

Sensorsysteme zur Messung der Luftqualität

Konkurrenz zu behördlichen Messungen
oder sinnvolle Ergänzung?

Eine Analyse der Chancen und Grenzen beim Einsatz
von Sensorsystemen

VDI
VDI-Statusreport
Juli 2021

Kernaussagen

Die Überwachung der Luftqualität in Deutschland basiert auf behördlichen Messungen in den Messnetzen der Bundesländer mit standardisierten und validierten Referenzmessverfahren. Diese werden regelmäßig überprüft und kalibriert, sodass sichergestellt ist, dass die gesetzlich festgelegten Grenzwerte für die unterschiedlichen Luftschadstoffe eingehalten werden.

Auf dem Markt sind heutzutage sehr einfach aufgebaute und daher zum Teil vergleichsweise preisgünstige Sensorsysteme verfügbar. Diese erfüllen die gesetzlichen Anforderungen an die Güte von Luftqualitätsmessungen für sich nicht und können derzeit nicht zur gesetzlichen Überwachung von Grenzwerten der Luftqualität eingesetzt werden. Sie sind aktuell keine Alternative zu den in den Messnetzen der Bundesländer eingesetzten Referenzmessverfahren, können

allerdings in bestimmten Situationen eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

Die Nutzung von geeigneten Sensorsystemen in Kombination mit Ausbreitungsmodellen kann das Vertrauen in vorhandene Ausbreitungsmodellierungen stärken. Als zusätzliche Stützstellen können sie die Anwendbarkeit der Modellierungen im jeweiligen Fall bestätigen.

Maßnahmen zur Produktzertifizierung seitens der Hersteller und regelmäßige unabhängige Prüfungen auf Basis technischer Standards können wesentlich dazu beitragen, die Nutzung von Sensorsystemen zu fördern und das Vertrauen in die Verlässlichkeit der damit gewonnenen Messwerte zu erhöhen.

Vorwort

Neben den heute in behördlichen Messnetzen betriebenen Messeinrichtungen werden immer öfter sogenannte „Sensorsysteme“ für die Messung von Luftschadstoffen propagiert. Bei diesen Sensorsystemen handelt es sich um Geräte, die einen zu erfassenden Luftschadstoff in ein Messsignal umwandeln und elektronisch in eine Schadstoffkonzentration umrechnen.

Diese Sensorsysteme sind häufig sehr einfach aufgebaut und damit im Verhältnis zu den aktuell in den behördlichen Messnetzen eingesetzten Messeinrichtungen sehr preisgünstig. Erkauft wird dies mit deutlich höheren Messunsicherheiten. Dadurch ergeben sich zwangsläufig Einschränkungen beim Einsatz solcher Systeme.

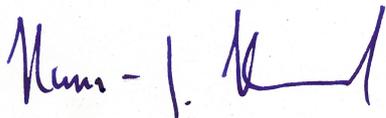
In der Öffentlichkeit stoßen diese Sensorsysteme zur Messung der Luftqualität auf großes Interesse. Sie werden häufig abseits der behördlichen Messstationen in der Fläche eingesetzt, um dort ortsbezogen die Luftqualität zu ermitteln. Zum Vergleich der Ergebnisse werden sie mitunter auch direkt neben diesen Messstationen betrieben. Unterschiede in den Ergeb-

nissen werden in der Öffentlichkeit manchmal dazu genutzt, Zweifel an der Richtigkeit der behördlichen Messungen aufkommen zu lassen.

Andererseits bieten Sensorsysteme zusätzliche Möglichkeiten, um die behördlichen Messnetze zu ergänzen. So kann mit Sensorsystemen in der Regel eine deutlich größere räumliche und zeitliche Auflösung erzielt und die Luftqualität damit anschaulich visualisiert werden. Ebenso sind Bedarfsmessungen gezielt möglich. Zudem können in (mobilen) Sensornetzwerken erweiterte Optionen der Signalverarbeitung realisiert werden („Schwarmintelligenz“).

In diesem Statusreport soll aufgezeigt werden, wo die Chancen und die Grenzen beim Einsatz von Sensorsystemen zur Messung der Luftqualität nach dem heutigen Stand liegen – gerade im Unterschied zu den Messungen in den behördlichen Messstationen. Der Stand der Technik und die diesbezügliche Einordnung von Sensorsystemen, die beim Einsatz zu berücksichtigenden Aspekte sowie das Potenzial für heutige und zukünftige Anwendungen werden dargestellt und mit Empfehlungen unterlegt.

Düsseldorf im Juli 2021



Dr. rer. nat. Hans-Joachim Hummel
Vorsitzender des
Fachbereichs Umweltmesstechnik



Dr. rer. nat. Stefan Jacobi
Stellv. Vorsitzender des
Fachbereichs Umweltmesstechnik

Autoren und Autorinnen

Hannes Brauer, Landesamt für Umwelt, Potsdam

Dr. Susanne Bastian, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden

Dipl.-Ing. Thorsten Conrad, 3S GmbH – Sensors, Signal Processing Systems, Saarbrücken

Dr.-Ing. Andreas Hainsch, Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, Hildesheim

Dr. rer. nat. Stefan Jacobi, Hessisches Landesamt für Natur, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Dr. rer. nat. Rolf Kordecki, VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL), Düsseldorf

Michael Maban, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe

Dipl.-Ing. (FH) Karsten Pletscher, TÜV Rheinland Energy GmbH, Köln

Dr. Stephan Pannek, Freie Hansestadt Bremen, Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr, Bremen

Wilma Travnicek Pagaimo (M. Sc.), Umweltbundesamt, Langen

Prof. Dr. Andreas Schütze, Universität des Saarlandes Naturwissenschaftlich-technische Fakultät, Saarbrücken

Dr. Derk Weidauer, Kleinmachnow

Dr. Maximilian Weiß, Palas GmbH, Karlsruhe

Dr. rer. nat. Peter Wilbring, TÜV Rheinland Energy GmbH, Köln

Dr. rer. nat. Klaus Wirtz, Umweltbundesamt, Langen

Dipl.-Ing. Thorsten Zang, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Essen

Inhalt

Kernaussagen	1
Vorwort	2
Autoren und Autorinnen	3
1 Was sind Sensorsysteme?	5
2 Messung von Luftschadstoffen	6
2.1 Gesetzliche Überwachung der Luftqualität	6
2.2 Möglichkeiten und Grenzen von Sensorsystemen	7
2.3 Bewertung der Messergebnisse	9
2.4 Randbedingungen zum Einsatz von Sensorsystemen	9
3 Empfehlungen	11
4 Fazit	12

1 Was sind Sensorsysteme?

Ein Sensor soll auf chemische oder physikalische Eigenschaften der Luft reagieren und diese in ein elektrisches Signal umwandeln. Mithilfe einer Datenaufbereitung wird aus dem Signal ein Messwert gewonnen. Sensoren werden häufig mit dieser Datenaufbereitung und einer Datenübertragung in einem Gehäuse kombiniert und bilden so gemeinsam ein „Sensorsystem“. Diese häufig sehr einfach aufgebauten und sehr preisgünstigen Sensorsysteme sind von den Referenzmessverfahren und den darauf basierenden Messeinrichtungen zu unterscheiden, die für die gesetzliche Überwachung der Luftqualität in den behördlichen Messnetzen eingesetzt werden.

In den meisten Sensorsystemen werden verschiedene Sensoren verwendet, um parallele Messungen verschiedener Parameter durchzuführen. Durch Multi-sensordatenfusion können so auch Probleme einzelner Sensorelemente, z. B. im Hinblick auf Querempfindlichkeiten, durch entsprechende Modellbildung oder Kalibrierung korrigiert werden.

Sensorsysteme bieten in der Regel eine hohe zeitliche Auflösung und können zudem zu Sensornetzwerken, ob drahtgebunden oder drahtlos, mobil oder stationär, verknüpft werden, um beispielsweise eine höhere räumliche Auflösung und eine bessere Visualisierung der Messdaten zu ermöglichen.

Der Markt für Sensorsysteme entwickelt sich rasant, da diese ständig weiterentwickelt werden und die Nachfrage sehr groß ist. Für Sensorsysteme gibt es zahlreiche Hersteller, es gibt aber auch Systeme der Marke „Eigenbau“. Die verwendeten Sensoren umfassen eine breite Spanne unterschiedlicher Typen und Leistungsklassen. Die Kosten liegen für einfache Bausätze bei wenigen Euro und erreichen bei komplexen Sensorsystemen einige Tausend Euro.

In Sensorsystemen zur Messung der Luftqualität kommen häufig die folgenden Sensoren zum Einsatz, wobei weitere Sensorprinzipien zurzeit Gegenstand intensiver Forschung sind:

- elektrochemische Sensoren, die auf einer chemischen Reaktion zwischen den in der Luft vorhandenen Gasen und der von einem Elektrolyten umgebenen Elektrode im Inneren des Sensors basieren
- Metalloxidsensoren, in denen die in der Luft vorhandenen Gase auf der Sensoroberfläche reagieren und so seinen Widerstand modifizieren
- Fotoionisationsdetektoren, die flüchtige organische Verbindungen ionisieren und den daraus resultierenden elektrischen Strom messen
- optische Partikelzähler, die die Partikelbelastungen durch die Messung von an vorhandenen Partikeln gestreutem Licht detektieren
- optische Gassensoren, die z. B. Kohlenstoffmonoxid oder Kohlenstoffdioxid durch die Messung der Absorption im Infrarotbereich detektieren
- Sensoren für Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte

Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte können mit preiswerten Sensoren bereits gut gemessen werden. Die Messung von Luftschadstoffen ist jedoch mit günstigen Sensoren bisher nur mit gewissen Einschränkungen möglich. Dies gilt beispielsweise für die Messung der Parameter Ozon (O₃), Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x) Schwefeldioxid (SO₂), flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub.

2 Messung von Luftschadstoffen

2.1 Gesetzliche Überwachung der Luftqualität

Luftqualitätsmessungen dienen beispielsweise zur Prüfung auf Einhaltung gesetzlich festgelegter Grenzwerte. Diese Grenzwerte basieren auf Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und dienen dem Schutz der menschlichen Gesundheit. Messdaten, die den qualitativen Anforderungen der rechtlichen Regelungen entsprechen und als Grundlage von Luftreinhalteplänen dienen, müssen belastbar und gerichtsfest sein. Daher schreibt der Gesetzgeber in der 39. Bundes-Immissionsschutzverordnung (39. BImSchV) explizit Messverfahren (Referenzmessverfahren) vor, die es in diesem Zusammenhang anzuwenden gilt. Ebenfalls geregelt sind eine ganze Reihe von Qualitätsanforderungen hinsichtlich der verwendeten Messsysteme und deren Handhabung, der Bewertung der Messergebnisse sowie der Wahl der Probenahmestellen, die eingehalten werden müssen. Dies macht komplexe Qualitätssicherungs- und Qualitätskontrollsysteme erforderlich. Nur so können eine ausreichende Qualität und rechtliche Belastbarkeit der ermittelten Messdaten sichergestellt werden.

Luftschadstoffe

Im Rahmen von Luftqualitätsmessungen zur Prüfung auf Einhaltung gesetzlich festgelegter Grenzwerte werden die in Tabelle 1 aufgeführten gasförmigen Luftschadstoffe sowie Feinstaub regelmäßig überwacht.

Messverfahren

Für die Messung der Luftqualität zwecks Prüfung auf Einhaltung gesetzlich festgelegter Grenzwerte werden standardisierte und validierte Referenzmessverfahren eingesetzt, die eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen müssen. Als Messeinrichtungen kommen hierzu nur Systeme infrage, deren Eignung für die Messaufgabe in einer unabhängigen Prüfung festgestellt wurde (Eignungsprüfung). Nach einer erfolgreichen Prüfung werden diese Messsysteme als zertifiziert bekanntgegeben.

Bei der Messung von Luftschadstoffen können die Ergebnisse durch eine Vielzahl von Störungen beeinflusst werden. Dies können andere Luftschadstoffe, aber auch Umgebungseinflüsse wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Windgeschwindigkeit sowie geräteinterne Instabilitäten sein. Die zertifizierten Messeinrichtungen zur Überwachung der Luftqualität sind so gestaltet, dass die genannten Einflüsse nur einen geringen Einfluss auf das Messergebnis haben und die gesetzliche Anforderung an die maximal zulässige Messunsicherheit eingehalten wird. Dies wird durch die Validierung der Messverfahren und die Eignungsprüfung der Messeinrichtungen grundsätzlich sichergestellt.

Qualitätsanforderungen

Typische Anforderungen, um im täglichen Praxiseinsatz belastbare Messergebnisse erzielen zu können, sind:

- Einhaltung der Probenahmebedingungen
- Funktionsprüfungen vor Ort
- regelmäßige Wartung der Messeinrichtungen
- Überprüfung der Ergebnisse der Messeinrichtungen mittels standardisierter und validierter Referenzmessverfahren
- Einhaltung der maximal zulässigen Messunsicherheit
- Einhaltung der notwendigen zeitlichen Mindestdatenerfassung
- Repräsentativität der Messergebnisse

Die regelmäßige Wartung und Überprüfung der Messeinrichtungen und der Messergebnisse gehören zu den kostenintensivsten Elementen der Qualitätssicherung beim Betrieb eines Luftqualitätsmessnetzes. Die Durchführung und Dokumentation dieser Maßnahmen stellen sicher, dass die Messungen nachvollziehbar und qualitätsgesichert sind.

Tabelle 1. Typische Konzentrationsbereiche für Luftschadstoffe in Deutschland

Luftschadstoff	Mittelungszeitraum	Einheit	Verkehrsnah	Industrienah	Städtisch/ vorstädtischer Hintergrund	Ländlicher Hintergrund
Schwefeldioxid	1 Stunde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-75	0-200	0-75	0-50
	1 Tag	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-20	0-50	0-20	0-10
	1 Jahr	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-10	1-10	0-5	0-6
Stickstoffdioxid	1 Stunde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2-250	1-150	1-100	1-100
	1 Tag	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8-100	3-75	3-75	1-75
	1 Jahr	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	15-75	15-35	10-35	5-25
Ozon	1 Stunde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-100	0-300	0-250	0-250
	1 Tag	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2-80	2-200	2-175	2-200
	1 Jahr	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	20-60	30-75	30-75	40-100
	8 Stunden	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-90	1-300	1-250	1-250
	AOT 40	$\mu\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	1000-16 000	15 000-25 000	15 000-25 000	10 000-35 000
Kohlenstoffmonoxid	1 Stunde	mg/m^3	0-3,5	0-3,5	0-1,5	0-1
	1 Tag	mg/m^3	0-1,5	0-1,5	0-1	0-0,5
	1 Jahr	mg/m^3	0-0,6	0-0,5	0-0,4	0-0,3
	8 Stunden	mg/m^3	0-2,0	0-1,5	0-1	0-1
Benzol	1 Stunde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-3,0	0-1,8	0-2,0	0-1,8
	1 Tage	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,3-2,4	0,1-3,5	0,2-2,0	0,1-1,5
	1 Jahr	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,3-2,0	0,3-3,0	0,3-1,0	0-0,8
Feinstaub PM _{2,5}	1 Stunde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-500	0-500	0-300	0-200
	1 Tag	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-100	1-100	1-75	1-75
	1 Jahr	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10-20	10-20	10-20	5-15
Feinstaub PM ₁₀	1 Stunde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-800	0-800	0-400	0-250
	1 Tag	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2-150	2-150	2-150	1-120
	1 Jahr	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	15-35	15-30	10-25	8-25

2.2 Möglichkeiten und Grenzen von Sensorsystemen

2.2.1 Möglichkeiten

Die Möglichkeiten von Sensorsystemen im Bereich der Luftqualitätsüberwachung hängen stark von dem vorgesehenen Zweck der Messung ab. Der offensichtliche Vorteil gegenüber einer „offiziellen“, eignungsgeprüften und in professionellen Luftmessnetzen eingesetzten Messeinrichtung ist, dass Sensorsysteme in

der Regel erschwinglich und auf den ersten Blick einfach einzusetzen sind.

Obwohl bisher verfügbare Sensorsysteme in Bezug auf die Aussagesicherheit nicht in der Lage sind, mit den oben erwähnten Luftqualitätsmessungen im gesetzlich geregelten Bereich ernsthaft zu konkurrieren, können sie unter Umständen in bestimmten Fragestellungen weiterhelfen. Da sie im Allgemeinen kostengünstiger als die Referenzmessverfahren sind, können sie beispielsweise in größerer Stückzahl flächig ausgebracht werden, um die räumliche Verteilung von Luftschadstoffen qualitativ zu untersuchen. So können

unter Umständen Belastungsschwerpunkte messtechnisch ermittelt werden. Sensorsysteme könnten bei der Überprüfung von Ergebnissen flächenhafter Simulationen (Modell- und Ausbreitungsrechnungen) mit herangezogen werden. Denkbar ist auch eine Untersuchung zu möglichen Maßnahmen im Rahmen der Reduktion von Luftschadstoffen in einem abgegrenzten Straßenabschnitt oder Gebiet. So könnte beispielsweise die Wirksamkeit eines Tunnelbelüftungssystems geprüft werden, indem an allen Tunneleingängen und Tunnelausgängen Sensorsysteme installiert werden. Bei diesen Fragestellungen ist lediglich die Konzentrationsänderung von Interesse. Auch zeitlich vergleichende Betrachtungen sind möglich und liefern beispielsweise Anhaltspunkte dafür, wie sich die Belastung an einem Ort im Tagesverlauf ändert. Ein Beispiel hierfür sind intelligente Verkehrssteuerungssysteme mit dem Ziel einer optimierten Verkehrssteuerung für alle Verkehrsteilnehmer. Dazu werden Verkehrs- und Umweltdaten erhoben und analysiert, um besser auf die komplexen Verkehrssituationen reagieren zu können und die Luftschadstoffbelastung in den Belastungsschwerpunkten zu reduzieren.

Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Größe können Sensorsysteme auch mobil eingesetzt werden. So gibt es z. B. Pläne, Smartphones mit solchen Sensorsystemen auszustatten, um mithilfe der Bevölkerung regionale Belastungen durch Luftschadstoffe aufzudecken. Da Fahrtwind (z. B. beim Fahrradfahren) die Sensormessung beeinflussen kann, ist diese Art der Anwendung derzeit auf Fußgänger beschränkt. Wird eine sehr hohe Anzahl solcher Systeme miteinander verbunden, erhöht sich die Aussagekraft. Man spricht hierbei von einer „Schwarmintelligenz“.

Neben der Abbildung der Luftschadstoffbelastung einzelner Straßenzüge abseits der behördlichen Messeinrichtung könnte zukünftig das Smartphone in Verbindung mit einem Sensorsystem auch dazu verwendet werden, die personenbezogene Belastung zu erheben.

Die Zukunft für kommerzielle Sensorsysteme könnte durchaus vielversprechend sein, wenn die Grenzen der Anwendbarkeit deutlich kommuniziert und realistisch berücksichtigt werden. Manche Sensorsysteme sind bereits in der Lage, eine grobe Auskunft über die Luftqualität zu geben. Sie sind gegebenenfalls gut genug, um z. B. durch gekoppelte Apps die Luftqualität grob in „gut“, „mittel“ oder „schlecht“ einzuteilen. Solche Apps brauchen auch nicht so akkurat wie die wissenschaftlichen oder behördlichen Messungen zu sein. Es muss aber erkennbar und nachvollziehbar sein, auf welcher Grundlage eine solche Aussage oder Bewertung fußt. In jedem Fall kommt der regelmäßigen Kalibrierung der Sensorsysteme eine Schlüsselrolle zu. Heutige Sensorsysteme basieren jedoch

vielfach auf lediglich herstellerekalibrierten Sensorelementen.

2.2.2 Grenzen

Die Anforderungen an rechtskonforme Messungen können Sensorsysteme nach heutigem Stand nicht umfänglich erfüllen. Damit sind sie zurzeit nicht zur Überwachung von Grenzwerten geeignet. Es gibt verschiedenste Vergleichsmessungen, die dies belegen. In einer Testumgebung unter kontrollierten Bedingungen schneiden Sensorsysteme teilweise noch recht gut ab. Gerade in der realen Außenluft gibt es aber stark variierende äußere Einflüsse von Temperatur, Feuchte, Wind, Sonneneinstrahlung und weitere Störeffekte (z. B. durch andere Luftschadstoffe), die dazu beitragen, dass die Systeme dann nicht mehr zuverlässig messen. Sie sind somit derzeit kein Ersatz für die klassische Messtechnik. Die erweiterte Messunsicherheit ist zudem sehr hoch. Abhängig von der Sensorklasse kann sie das Doppelte bis zum Vielfachen der Messunsicherheit einer zertifizierten Messeinrichtung, wie sie von den Landesämtern genutzt wird, betragen. Die interessierte Einzelperson, die ein Sensorsystem einsetzt, erhält häufig keinen Hinweis darauf, wie groß die Messunsicherheit seiner Messwerte ist. Dies ist jedoch essenziell, um die Brauchbarkeit der Messwerte überhaupt einschätzen zu können.

Einige Hersteller versuchen, solche Effekte datentechnisch zu korrigieren. Dafür werden zusätzlich Störkomponenten gemessen und – soweit möglich – zur Korrektur herangezogen (Sensordatenfusion). In einigen Fällen führt dies tatsächlich zu einer Verbesserung der Qualität der Messdaten. Allerdings werden die hinterlegten Software-Algorithmen in der Regel nicht offengelegt, wodurch der Anwender den Weg vom Signal zum Messwert nicht nachvollziehen kann. Oft werden die Algorithmen ohne Wissen der Anwendenden angepasst, sodass aktuelle Daten nicht ohne Weiteres mit bereits vorher ermittelten Daten verglichen werden können.

Einfache Sensorsysteme sind oft zeitlich nicht sehr stabil. Schon nach wenigen Wochen oder Monaten kann es auftreten, dass der Sensor die zu messenden physikalischen oder chemischen Eigenschaften nicht mehr korrekt oder gar nicht mehr erfasst. Das Messergebnis wird somit verfälscht. Ein solcher Fehler fällt ohne zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Regel nicht auf.

Die in Europäischen Normen beschriebenen Methoden zur Messung der Luftqualität hingegen sind auf Referenzstandards rückführbar. Eine Überprüfung der Kalibrierung (Funktionskontrolle) erfolgt zumindest bei den gasförmigen Schadstoffen in der Regel täglich. Eine vergleichbare Funktionskontrolle ist bei

Sensorsystemen derzeit noch nicht möglich oder wird aus Kostengründen nicht realisiert. Eine Kalibrierung wäre dadurch nur für Sensorsysteme in unmittelbarer Nähe einer behördlichen Messstation möglich. Sensorsysteme, die weiter entfernt aufgebaut sind, müssten direkt vor Ort kalibriert werden, da die Standortbedingungen einen großen Einfluss auf den Messwert haben können.

Die Erfahrung zeigt auch, dass die in Sensorsystemen eingesetzten Sensoren der gleichen Bauart (gleiches Messprinzip, gleiche Schadstoffkomponente) abhängig von der Produktionsserie in ihren Eigenschaften stark differieren können. Dies macht eine Klassifizierung von Sensorsystemen schwierig, da die Prüfergebnisse von Vergleichsmessungen mit Referenzmessverfahren nicht bedenkenlos auf baugleiche Sensorsysteme übertragbar sind.

2.3 Bewertung der Messergebnisse

Das Signal der Sensorsysteme hängt in der Regel nicht nur von den zu messenden Luftschadstoffen ab, sondern ist häufig eine Kombination von verschiedenen Effekten, beispielsweise von störenden chemischen Verbindungen, Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck (sogenannte Querempfindlichkeiten). Hohe Luftschadstoffkonzentrationen ergeben ein hohes Messsignal. Bei moderaten Konzentrationen kann das durch den spezifischen Schadstoff verursachte Signal schwächer sein, die oben genannten Störfaktoren täuschen jedoch einen höheren Messwert vor. Somit kann es zu einer fehlerhaften Konzentrationsangabe kommen.

Die Qualität der Sensorsysteme hängt deshalb auch stark von der Technologie und dem konkreten Aufbau des Messsystems (Verwendungszweck, Messort, Randbedingungen) ab. Das Signal des Sensors an verschiedenen Orten zu reproduzieren, gestaltet sich schwierig. Dies betrifft insbesondere den mobilen Einsatz von Sensorsystemen. Auch können meteorologische Einflüsse auf das Signal nicht immer durch eine einfache Korrektur und/oder Kalibrierung kompensiert werden.

Wegen der oben genannten Einschränkungen und der hohen Qualitätsanforderungen an die Messergebnisse sind bisher ausschließlich die Ergebnisse der gesetzlich geregelten Luftschadstoffmessung zur Beurteilung der Luftqualität geeignet, insbesondere in Bezug auf Einhaltung der Grenzwerte.

Auf europäischer Ebene wird daher eine Prüfvorschrift zur Auswertung von Sensorsystemen mit einem strukturierten messtechnischen Ansatz erarbeitet, der die Rückführbarkeit zu nationalen und internationalen Standards gewährleisten kann. Eine solche

Prüfvorschrift ermöglicht die Bewertung der Qualität von Sensorsystemen und ist ein erster wichtiger Schritt, um Messungen mit Sensorsystemen in Zukunft in die Überwachung der Luftqualität für regulatorische und nicht regulatorische Zwecke einzubeziehen.

Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse, die anhand dieser Prüfvorschrift ermittelt wurden, nur auf Sensorsysteme mit derselben Konfiguration (Gehäuse, Datenerfassung, Datenverarbeitung, identische Probenahme und Periodizität der Kalibrierung) übertragbar sind. Außerdem müssen die gleichen Wartungsarbeiten und Verfahren zur Qualitätssicherung wie bei den Tests durchgeführt werden, um verlässliche Messwerte zu erhalten.

Die Prüfvorschrift basiert auf der Auswertung von verschiedenen Variablen, die die Empfindlichkeit, Selektivität und Stabilität von Sensorsystemen beeinflussen. Die Sensorsysteme werden dabei in verschiedene Klassen eingeteilt. Abhängig von der Klassifizierung sind verschiedene Bewertungsschemata für das Prüfverfahren vorgesehen:

- Sensorsysteme der „Klasse 1“ oder „Klasse 2“:
Sensorsysteme, die als Klasse 1 oder Klasse 2 klassifiziert sind, können für behördliche oder andere Zwecke eingesetzt werden. Sie erfüllen die Datenqualitätsziele für orientierende Messungen bzw. für objektive Schätzungen, die in der Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG festgelegt sind.
- Sensorsysteme der „Klasse 3“:
Sensorsysteme der Klasse 3 werden für nicht regulatorische Zwecke eingesetzt, bei denen keine hohen Anforderungen an die Messunsicherheit gestellt werden. Sie können für bestimmte Überwachungsanwendungen nützlich sein, z. B. für Forschungs- und Bildungszwecke sowie für „citizen-science“-Projekte.

Die Klassifizierung der Sensorsysteme gilt nur für die Standorte, für die sie gemäß der Prüfvorschrift getestet wurden.

2.4 Randbedingungen zum Einsatz von Sensorsystemen

Wenn man ein Sensorsystem benutzen möchte, sollte man sich im Vorfeld mit einigen Fragen auseinandersetzen. Die folgende Fragenliste kann dafür als Hilfestellung benutzt werden:

- Was soll gemessen werden?
(z. B. NO_x, O₃, Feinstaub)

- Was ist der Zweck der Messung?
(z. B. Untersuchung der räumlichen Schadstoffverteilung oder der zeitlichen Variabilität)
- Was ist über den Sachverhalt bereits bekannt?
(z. B. vorhandene Messdaten, vorhandene Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen, Quellen im Umfeld, Wirkungen von Luftverunreinigungen)
- Welche Anforderungen soll die Messung erfüllen?
(z. B. räumliche und zeitliche Auflösung, Nachweisgrenze, Messbereich, Messunsicherheit, Querempfindlichkeit)
- Gibt es gegebenenfalls rechtliche Anforderungen an die Messung?
- Welche technischen Randbedingungen müssen erfüllt sein?
(z. B. Stromanschluss, WLAN, Wetterschutz)
- Ist das Sensorsystem für den Einsatzzweck geeignet?
(z. B. kann die Anwendung nur auf den Innenraum beschränkt sein)
- Was zeigt das Sensorsystem an?
(z. B. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder ppb)
- Wie erfolgt die Datenaufnahme/-übertragung des Sensorsystems
(Häufig zeichnen Web-Anwendungen oder Apps die Daten auf, und es müssen technische Voraussetzungen (z. B. WLAN) geschaffen werden.)
- Lässt sich das Sensorsystem kalibrieren?
(Wenn ja, was ist dafür notwendig?)
- Wie lässt sich die Sensormessung qualitätsgesichert durchführen?
(Wenn ja, was ist dafür notwendig?)
- Was ist beim Aufstellen des Sensorsystems zu beachten?
(z. B. Mindestabstände zu Gebäuden, Wetterbedingungen, Standortbedingungen)
- Wie lange liefert ein Sensorsystem verlässliche Daten?
(z. B. müssen die Alterung und Lebensdauer der Sensoren sowie die Häufigkeit der Wartung bedacht werden und sollten nicht unterschätzt werden)
- Was soll/muss bei der Auswertung berücksichtigt werden?
(Umgang mit Messausfällen, Ausreißern und Werten unterhalb der Nachweisgrenze, Messunsicherheit, Maßstäbe zur Beurteilung der gesundheitlichen Relevanz)

3 Empfehlungen

Empfehlung 1:

Der Zweck einer Untersuchung der Luftqualität mit einem Sensorsystem und die erforderliche Datenqualität sollten im Vorfeld festgelegt werden.

Empfehlung 2:

Ein Sensorsystem zur Messung der Luftqualität sollte anhand der beabsichtigten Nutzung und der erforderlichen Datenqualität ausgesucht werden.

Empfehlung 3:

Sensorsysteme zur Messung der Luftqualität müssen, wie jedes andere analytische Instrument, durch ausreichende Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Qualitätslenkung begleitet werden. Da sie produktionsbedingt große systematische Fehler, aber auch Langzeitveränderungen mit einer Drift in Empfindlichkeit und Ansprache zeigen, müssen sie regelmäßig justiert und gegebenenfalls auch kalibriert werden.

Empfehlung 4:

Messungen mit Sensorsystemen können von einem breiten Spektrum chemischer und physikalischer Faktoren beeinflusst werden. Jegliche Korrekturen der Daten, die bezüglich dieser Störfaktoren gemacht werden, müssen gegen das Referenzverfahren validiert werden.

Empfehlung 5:

Vor dem ersten Einsatz sollte geprüft werden, ob die vorgesehenen Sensorsysteme für den geplanten Anwendungszweck geeignet sind. Dies sollte eine Prüfung umfassen, ob die Systeme über die erforderliche Selektivität, Nachweisgrenze und Genauigkeit verfügen.

Empfehlung 6:

Ergebnisse von Messungen mit Sensorsystemen dürfen untereinander nur dann verglichen werden, wenn die Vergleichbarkeit beispielsweise durch eine entsprechende Justierung oder Kalibrierung sichergestellt ist.

Empfehlung 7:

Ergebnisse von Messungen mit einem Sensorsystem dürfen nur dann zur quantitativen Einschätzung der Luftqualität verwendet werden, wenn das Sensorsystem zuvor mit dem Referenzmessverfahren kalibriert und die Messunsicherheit ermittelt wurden.

Empfehlung 8:

Ergebnisse von Messungen mit einem Sensorsystem, das nicht mit dem Referenzmessverfahren kalibriert wurde, sollten nur zur relativen Einschätzung der Luftqualität verwendet werden (z. B. für Trendanalysen).

Empfehlung 9:

Hersteller von Sensorsystemen sollten durch unabhängige Prüfungen der Systeme auf Basis technischer Standards im Rahmen von Zertifizierungsmaßnahmen die Eignung der Systeme für den jeweils festgelegten Anwendungszweck nachweisen, um so dem Anwender, beispielsweise Behörden, Gemeinden oder Messinitiativen, bei der Auswahl und späteren Anwendung von Sensorsystemen eine Einschätzung der Qualität der gewonnenen Messergebnisse zu ermöglichen.

4 Fazit

Gegenwärtig sind noch keine Sensorsysteme verfügbar, die die gesetzlichen Anforderungen an die Qualität von Luftqualitätsmessungen erfüllen. Daher können Sensorsysteme derzeit nicht zur gesetzlichen Überwachung von Grenzwerten der Luftqualität eingesetzt werden. Sie sind aktuell keine Alternative zu den in den Messnetzen der Länder eingesetzten Referenzmessverfahren, können aber in anderen Bereichen eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

Mit den derzeitigen Sensorsystemen lassen sich die relative räumliche Verteilung sowie Tendenzen in der Konzentration von Luftschadstoffen erkennen. Verlässliche quantitative Aussagen sind wegen der häufig fehlenden Kalibriermöglichkeiten meist nicht möglich. Darüber hinaus können Querempfindlichkeiten, Verschmutzungen und Alterungsprozesse des Sensorsystems Änderungen im Verhalten der Sensorsysteme bewirken und dadurch den Messwert massiv beeinflussen. In den meisten Fällen fehlen Angaben zur Qualitätssicherung und Kontrolle der Datenqualität sowie Angaben zur Messunsicherheit. Daraus folgt, dass die Anwender von Sensorsystemen keine Hinweise zur Verlässlichkeit ihrer Messwerte erhalten. Daher kann es sinnvoll sein, eigene mit Sensorsystemen gewonnene Messwerte mit offiziellen Daten zu vergleichen. Solche Daten und weitere ausführliche Informationen zu Luftschadstoffmessungen können auf den Seiten der jeweils zuständigen Landesbehörden und des Umweltbundesamts eingesehen werden.

Sensorsysteme zur Messung der Luftqualität werden ständig weiterentwickelt. Wenn die Qualität der Messungen und andere Nachteile (z. B. die geringe Standzeit) in Zukunft nachhaltig verbessert werden, dann könnten Sensorsysteme zu einem wichtigen zusätzlichen Instrument in der Luftqualitätsüberwachung werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten wären denkbar im Bereich des Verkehrsmanagements, der persönlichen Expositions- und Gesundheitsbewertung, der Bürgerwissenschaft, der Luftqualitätsüberwachung mit höherer räumlicher Auflösung und in räumlich schwierigen Situationen sowie bei organisatorischen und ökonomischen Engpässen z. B. in Entwicklungs- und Schwellenländern.

Die Verwendung von verlässlichen Sensorsystemen in Kombination mit Ausbreitungsmodellen könnte das Vertrauen in Ausbreitungsmodellierungen stärken und die Anwendbarkeit der Modellierungen im untersuchten Fall unterstreichen. Diese Verbindung ermöglicht die Eröffnung eines Dialogs und hilft, das Verständnis für Luftqualitätsmodelle und deren Qualität zu verbessern.

Zertifizierungsmaßnahmen seitens der Hersteller und unabhängige Prüfungen auf Basis technischer Standards würden wesentlich dazu beitragen, das Vertrauen in die Verlässlichkeit der mit Sensorsystemen gewonnenen Messwerte zu erhöhen.

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit mehr als 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 140.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Wir sprechen für Ingenieurinnen und Ingenieure sowie für die Technik und gestalten so die Zukunft aktiv mit. Über 12.000 ehrenamtliche Expertinnen und Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Technik und Gesellschaft
Dr. rer. nat. Rolf Kordecki
Tel. +49 211 6214-410
kordecki @vdi.de
www.vdi.de