die Suspension eintretende Luftstrom wird zur Steuerung der austretenden Konzentration des Generators verwendet. Die Temperatur und die Flussrate des Heißluftstroms werden verwendet, um Temperatur und Feuchtigkeit während des Experiments zu steuern. Der den Generator verlassende Strom enthält die dispergierten monodispersen Teilchen, die sich ursprünglich in der Suspension befanden. Dieser Strom durchläuft einen Diffusionstrockner, bevor er in die Messkammer gelangt, die am Ende offen gelassen wurde. Dadurch können die SDS011-Sensoren horizontal (mit dem Lüfter zur Decke gerichtet) und der Referenzsensor in der Kammer auf derselben Höhe positioniert werden (siehe Abbildung 1, links). Die in diesen Versuchen verwendeten Teilchen waren inerte, nicht hygroskopische, monodisperse Polystyrolteilchen mit einer Dichte von $1,055 \text{ g/cm}^3$.

Um den Einfluss von Partikelgröße und -konzentration zu untersuchen, wurden in separaten Experimenten monodisperse Partikeln unterschiedlicher Größe ($0,3 / 1 / 2 / 5$ bzw. $10 \mu\text{m}$) verwendet. Für jede Partikelgröße wurden verschiedene Konzentrationen von bis zu etwa $2500 \mu\text{g/m}^3$ verwendet. Die Versuche wurden bei Umgebungsdruck und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 45 % durchgeführt. Die Temperaturen während des Versuchs wurden zwischen 20 und $22 \text{ }^\circ\text{C}$ gehalten. Alle Sensoren haben die Konzentration mindestens 20 Minuten lang konstant gemessen, um stabile Konzentrationsbedingungen zu gewährleisten. Die in diesem Dokument dargestellten Daten zeigen nur die Ergebnisse eines SDS011-Sensors. Andere SDS011-Sensoren (insgesamt wurden vier verschiedene getestet) zeigten die gleichen Trends.

Die PM_{2.5}- und PM₁₀-Messwerte des SDS011-Sensors unterscheiden sich je nach Partikelgröße und Konzentration von der Referenz (siehe Abbildung 2). Bei $0,3 \mu\text{m}$ -Partikeln sind die PM_{2.5}-Werte (Abbildung 2, links) bis zu einer Referenzkonzentration von $300 \mu\text{g/m}^3$ denen der Referenz ähnlich. Für Konzentrationen oberhalb dieses Werts meldet der SDS011 niedrigere Werte für $0,3 \mu\text{m}$ als der Welas 2100. Für $1 \mu\text{m}$ -Partikeln werden vom SDS011 zu hohe PM_{2.5}-Werte für PM_{2.5}-Konzentrationen zwischen $300 \mu\text{g/m}^3$ und $800 \mu\text{g/m}^3$ angegeben. Unterhalb dieses Bereichs passen sie gut zur Referenz, darüber werden die PM_{2.5}-Konzentrationen unterschätzt. $2 \mu\text{m}$ -Partikel werden vom SDS011 im PM_{2.5}-Wert stark unterschätzt. Die PM_{2.5}-Ergebnisse für $5 \mu\text{m}$ - und $10 \mu\text{m}$ -Partikeln müssen mit Vorsicht behandelt werden. Für sie zeigte das

Referenzgerät Verunreinigungen in den Größenkanälen zwischen $0,2\ \mu\text{m}$ und $0,5\ \mu\text{m}$, die zu $\text{PM}_{2.5}$ -Werten unter $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ führten. Der SDS011 weist viel höhere $\text{PM}_{2.5}$ -Werte auf (bis zu $\sim 100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), es bleibt jedoch unklar, ob er stärker auf die Verunreinigungen reagiert oder die $5\ \mu\text{m}$ - und $10\ \mu\text{m}$ -Partikel fälschlich im $\text{PM}_{2.5}$ -Wert miteinbezogen werden.

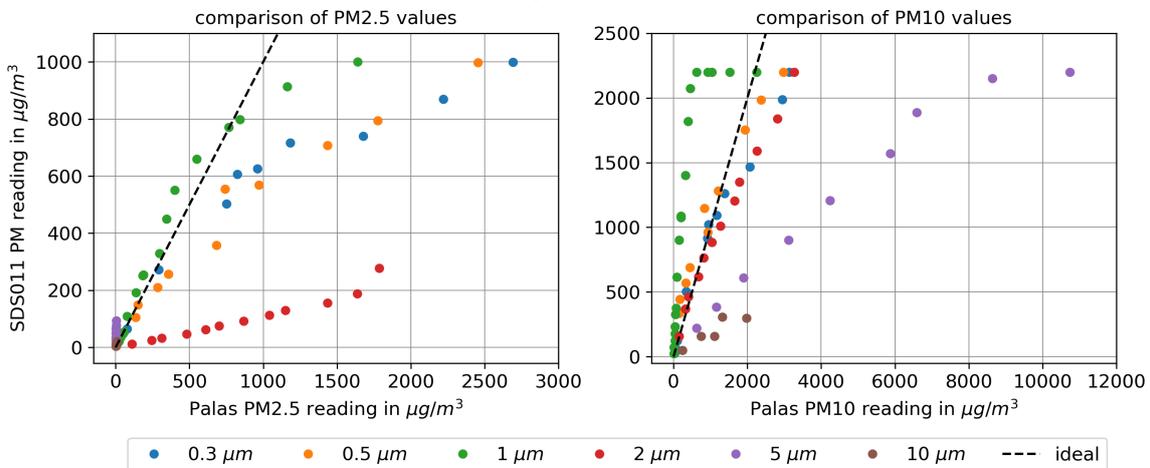


Abb. 2. SDS011-Messwerte vs. Referenz für verschiedene monodisperse Partikelgrößen für $\text{PM}_{2.5}$ (links) und PM_{10} (rechts).

In den PM_{10} -Messwerten des SDS011 (Abbildung 2 rechts) werden Partikeln von $5\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$ stark unterschätzt. Die PM_{10} -Werte für $0,3\ \mu\text{m}$ -Partikeln sind sowohl für den SDS011 als auch für die Referenz ähnlich. $1\ \mu\text{m}$ -Partikeln werden im SDS011- PM_{10} -Wert oberhalb von Konzentrationen von $300\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschätzt. Wenn wir die PM_{10} -Werte für $2\ \mu\text{m}$ -Partikeln betrachten, können wir ein besonderes Verhalten feststellen. Wie bereits erwähnt, unterschätzt der SDS011-Sensor die Masse für $2\ \mu\text{m}$ -Partikeln in seinen $\text{PM}_{2.5}$ -Werten, was darauf hinweist, dass er entweder nicht der gleichen $\text{PM}_{2.5}$ -Kurve wie unsere Referenz folgt oder eine zu niedrige Dichte für die Partikeln annimmt. Für PM_{10} melden der SDS011 und der welas 2100 jedoch ähnliche Werte für $2\ \mu\text{m}$ -Partikeln.

Insgesamt zeigt der SDS011 gute Ergebnisse für Partikeln unter $5\ \mu\text{m}$ für den PM_{10} -Wert, sofern diese unter trockenen, stabilen Bedingungen gemessen werden, berücksichtigt jedoch nicht ausreichend Partikeln mit den Größen $5\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$. Der Sensor scheint gute $\text{PM}_{2.5}$ -Messwerte für Partikelgrößen von $1\ \mu\text{m}$ und $0,3\ \mu\text{m}$ und gute PM_{10} -Messwerte für Partikelgrößen von $0,3\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ für das in diesen Experimenten verwendete Material zu liefern. Es bleibt unklar, wie die interne Verarbeitung des Sensors die Partikelgrößen abschätzt.

Polydisperse Partikeln

Wir haben mehrere SDS011-Sensoren mit Referenzmessungen in einem Labor am Welt-Kalibrier-Zentrum für Aerosolphysik (WCCAP) des Leibnitz-Instituts für

Troposphärenforschung (TROPOS) verglichen, das in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt (UBA) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) betrieben wird. Eine Reihe von 17 SDS011-Sensoren wurde unterschiedlichen Konzentrationen verschiedener Aerosole (Ammoniumsulfat, Umgebungsluft (Ambient Air), Ruß eines miniCAST-Propangasbrenners von Jing Ltd. und partikelfreie Nullluft) in einer luftdichten Aluminiumkammer ausgesetzt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Der Luftauslass der Kammer war mit einer Kombination von zwei Referenzgeräten verbunden: einem aerodynamischen Partikelmessgerät (TSI APS Modell 3321) und einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), das an der WCCAP entwickelt wurde (Wiedensohler et al., 2012). Diese Kombination ermöglichte die Messung von 92 Kanälen mit aerodynamischer Größe zwischen 10 nm und 20 µm. Die Zeitauflösung betrug 4,5 Minuten. Das SMPS tastet die verschiedenen Kanäle in einer Zeitmultiplexweise ab, d.h. nacheinander über eine Zeit von 4,5 Minuten. So lange dauert das Durchlaufen aller Kanäle. Aus diesen einzelnen Größenkanälen haben wir die drei Größenklassen PM10, PM2.5 und PM1 als Referenz berechnet. Aerodynamische Partikeldurchmesser wurden in einen geometrischen Durchmesser umgewandelt, wobei sphärische Partikeln angenommen wurden und eine Partikeldichte von 1,7 g/cm³ verwendet wurde.

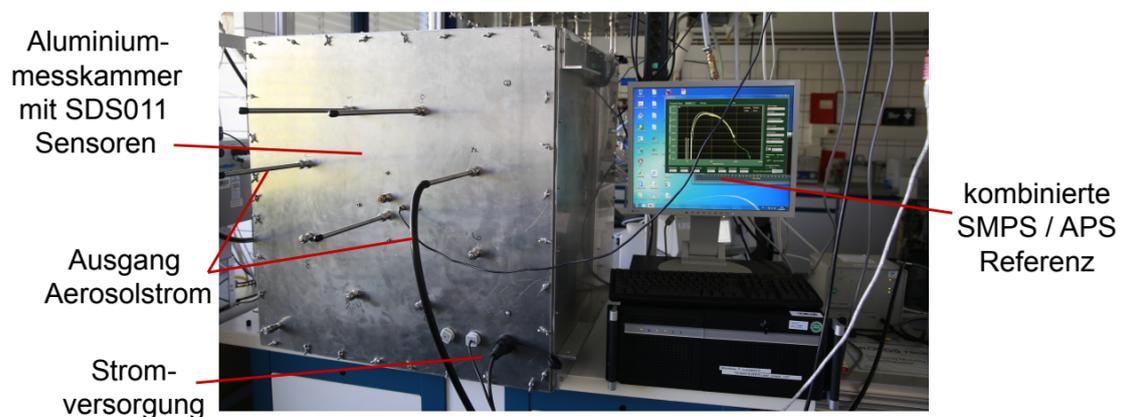


Abb. 3: SDS011-Sensoren wurden in einer luftdichten Aluminiummesskammer (links) platziert, in die unterschiedliche Konzentrationen polydisperser Partikeln injiziert wurden. Ein SMPS und ein TSI APS wurden als Referenz verwendet.

Abbildung 4 zeigt die Zeitreihen unserer Experimente. Drei Einzelsensoren wurden ebenso wie die vollständige Ambient Air-2-Session aufgrund technischer Fehler nicht berücksichtigt. Wir sehen, dass der SDS011 im Allgemeinen die Dynamik gut erfasst, aber auch, dass die Messwerte einen Versatz zur Referenz haben und dass dieser Versatz für die einzelnen Sensoren unterschiedlich ist. Diese Abweichung ist auch in dem Streudiagramm in Abbildung 5 zu sehen.

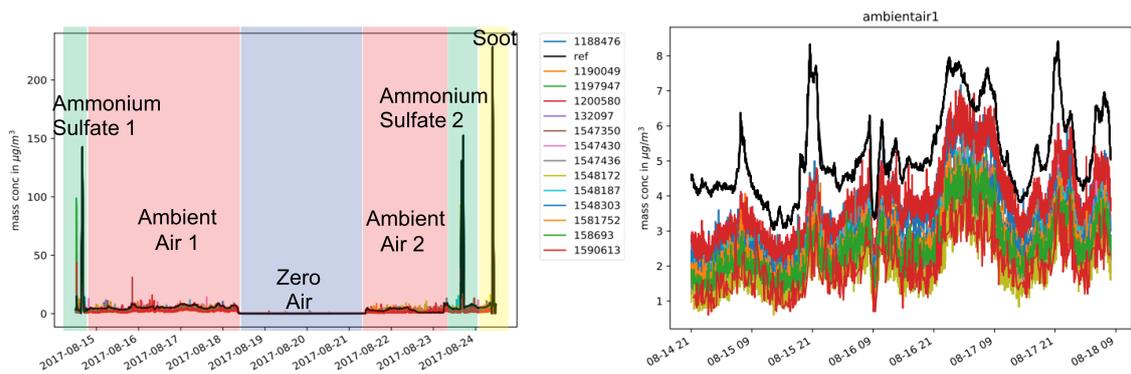


Abb. 4: Zeitreihen von Experimenten mit verschiedenen polydispersen Aerosolen (links) und Vergrößerung auf die erste Messung der PM 2.5-Masse in der Umgebungsluft („Ambient Air 1“, rechts). Die Referenz ist jeweils die durchgängige schwarze Linie.

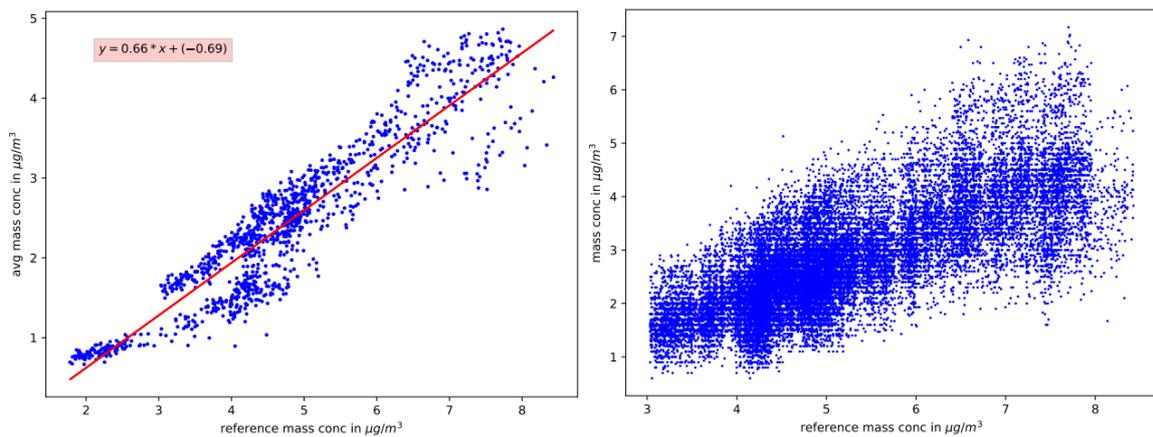


Abb. 5. Streudiagramme: gemittelte PM2.5-Masse in Bezug auf die Referenz (links) und für alle einzelnen 14 gültigen Sensoren (rechts) für das Testaerosol Umgebungsluft („Ambient Air 1“).

Wir sehen, dass der Sensor insgesamt eine gute Linearität aufweist, aber auch eine systematische Fehleinschätzung der tatsächlichen Konzentration. Im Durchschnitt zeigte der SDS011 nur 66 % der PM2.5 Konzentration in der Umgebungsluft. Einzeln lagen die Messwerte zwischen 45 % und 85 %. Für Ammoniumsulfat zeigen die SDS011 im Durchschnitt nur 48 % der PM2.5 der Referenz. Für reinen Ruß wurden keine brauchbaren Messwerte angezeigt, wie aufgrund starker Absorption und geringer Lichtstreuung zu erwarten war. Dies ist ein allgemeines Problem der optischen Messungen und nicht spezifisch für das SDS011. Es sollte erwähnt werden, dass Ruß in der Umgebungsluft mit anderen Materialien beschichtet ist, z.B. organischen Stoffen und Sulfaten, und Licht streut. Ein allgemeiner Umrechnungsfaktor, wie viel Ruß vom SDS011 detektiert wird, kann nicht angegeben werden. Bei partikelfreier Nullluft zeigten die Sensoren minimale PM2.5-Werte von $\sim 0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, was für Messungen der Umgebungsluft akzeptabel erscheint. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Sensor	Ambient air		Ammoniumsulfat		Ruß		Partikelfreie Nullluft	
	Steigung	Achsenabschnitt	Steigung	Achsenabschnitt	Steigung	Achsenabschnitt	baseline	stdev
1188476	0.85 / 0.85	-0.88 / -0.74	0.63 / 0.67	0.01 / 0.26	0 / 0	1.55 / 1.84	0.247 / 0.454	0.0020 / 0.0018
1190049	0.67 / 0.66	-0.66 / -0.50	0.50 / 0.53	0.19 / 0.40	0 / 0	1.21 / 1.39	0.303 / 0.400	0.0009 / 0.0002
1197947	0.61 / 0.60	-0.68 / -0.59	0.46 / 0.49	0.23 / 0.63	0 / 0	1.09 / 1.37	0.200 / 0.300	0.0007 / 0.0004
1200580	0.84 / 0.84	-0.60 / -0.59	0.62 / 0.66	0.24 / 0.41	-0.01 / -0.01	1.95 / 2.09	0.415 / 0.413	0.0017 / 0.0024
132097	0.65 / 0.64	-0.79 / -0.57	0.47 / 0.50	0.17 / 0.72	0 / 0	1.11 / 1.38	0.200 / 0.402	0.0003 / 0.0024
1547350	0.60 / 0.59	-0.80 / -0.76	0.47 / 0.51	-0.06 / 0.55	0 / 0	1.09 / 1.24	0.301 / 0.400	0.0004 / 0.0002
1547430	0.69 / 0.65	-0.98 / -0.67	0.48 / 0.53	0.03 / 0.94	0 / 0	1.26 / 1.68	0.300 / 0.800	0.0000 / 0.0003
1547436	0.64 / 0.60	-0.80 / -0.44	0.51 / 0.56	-0.12 / 0.34	0 / 0	1.27 / 1.70	0.393 / 0.700	0.0014 / 0.0000
1548172	0.48 / 0.45	-0.53 / 0.12	0.42 / 0.45	0.04 / 1.44	0 / 0	0.97 / 1.82	0.300 / 0.600	0.0002 / 0.0005
1548187	0.65 / 0.71	-0.52 / -0.48	0.47 / 0.53	0.36 / 1.08	0 / 0	1.28 / 1.84	0.407 / 0.601	0.0010 / 0.0008
1548303	0.66 / 0.69	-0.59 / -0.69	0.50 / 0.55	0.11 / 0.55	0 / 0	1.26 / 1.49	0.391 / 0.500	0.0012 / 0.0002
1581752	0.64 / 0.62	-0.62 / -0.41					0.396 / 0.699	0.0017 / 0.0013
158693	0.63 / 0.62	-0.76 / -0.62	0.46 / 0.49	0.21 / 0.53	0 / 0	1.08 / 1.37	0.200 / 0.401	0.0002 / 0.0004
1590613	0.52 / 0.52	-0.73 / -0.52	0.41 / 0.45	-0.13 / 0.65	0 / 0	0.94 / 1.15	0.300 / 0.400	0.0000 / 0.0004
Mittel	0.65 / 0.65	-0.71 / -0.53	0.49 / 0.53	0.10 / 0.65				

Tabelle 1: Messergebnisse für die einzelnen Sensoren (PM2.5 / PM10).

Andere Faktoren

Der wichtigste weitere Faktor, der die Messergebnisse des SDS011-Sensors beeinflusst, ist die Luftfeuchtigkeit. Im Allgemeinen sind die Sensoren nur für eine relative Luftfeuchtigkeit bis 70 % spezifiziert (Nova Fitness, 2015). Oberhalb dieser Werte müssen große Abweichungen erwartet werden.

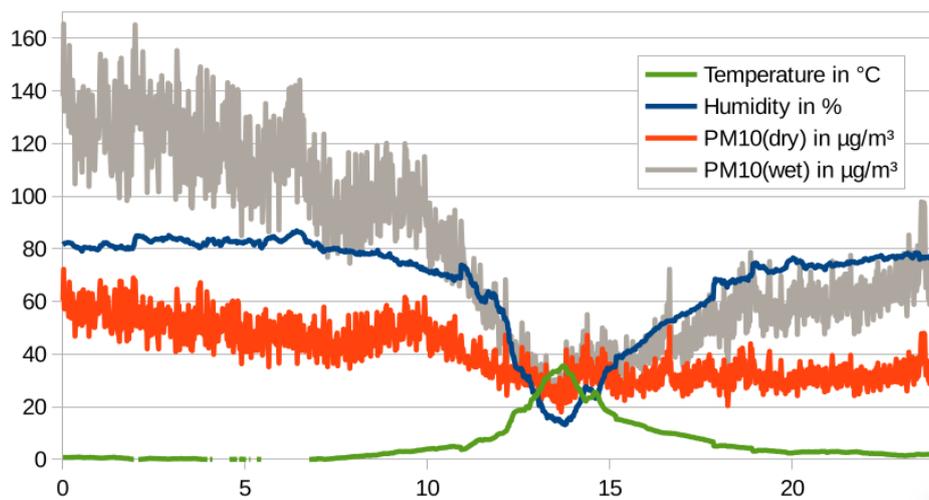


Abb. 6. Der SDS011 ist sehr empfindlich für Feuchtigkeit, wie im Verlauf des Tages deutlich zu sehen ist. Insbesondere bei Nebel werden die tatsächlichen Partikelkonzentrationen beispielsweise drastisch überschätzt.

Abbildung 6 zeigt Daten, die an einem feuchten Tag in realer Umgebung gesammelt wurden. Die Grafik zeigt, dass der Sensor die Partikelkonzentration in den Morgen- und Abendstunden bei hoher Luftfeuchtigkeit drastisch überschätzt. Es gibt zwei Fehlerquellen, die durch Feuchtigkeit verursacht werden: Hygroskopisches Wachstum von salzhaltigen Partikeln und kondensierte Nebeltröpfchen, die eine ähnliche Größe wie PM-relevante Partikeln aufweisen können. Unsere Beobachtungen legen nahe, dass die Überschätzung bei Nebel deutlich stärker ausfällt und bei anderweitig hoher Luftfeuchtigkeit oder Regen weniger stark ausgeprägt ist. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit parallel zu dieser Arbeit erreichten Erkenntnissen (Jayaratne et al., 2018). Beide Effekte können durch Trocknung der Luft deutlich reduziert werden. Daher beabsichtigen wir in zukünftigen Arbeiten unter anderem die Verwendung einer Sensorenerweiterung mit einem einfachen, kostengünstigen beheizten Lufteinlass zu untersuchen, um dies auszugleichen (Abbildung 7).

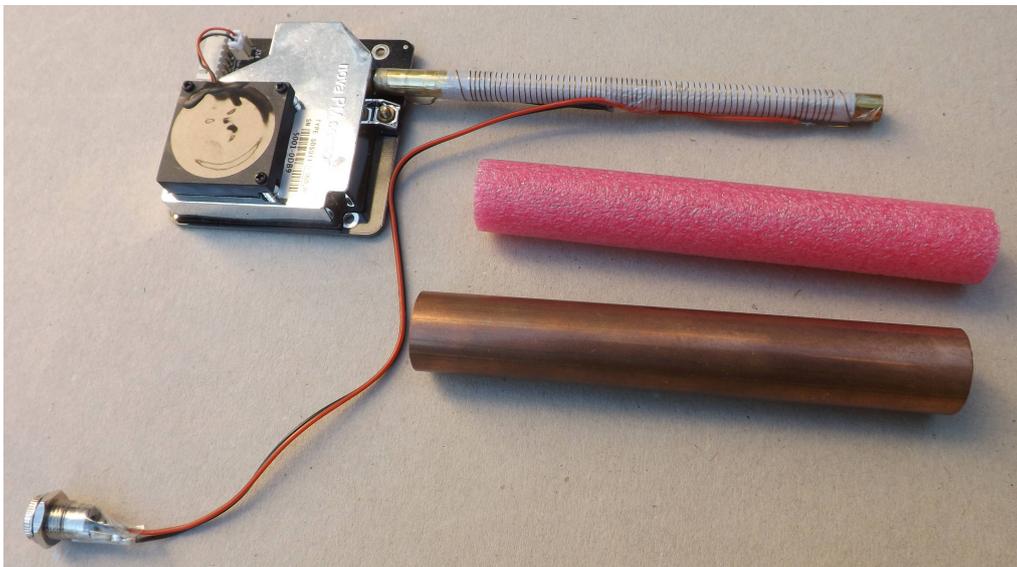


Abb. 7. In zukünftigen Arbeiten wollen wir die Trocknung der Luft mithilfe einer kostengünstigen Do-it-yourself (DIY)-Sensorenerweiterung mit einem beheizten Lufteinlass untersuchen, um diesen Effekt zu kompensieren.

Neben den Auswirkungen auf die Luftfeuchtigkeit erwarten wir altersbedingte Abweichungen im Langzeitgebrauch aufgrund des Aufbaus des Sensors (z. B. aufgrund von Ablagerungen von Stäuben im Sensor und der Alterung des Lüfters und des Photoempfängers). Wir untersuchen diese Effekte derzeit in einem langfristigen Einsatz. Bei nicht sachkundigen Anwendern schließlich ist der menschliche Bediener eine oft übersehene Fehlerquelle (Budde et al., 2017b).

Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen unsere Experimente:

- Der SDS011 kann die Dynamik von Feinstaub mit hoher zeitlicher Auflösung erfassen.
- Es gibt eine Abweichung zwischen den einzelnen Sensoren.
- PM2.5-Werte scheinen vielversprechend zu sein, insbesondere für die PM-Hintergrundmessung.
- PM10-Schätzungen können falsch sein, insbesondere, wenn sich die Verteilung zu größeren Partikeln verschiebt.
- Feuchtigkeitsabhängigkeit ist ein Problem, insbesondere in Nebel.
- Ohne weitere Maßnahmen ist der Sensor nur für qualitative und nicht für quantitative Messungen geeignet.
- Der SDS011 kann Umgebungsruß kaum detektieren.

Der Sensor weist insgesamt jedoch eine bemerkenswerte Stabilität für seine Preisklasse auf und bietet dadurch das Potenzial, neuartige Anwendungen zu ermöglichen. In zukünftigen Arbeiten werden wir Feuchtekorrekturverfahren untersuchen, z.B. durch Sensorerweiterung (s.o.), Sensordatenfusion oder vernetzte Erfassungsszenarien von kostengünstigen Sensoren in Kombination mit Big-Data-Analytics-Ansätzen (Budde et al. 2017). Wir werden zudem über die Langzeitstabilität der Sensoren in einem realen Einsatz berichten.

Acknowledgements

Diese Arbeit wurde teilfinanziert im Rahmen des BMBF-Projekts "Software Campus" (Förderkennzeichen 01IS12051) und des BMVI-Projekts "SmartAQnet" (Förderkennzeichen 19F2003B). Eine englische Fassung dieser Arbeit wurde bereits im Rahmen der DUST2018 Konferenz vorgestellt und im Open Access Journal *ProScience* veröffentlicht (Budde et al., 2018).

Referenzen

- Budde M., El Masri R., Riedel T., Beigl M. (2013) Enabling Low-Cost Particulate Matter Measurement for Participatory Sensing Scenarios, 12th Int. Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM 2013)
- Budde M., Köpke M., Beigl M. (2015). Robust, In-situ Data Reconstruction from Poisson Noise for Low-cost, Mobile, Non-Expert Environmental Sensing. International Symposium on Wearable Computing (ISWC'15)

- Budde M., Riedel T., Beigl M., Schäfer K., Emeis S., Cyrys J., Schnelle-Kreis J., Philipp A., Ziegler V., Grimm H., Gratza T. (2017) SmartAQnet: Remote and In-Situ Sensing of Urban Air Quality, Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, 104240C
- Budde M., Schankin A., Hoffmann J., Danz M., Riedel T., Beigl M. (2017b). Participatory Sensing or Participatory Nonsense? – Mitigating the Effect of Human Error on Data Quality in Citizen Science. Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technology (IMWUT) 1(3)
- Budde M., Schwarz A.D., Müller T., Laquai B., Streibl N., Schindler G., Köpke M., Riedel T., Dittler A., Beigl M. (2018) Potential and Limitations of the Low-Cost SDS011 Particle Sensor for Monitoring Urban Air Quality, ProScience 5
- Holstius D.M., Pillariseti A., Smith K.R., Seto E. (2014) Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California. Atmospheric Measurement Techniques 7
- Jayarathne R., Liu X., Thai P., Dunbabin M., Morawska L. (2018) The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. Atmospheric Measurement Tech. 11
- LUBW (2017). Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011 - Ein Vergleich mit einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator. <https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/268831/> (Seitenaufruf am 24.01.2018).
- Nova Fitness Co., Ltd. (2015). SDS011 sensor. V1.3, <https://nettigo.pl/attachments/398> (Seitenaufruf am 24.01.2018).
- Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. (2018) Opportunities for Low-Cost Particulate Matter Sensors in Filter Emission Measurements. Chemical Engineering & Technology 41(9)
- Snyder E.G., Watkins T.H., Solomon P.A., Thoma E.D., Williams R.W., Hagler G.S.W., Shelow D., Hindin D.A., Kilaru V.J., Preuss P.W. (2013) The changing paradigm of air pollution monitoring. Environmental Science & Technology 47(20).
- Wiedensohler A., W. Birmili, A. Nowak, A. Sonntag, K. Weinhold, M. Merkel, B. Wehner, T. Tuch, S. Pfeifer, M. Fiebig, A. M. Fjåraa, E. Asmi, K. Sellegri, R. Depuy, H. Venzac, P. Villani, P. Laj, P. Aalto, J. A. Ogren, E. Swietlicki, P. Williams, P. Roldin, P. Quincey, C. Hüglin, R. Fierz-Schmidhauser, M. Gysel, E. Weingartner, F. Riccobono, S. Santos, C. Grüning, K. Faloon, D. Beddows, R. Harrison, C. Monahan, S. G. Jennings, C.D. O'Dowd, A. Marinoni, H.-G. Horn, L. Keck, J. Jiang, J. Scheckman, P.H. McMurry, Z. Deng, C.S. Zhao, M. Moerman, B. Henzing, G. de Leeuw, G. Löschau, and S. Bastian, (2012) Mobility particle size spectrometers: Harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions," Atmospheric Measurement Techniques 5(3).