Statische und dynamische Unsicherheitsfaktoren bei mobilen Messungen mit Feinstaubsensoren

Static and Dynamic Uncertainties when Measuring with Moving Particulate Matter Sensors

Christian Röger

Universität Augsburg · christian.roeger@geo.uni-augsburg.de

Zusammenfassung: Bei der mobilen Messung mit Feinstaubsensoren gibt es dynamische und statische Faktoren, die sich auf die Messgenauigkeit auswirken. Das Ziel dieser Arbeit ist es, diese Faktoren ausfindig zu machen und auf ihre Dynamik zu untersuchen. Statische Einflüsse wie die Genauigkeit der verwendeten Sensoren, die Messgleichheit identischer Sensoren sowie die Sensorausrichtung ändern sich während einer Messkampagne nicht, während Faktoren wie die Bewegungsgeschwindigkeit, die Witterungsverhältnisse und der Umgebungsverkehr hochdynamischen Veränderungen unterworfen sind. Der Einfluss der Positionierungsgenauigkeit hat sowohl statische, als auch dynamische Gesichtspunkte.

Schlüsselwörter: Feinstaub, Sensordaten, Unsicherheitsfaktoren

Abstract: *Static and dynamic factors influence the accuracy of results when measuring particulate matter with moving sensors. This work collects those influences and assesses their dynamic dimensions. Findings identify the precision of the sensors, the measurement equality of identical sensors and the alignment of sensors as factors that do not change during a measurement. Movement velocity, weather and ambient traffic influence the accuracy dynamically. The positioning accuracy is found to have static as well as dynamic characteristics.*

Keywords: *Particulate matter, sensor data, uncertainties*

1 Feinstaubsensoren bei mobilen Messkampagnen

Feinstaubsensoren finden häufig Anwendung bei Messkampagnen, die Luftschadstoffe untersuchen. Es zeigt sich, dass dabei auch mobile Ansätze in den Fokus rücken. Anstatt Messdaten nur von einem Punkt aus zu beziehen, bewegen sich die Feinstaubsensoren bei mobilen Messkampagnen durch ein Untersuchungsgebiet. Hierbei können, vor allem bei der Verwendung vergleichsweiser günstiger Messmodule, Messungenauigkeiten unterschiedlichster Art auftreten. Diese potenziellen Fehlerquellen können nicht immer bereits vor einer Messung abgeschätzt werden, sondern sich auch während einer Messung ändern. In dieser Arbeit werden potenzielle Unsicherheitsfaktoren bei der mobilen Messung mit Feinstaubsensoren ausgemacht und diese nach ihren statischen und dynamischen Gesichtspunkten kategorisiert.

Die Anwendungsgebiete von Feinstaubsensoren sind vielfältig. Carvlin et al. (2019) nutzen diese Art von Sensoren, um an ausgewählten Punkten zu messen und damit hochauflösende Einblicke in die Luftverschmutzung eines ausgewählten Untersuchungsgebietes zu erlangen. Bewegliche Sensoren finden sich in Goyal et al. (2018). Ein großer Vorteil mobiler Sensoren ist, dass ein Untersuchungsgebiet deutlich besser abgedeckt werden kann im Gegensatz zur Nutzung statischer Messpunkte. Ein häufig diskutiertes Thema ist die Genauigkeit von Feinstaubmessungen. Viele Arbeiten untersuchen Messgenauigkeiten hinsichtlich der Leis-

AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 7-2021, S. 205-210. © Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach. ISBN 978-3-87907-707-6, ISSN 2364-9283, eISSN 2509-713X, doi:10.14627/537707022.
Dieser Beitrag ist ein Open-Access-Beitrag, der unter den Bedingungen und unter den Auflagen der Creative Commons Attribution Lizenz verbreitet wird (http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

tungsfähigkeit von vergleichsweise günstigen Feinstaubsensoren in Relation zu hochpräzisen Referenzgeräten (Zheng et al., 2018). Auch der Einfluss von Witterungsbedingungen wie der Luftfeuchtigkeit auf Messergebnisse wird untersucht (Di Antonio et al., 2018). Ein Thema, das insbesondere für mobile Messungen relevant ist, ist die Positionierungsgenauigkeit von *Global-Navigation-Satellite-System*-(GNSS-)Empfängern (Martin et al., 2017). Weniger präsent sind Einflüsse durch den Umgebungsverkehr eines messenden Fahrzeuges (Johnson et al., 2016) oder die Bewegungsgeschwindigkeit/ die Ausrichtung eines Sensors (Goyal et al., 2018).

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit liegt darin, Faktoren der Messungenauigkeit bei der Nutzung von Feinstaubsensoren zusammenzutragen und diese im Anschluss nach ihren statischen (gleichbleibenden) und dynamischen (ständigen Änderungen unterworfenen) Gesichtspunkten zu charakterisieren. Diese Faktoren werden exemplarisch für den Fall eines Messfahrzeuges, das mit einem Feinstaubsensor sowie einem GNSS-Modul zur Positionierung ausgestattet ist, ausgewählt.

2 Unsicherheitsfaktoren beim mobilen Messen mit Feinstaubsensoren

Bei der mobilen Messung von Feinstaub mithilfe von Fahrzeugen können einige Faktoren für Messungenauigkeiten sorgen. Untersucht werden:

- die Positionierungsungenauigkeit,
- die Spezifikationen der verwendeten Sensoren,
- baulich bedingte Unterschiede identischer Sensoren,
- die Witterungsverhältnisse während Messungen,
- die Bewegungsgeschwindigkeit der Sensoren,
- die Sensorpositionierung und -ausrichtung,
- sowie der Umgebungsverkehr.

GNSS-Module triangulieren ihre eigene Position, indem sie Signallaufzeiten beim Kontaktieren von Satelliten in Entfernungen konvertieren. Abhängig von Faktoren wie der Art der verwendeten Antenne oder der Hinzunahme von stationären Referenzpunkten (Differenzielles GPS) beziehungsweise der Kombination verschiedener Positionierungstechnologien (Assistiertes GPS) resultiert die Lokalisierung oft in Messungenauigkeiten von einigen Metern. Neben der Art und Funktionsweise des GNSS-Sensors spielen noch weitere Faktoren eine Rolle, die die Genauigkeit der Messungen beeinflussen. Dazu gehören die Anzahl der erreichbaren Satelliten, der Winkel in dem die Satelliten relativ zum Empfänger stehen sowie die die Präsenz von Objekten in der Umgebung der Sensoren, die Satellitensignale reflektieren und abfälschen können. Ein Maß für die Streubreite der Messungen, das von der Anzahl und der relativen Position zueinander der verfügbaren Satelliten abhängt, ist die *Dilution of Precision* (DOP) (Bevly & Cobb, 2010).

Feinstaubsensoren werden mittlerweile auch in Citizen Science basierenden Projekten wie opensensemap[1] oder luftdaten.info[2] angewandt. Viele Module sind bereits für vergleichsweise günstige Preise zu erwerben. Allerdings ist dabei nicht garantiert, dass günstige Feinstaub-

[1] www.opensensemap.org (01.02.2021).
[2] www.luftdaten.info (01.02.2021).

sensoren auch vertrauenswürdige Messwerte liefern. Neben der Genauigkeit der Messungen spielen auch die Verzögerungszeit, der Messbereich sowie der anwendbare Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich eine Rolle für die Qualität der Messungen. Daher verweisen viele Arbeiten auf die Wichtigkeit der Sensorkalibrierung (Mukherjee et al., 2017; Wang et al., 2015).

Nicht nur unterschiedliche Sensoren können unterschiedlich genaue Messwerte liefern, sondern auch Geräte gleicher Bauart. Minimale fertigungsbedingte Abweichungen des Lasers, der Messkammern oder der Ventilatoren können für leicht unterschiedliche Messverläufe bei gleichen Umweltbedingungen sorgen. Vergleichsmessungen bestätigen dieses Phänomen (Zheng et al., 2018; Zusman et al., 2020).

Witterungsbedingungen können ebenfalls Messwerte von Feinstaubsensoren beeinflussen. Primär ist dabei die Luftfeuchtigkeit ein entscheidender Faktor. Feinstaubpartikel verbinden sich mit Wasserpartikeln aus der Umgebungsluft und ändern somit ihre Reflektionseigenschaften. Gelangen diese Partikel in die Messkammer eines Feinstaubsensors, können Messergebnisse abgefälscht werden. Während einige Feinstaubsensoren diese Fehlerquelle durch Trocknung der Partikel eliminieren, messen viele andere Sensoren diesen Anteil an feuchtem Feinstaub mit. Das betrifft vorrangig Messgeräte im günstigen Preissegment. Als Lösung dieses Problems werden in der Literatur häufig Luftfeuchtigkeits-Korrekturationsalgorithmen genannt. Diese definieren Wachstumsfaktoren, die den Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf Messungen reduzieren (Streibl, 2017; Di Antonio et al., 2018).

Setzt sich ein Auto in Bewegung, treten aerodynamische Phänomene auf. Diese sind, je nach Bewegungsgeschwindigkeit und Luftwiderstand der Fahrzeuge, einem hochdynamischen Wandel unterworfen (Hucho, 2013; Schütz, 2013). Das gilt nicht nur für Fahrzeuge, sondern auch für Sensoren, die sich zusammen mit Fahrzeugen bewegen. Feinstaubsensoren, die Messungen anhand von Lichtstreuung bewerkstelligen, erwarten einen konstanten Luftstrom durch ihre Messkammern. Dieser Luftstrom wird in der Regel durch einen Ventilator am Luftausgang des jeweiligen Sensors bewerkstelligt. Ist der Luftstrom in der Umgebung eines Feinstaubsensors hoch, können Messergebnisse abgefälscht werden (Ahn et al., 2020; Goyal et al., 2018). Sich ändernde Luftdruckverhältnisse und Fahrwind können diesen Effekt begünstigen. Dabei spielt nicht nur die Bewegungsgeschwindigkeit eine Rolle, sondern auch die Ausrichtung des Feinstaubsensors.

Fahrzeuge erzeugen ungeachtet des Fahrzeugtyps Feinstaub. Verbrennungspartikel werden von Fahrzeugen emittiert, die zur Fortbewegung fossile Brennstoffe wie Benzin, Diesel oder Gas verwenden. Allerdings sorgt der Straßenverkehr ebenfalls für Feinstaubpartikel, die durch Brems- oder Reifenabrieb in die Umwelt gelangen. Darüber hinaus wird durch Straßenabrieb oder durch Aufwirbelungseffekte mit sich bereits auf der Straße befindlichen Partikeln Feinstaub emittiert (Gehrig et al., 2004). Gemessene Feinstaubwerte korrelieren mit der Anzahl an vorrausfahrenden Fahrzeugen (Röger, 2020). Röger & Ismayilova (2020) nutzen dieses Phänomen, um die Präsenz und Absenz von Umgebungsverkehr mithilfe von Feinstaubmessungen vorherzusehen. Daraus folgt, dass auch der Umgebungsverkehr eine tragende Rolle spielt bei mobilen Messungen mit Feinstaubsensoren.

3 Statische und Dynamische Unsicherheitsfaktoren

Einige der vorgestellten Faktoren sind nicht nur statischer Natur, sondern ändern sich während einer Messung. Das führt dazu, dass einige Fehlerquellen nicht schon vor einer Messung abschätzbar sind, sondern sich erst beim Betrachten der Daten zeigen. Dynamische Faktoren sind ständigen Änderungen unterworfen, die Messergebnisse unterschiedlich stark beeinflussen können.

Die Positionierungsungenauigkeit ist sowohl statischer, als auch dynamischer Natur. Die Wahl des Positionierungsverfahrens und der Kalibrierung sind vor einer Messung zu treffen. Während einer Messung Änderungen unterworfen sind die Anzahl und der Winkel der Satelliten sowie der Bebauungsgrad innerhalb eines Messgebietes.

Die Wahl der Feinstaubsensoren gehört zur Gruppe der statischen Facetten. Sensoreigenschaften wie die Messgenauigkeit, die Messverzögerung, der mögliche Messbereich sowie die erlaubte Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsspanne hängen davon ab, welches Messgerät für eine jeweilige Messkampagne verwendet wird.

Ebenfalls zur Gruppe der statischen Facetten gehört die Messgleichheit von identischen Sensoren. Geräte des gleichen Typs können zwar unterschiedlich genaue Messwerte ausgeben, dieser Faktor ist jedoch vor einer Messfahrt überprüfbar und durch Kalibrierungsalgorithmen weitestgehend eliminierbar.

Die Witterungsbedingungen sind ein hochdynamischer Faktor. Mobile Feinstaubmessungen sind kleinräumigen Unterschieden der Temperatur und Luftfeuchtigkeit unterworfen. Die Auswirkungen auf die Messgenauigkeit sind selten vorhersehbar und können nur im Nachhinein durch Korrekturalgorithmen ausgeglichen werden.

Ebenfalls ein dynamischer Faktor ist die Bewegungsgeschwindigkeit eines Feinstaubsensors. Ungeachtet des verwendeten Verkehrsmittels, das für eine Feinstaubmessung benutzt wird, ist eine mobile Messung dynamischen Änderungen der Bewegungsgeschwindigkeit unterworfen. Dagegen ist die Sensorausrichtung ein statischer Faktor. Ob ein Sensor mit dem Lufteingang entgegen, mit oder seitlich der Fahrtrichtung positioniert wird, lässt sich vor einer Messung anpassen. Der Einfluss von Staueffekten oder Anpassungen des Luftstromes innerhalb eines Sensors lässt sich somit schon beim Vorbereiten einer Messung abschätzen.

Einen hochdynamischen Einfluss auf Messgenauigkeiten bietet dagegen der Umgebungsverkehr während einer Messung. Die Anzahl vorausfahrender Fahrzeuge während einer Fahrt kann sich mehrmalig ändern und ist nur schwer vorherzusehen.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Faktoren der Messungenauigkeit bei der mobilen Nutzung von Feinstaubsensoren sind die Positionierungsungenauigkeit, die Spezifikationen der verwendeten Messgeräte, Messunterschiede von identischen Sensoren, Witterungsbedingungen, die Sensorausrichtung, die Bewegungsgeschwindigkeit sowie der Umgebungsverkehr. Diese Arbeit schließt, dass einige Faktoren nicht nur statischer Natur sind, sondern auch dynamischen Änderungen unterworfen sind. Teil der dynamischen Faktoren der Messungenauigkeit sind die Witterungsbedingungen, die Bewegungsgeschwindigkeit sowie der Umgebungsverkehr. Der Einfluss anderer

Faktoren bleibt während einer Messung gleich. Zu dieser Gruppe gehören die Sensorspezifikationen, die Messgleichheit identischer Sensoren sowie die Ausrichtung der Sensoren. Die Positionierungsgenauigkeit hat als einziger Faktor sowie statische als auch dynamische Einflüsse auf die Messgenauigkeit.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nicht nur für mobile Messungen relevant, sondern haben teilweise auch Gültigkeit für statische Messungen. In diesem Fall sind dann die Positionierungsgenauigkeit sowie die Bewegungsgeschwindigkeit zu vernachlässigen. Diskutabel und vermutlich weniger relevant sind der Einfluss der Sensorausrichtung (auch Wind kann für Luftstau am Sensoreingang sorgen) und des Umgebungsverkehrs (Abrieb und Verbrennung haben auch einen Einfluss auf statische Messpunkte).

Luftstaueffekte am Sensoreingang, beeinflusst durch die Bewegungsgeschwindigkeit und Ausrichtung der Sensoren, sind zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht hinreichend erforscht. Literatur zu diesem Thema existiert im Zusammenhang der Messung mit unbemannten Luftfahrzeugen (Wang et al., 2020). Die Autoren wenden eine Korrektur der Messwerte anhand von stationären Messwerten an. Arbeiten, die sich mit dem Einfluss von Luftstau bei der Verwendung von auf Fahrzeugen befestigten Feinstaubsensoren beschäftigen, sind selten.

Der Einfluss des Umgebungsverkehrs ist dahingehend diskutabel, dass andere Fahrzeuge zwar für mehr Feinstaub sorgen, dieser jedoch in manchen Anwendungen durchaus auch Teil der Messungen sein kann. Messen die Sensoren jedoch nahe der Quelle des Feinstaubs (Auspuff oder Reifen des vorausfahrenden Fahrzeuges), können die Messwerte dort kurzzeitig höher sein als am Straßenrand. Konsequenterweise muss die Frage, ob der Umgebungsverkehr für Messungenauigkeiten sorgt oder dieser ein wichtiger Teil der Messungen ist, vor einer Messkampagne erörtert werden.

Zukünftige Arbeiten fokussieren sich auf die Generierung von Datensätzen, um den Einfluss diverser Ungenauigkeitsfaktoren bei der mobilen Messung mit Feinstaubsensoren zu überprüfen.

Literatur

Ahn, K. H., Lee, H., Lee, H. D., & Kim, S. C. (2020). Extensive evaluation and classification of low-cost dust sensors in laboratory using a newly developed test method. *Indoor air*, *30*(1), 137–146.

Bevly, D. M., & Cobb, S. (2010). *GNSS for vehicle control*. Artech House.

Carvlin, G. N., Lugo, H., Olmedo, L., Bejarano, E., Wilkie, A., Meltzer, D., & Seto, E. (2019). Use of citizen science-derived data for spatial and temporal modeling of particulate matter near the US/Mexico border. *Atmosphere*, *10*(9), 495.

Di Antonio, A., Popoola, O. A., Ouyang, B., Saffell, J., & Jones, R. L. (2018). Developing a relative humidity correction for low-cost sensors measuring ambient particulate matter. *Sensors*, *18*(9), 2790.

Gehrig, R., Hill, M., Buchmann, B., Imhof, D., Weingartner, E., & Baltensperger, U. (2004). Separate determination of PM10 emission factors of road traffic for tailpipe emissions and emissions from abrasion and resuspension processes. *International Journal of Environment and Pollution*, *22*(3), 312–325.

Goyal, T., Singh, A., Chhaya, S., Vikas, A., Garg, P., Malik, R., & Sen, R. (2018). Low cost platform design for pollution measurement in delhi-ncr using vehicle-mounted sensors. In *Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* (pp. 759–761).

Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G., & Hagler, G. S. (2016). Using low cost sensors to measure ambient particulate matter concentrations and on-road emissions factors. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1–22.

Hucho, W. H. (Ed.) (2013). *Aerodynamik des Automobils: eine Brücke von der Strömungsmechanik zur Fahrzeugtechnik*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Martin, A. D., Soundy, A. W. R., Panckhurst, B. J., Brown, C. P., Schumayer, D., Molteno, T. C. A., & Parry, M. (2017). Real-time uncertainty quantification using correlated noise models for GNSS positioning. In: *2017 IEEE Sensors* (pp. 1–3). IEEE.

Mukherjee, A., Stanton, L. G., Graham, A. R., & Roberts, P. T. (2017). Assessing the utility of low-cost particulate matter sensors over a 12-week period in the Cuyama valley of California. *Sensors*, *17*(8), 1805.

Röger, C. (2020). Quantifizierung des Umgebungsverkehrs eines Fahrzeuges durch die Messung von Straßenabrieb. *AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik,* 6-2020, 290–295.

Röger, C., & Ismayilova, I. (2020). Predicting ambient traffic of a vehicle from road abrasion measurements using random forest. In *Proceedings of the 13th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science* (pp. 1–7).

Schütz, T. (Ed.). (2013). *Hucho-Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Streibl, N. (2017). *Influence of Humidity on the Accuracy of Low-Cost Particulate Matter Sensors*. Technical report. doi:10.13140/RG. 2.2. 21095.75683.

Wang, T., Han, W., Zhang, M., Yao, X., Zhang, L., Peng, X., ... & Dan, X. (2020). Unmanned aerial vehicle-borne sensor system for atmosphere-particulate-matter measurements: Design and experiments. *Sensors*, *20*(1), 57.

Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., & Biswas, P. (2015). Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol Science and Technology*, *49*(11), 1063–1077.

Zheng, T., Bergin, M. H., Johnson, K. K., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Landis, M. S., & Carlson, D. E. (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high-and low-concentration environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(8), 4823–4846.

Zusman, M., Schumacher, C. S., Gassett, A. J., Spalt, E. W., Austin, E., Larson, T. V., & Sheppard, L. (2020). Calibration of low-cost particulate matter sensors: Model development for a multi-city epidemiological study. *Environment international*, *134*, 105329.