

Bewertung von kostengünstigen Sensoren zur Bestimmung von Aerosolen am Arbeitsplatz

B. Sutter, X. Simon, S. Bau, C. Asbach, A. M. Todea, C. Möhlmann, E. Kuijpers

Zuerst veröffentlicht in „Hygiène et Sécurité au Travail“, Dezember 2025.
Hrsg: Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). www.inrs.fr

ZUSAMMENFASSUNG Kostengünstige Aerosolsensoren bieten vielversprechende Perspektiven für die Luftüberwachung am Arbeitsplatz. Die in diesem Artikel zusammengefasste Studie wurde gemeinsam mit mehreren europäischen Forschungsorganisationen, unter anderem dem französischen Institut national de recherche et de sécurité (INRS), durchgeführt und zielt darauf ab, einige dieser Sensoren mit Referenzmethoden zu vergleichen, um auf ihre Vorteile und Grenzen hinzuweisen und Verbesserungsmöglichkeiten vorzuschlagen.

Evaluation of low-cost sensors for determination of aerosols at the workplace

ABSTRACT Low-cost aerosol sensors offer promising prospects for monitoring workplace atmospheres. The study summarized in this article was conducted jointly by a number of European research organisations, including the French Institut national de recherche et de sécurité (INRS). It aims to compare some of these sensors with reference methods, and thus identify their advantages and limitations and make proposals for possible improvements.

1 Einleitung

Die Bewertung der Exposition von Arbeitnehmenden gegenüber Aerosolen unterliegt dem französischen Code du travail (dt.: Arbeitsgesetzbuch), französischen Normen und den Empfehlungen des Institut national de recherche et de sécurité (INRS). In Deutschland kommen Technische Regeln für Gefahrstoffe zum Einsatz. Durch spezielle Methoden lässt sich die Partikelkonzentration in der Luft messen, um sie mit ihrem gesetzlichen oder empfohlenen Grenzwert für die Exposition am Arbeitsplatz vergleichen zu können [1a, 1b]. Bei diesen Methoden werden individuelle Geräte zur Probenahme verwendet, die gezielte Fraktionen

des Aerosols sammeln: einatembare, thorakale oder alveolengängige Fraktion. Die gesammelten Partikel werden dann abhängig vom gesuchten Stoff durch chemische oder physikalische Methoden analysiert. Durch diesen konventionellen Ansatz lässt sich der Durchschnittswert der Exposition gegenüber dem zu ermittelnden chemischen Stoff bestimmen, jedoch nicht die Spitzenkonzentrationen, die durch am Arbeitsplatz angewendete Verfahren entstehen.

Um die Entwicklung der Aerosolkonzentrationen über die Zeit verfolgen zu können, benötigt man Echtzeitmessinstrumente wie optische Partikelzähler oder Photometer. Diese tragbaren Instrumente werden von Hygienikern genutzt, um die Variationen der Aerosolkonzentrationen und -größen besser verstehen zu können und um unterschiedliche Zwecke zu erfüllen, wie Arbeitsplatzstudien, Unterstützung bei der Festlegung von Strategien zur Probenahme, Verbesserung von Schutzmaßnahmen oder auch die Lokalisierung von Emissionsquellen [2]. Trotz ihres Nutzens ist ihr systematischer Einsatz durch die relativ hohen Kosten eingeschränkt.

Seit 2010 gibt es sogenannte kostengünstige Miniatur-Aerosolsensoren (engl.: low-cost sensors, LCS) auf dem Markt, die zwischen 10 und 500 Euro pro Stück kosten. Diese Sensoren, die nur wenige Dutzend Gramm schwer und zwischen 1 und 10 cm groß sind, können im Vergleich zu tragbaren Instrumenten, die in der Regel schwerer und sperriger sind, einfacher eingesetzt werden. Der zunehmende Einsatz dieser Miniatursensoren kann auch dazu beitragen, den Wartungsaufwand für die tragbaren Geräte, die üblicherweise verwendet werden, zu verringern. Daher sind diese Miniatur-Aerosolsensoren für den Einsatz im Rahmen der Bewertung der Luftqualität am Arbeitsplatz interessant.

Dennoch stehen Fragen zur Leistungsfähigkeit ihrem Einsatz im Bereich der Gesundheit am Arbeitsplatz im Wege: Genauigkeit, Empfindlichkeit, Linearität, Reaktionszeit, Robustheit, Alterung, Verschmutzung usw.

KURZFASSUNG

Im Jahr 2019 haben das INRS und mehrere europäische Partner ein pränormatives Projekt gestartet, um die Leistungsfähigkeit von kostengünstigen Miniatur-Aerosolsensoren gegenüber Aerosolen von Nanoobjekten, ihren Agglomeraten und Aggregaten (NOAA) zu bewerten. In diesem Artikel werden die Funktionsweise dieser Geräte, die Ergebnisse aus Labor- und Feldversuchen sowie ihre Vorteile und Grenzen für den Einsatz am Arbeitsplatz vorgestellt. Obwohl diese Sensoren praktisch und kostengünstig sind, weichen sie bei der Messung der Konzentration und Partikelgrößenverteilung von Aerosolen signifikant von den Referenzinstrumenten ab. Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass sich mit diesen Geräten Konzentrationsänderungen in Echtzeit erkennen lassen, was für die Überwachung der Verfahren, das Sicherheitsmanagement der Arbeitnehmer oder für die Priorisierung von Präventionsmaßnahmen einen großen Wert haben kann.



Bild 1. Beispiele für auf dem Markt erhältliche kostengünstige Aerosolsensoren. *Grafik: Autoren*

Im Jahr 2019 haben das INRS und mehrere europäische Partner mit Unterstützung des europäischen Mandats M/461 „Entwicklung von Methoden zur Bestimmung von Nanomaterialien und der Exposition gegenüber Nanomaterialien“ ein pränormatives Forschungsprojekt gestartet, um die Leistungsfähigkeit dieser Sensoren gegenüber Aerosolen von Nanoobjekten, ihren Agglomeraten und Aggregaten zu bewerten (NOAA).¹ Durch die Ergebnisse dieses Projektes können heute erste Empfehlungen für einen Einsatz in Arbeitsumgebungen ausgesprochen werden [3a], die in Zukunft noch ergänzt werden sollen. In diesem Artikel werden die Funktionsweise von kostengünstigen Sensoren, die wichtigsten Ergebnisse aus Labor- und Feldversuchen sowie ihre Vorteile und Grenzen für den Einsatz am Arbeitsplatz vorgestellt.

2 Konzeption und Funktionsprinzip

2.1 Allgemeine Beobachtungen

Die in diesem Artikel vorgestellte Studie befasst sich ausschließlich mit Sensoren (siehe Kasten 2), von denen dutzende vergleichbare Produkte zum Kauf angeboten werden. **Bild 1** enthält eine nicht abschließende Auswahl dieser Sensoren. Es ist interessant, die unterschiedlichen Konzeptionen dieser Sensoren je nach Hersteller und Einsatzgebiet zu sehen, für die sie ursprünglich entwickelt wurden: Automobilindustrie, Messung/Bewertung der Luftqualität in der Umwelt beziehungsweise der Luftqualität in Innenräumen und so weiter.

Die Art der erzeugten Daten ändert sich je nach Sensormodell. Dennoch liefern die meisten Sensoren Werte für Massenkonzentrationen (z. B. in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft), die nach dem Umweltstandard, also nach den Partikelfractionen $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} ,² angegeben werden [3b]. Einige Sensoren liefern auch andere Massenkonzentrationen nach den Partikelfractionen PM_1 bzw. PM_4 , Konzentrationen nach Partikelanzahl (z. B. in Partikel/ cm^3 Luft) gemäß denselben Partikelgrößenfractionen, die Verteilung der Partikel nach

unterschiedlichen Größenklassen oder auch Messungen der internen Bedingungen von Sensoren im Hinblick auf die Temperatur, den Druck oder die relative Luftfeuchtigkeit.

Man muss beachten, dass die Daten der Massenkonzentrationsfractionen, die von den Sensoren ausgegeben werden ($\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10}), nicht direkt auf den Bereich der Luftqualität am Arbeitsplatz übertragen werden können. Tatsächlich gelten nämlich die einatembaren, thorakalen und alveolengängigen Partikelfrak-

¹ über NOAA siehe insbesondere: Dossier – Nanomatériaux. Hygiène & sécurité du travail, 2019, 256, DO 26, S. 26-68. <https://www.inrs.fr/media.html?ref=INRS=DO%2026>

² Die Konventionen in der Umwelt heißen PM_x , was für das englische Particulate Matter (in Luft dispergierte Partikel) steht, und sind in der Norm EN 12341 festgeschrieben. Sie entsprechen den Partikeln, die bei einem aerodynamischen Durchmesser von $x \mu\text{m}$ einen selektiven Probenahmekopf für die Partikelgrößenfraction mit einer Effizienz von 50 % durchströmen. Die einzigen Konventionen, die aktuell reguliert werden, sind PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$.

³ Die thorakale Fraction eines Aerosols entspricht der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit des Einatmens und des Eindringens von Partikeln in die Atemwege jenseits des Kehlkopfes bei einem Erwachsenen, siehe INRS – MétroPol. Prélèvement des aérosols – Généralités [6]. Die Konventionen im Bereich der Hygiene am Arbeitsplatz sind im Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit des Eindringens von suspendierten Partikeln in die Atemwege in den Normen ISO 7708 und EN 481 definiert. Sie stammen von experimentellen Daten, die für eine Atmung über den Mund und/oder die Nase gemittelt wurden. Die drei Konventionen, die häufig verwendet werden, lauten:

- einatembare Konvention, welche die Fraction der Partikel entnehmen soll, die sich im Bereich des Mundes und der Nase befinden und die eingeatmet wird.; Es handelt sich um die sogenannte einatembare Fraction.
- thorakale Konvention, welche die Fraction der eingeatmeten Partikel entnehmen soll, die jenseits des Kehlkopfes eindringt, die thorakale Fraction.
- alveolengängige Konvention, welche die Fraction der eingeatmeten Partikel entnehmen soll, die in die nicht mit Zilien versehenen Atem-

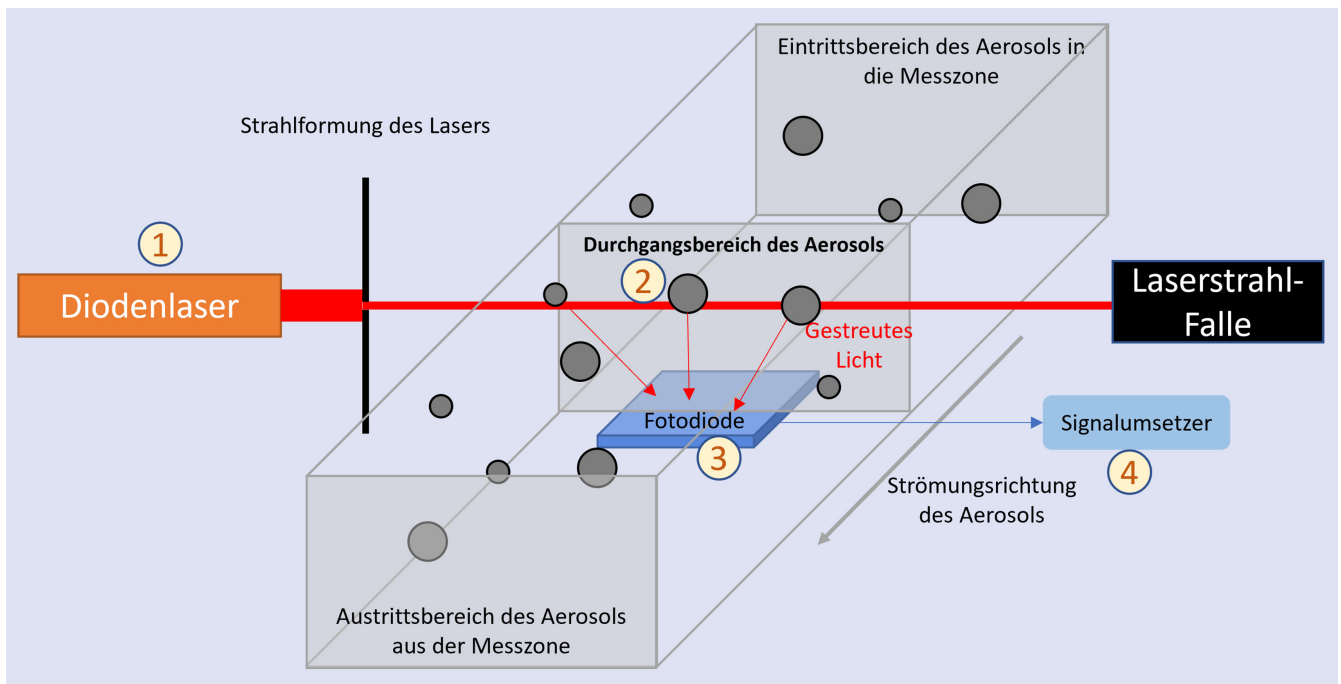


Bild 2. Schema des Funktionsprinzips von kostengünstigen Aerosolsensoren. Grafik: Autoren

tionen als Referenz für die Bewertung der Exposition von Arbeitnehmenden [4 bis 6].

Auch wenn die Fraktionen PM_{10} und PM_4 , die von einigen Sensoren gemessen werden, nahe an die thorakale beziehungsweise alveolengängige Fraktion herankommen³, stellt dies eine große Einschränkung für den Einsatz dieser Sensoren im Kontext der Expositionsbewertung am Arbeitsplatz dar.

2.2 Messprinzip

Alle ermittelten kostengünstigen Aerosolsensoren verwenden das gleiche Funktionsprinzip, das auf der Streuung von Licht basiert, das durch die Wechselwirkung zwischen Partikeln und einem Laserstrahl entsteht [7]. In Bild 2 wird das allgemeine Funktionsprinzip von Aerosolsensoren schematisch dargestellt. Diese Funktionsweise lässt sich in vier Schritte unterteilen:

- Emission von Licht mithilfe einer Laserdioden, im Allgemeinen mit einer Wellenlänge von 660 nm,
- Wechselwirkung Licht/Materie; durchquert das Aerosol die Detektionskammer, streuen die Partikel das Licht in alle Richtungen,
- Detektion des gestreuten Lichts mithilfe einer oder mehrerer Fotodioden, die in bestimmten Winkeln angebracht sind,
- Umwandlung des gestreuten Lichts in elektrische Signale durch die Fotodiode(n). Die Anzahl und Intensität der erfassten Impulse werden dann analysiert und in Partikelkonzentrationen umgewandelt.

Neben diesen bekannten Funktionselementen nennen die Hersteller keine weiteren Einzelheiten zu den Umwandlungsalgorithmen, die in den Sensoren eingebettet sind, wahrscheinlich um ihr geistiges Eigentum zu schützen. Dasselbe gilt für die Kalibrierungsmethode, die vom jeweiligen Hersteller angewendet wird und bei der ganz selten die Art des verwendeten Aerosols bekannt ist.

BEGRIFFSBESTIMMUNGEN UND BEZEICHNUNGEN

- **Sensorelement:** Dieses Teil erzeugt ein Signal, wenn ein Aerosol vorbeikommt. Es muss mit Strom versorgt werden. Das unverarbeitete Signal muss von externen Elementen gemessen werden. Es kann im Handel nicht einzeln erworben werden und wird von jedem Hersteller je nach vorgesehenem Einsatz optimiert.
- **Sensor oder Miniatursensor:** Verbindung aus einem empfindlichen Element mit einer elektronischen Schaltung für die Stromversorgung, den Empfang des unverarbeiteten Signals und seine Umwandlung in digitale oder textuelle Daten. Es handelt sich sozusagen um eine „Black Box“, deren Berechnungsalgorithmen nicht bekannt sind. Für die Stromversorgung und die Kommunikation mit ihm sind Kenntnisse aus dem Bereich der Elektronik erforderlich (Computer, Arduino-Karte usw.).
- **Monitor oder Sensorsystem:** enthält den Sensor, ermöglicht seine Stromversorgung, empfängt und überträgt die Daten an ein lokales Aufzeichnungsgerät (Speicherkarte) oder an einen Server, der die Daten kompiliert, archiviert und so weiter. Dabei handelt es sich um ein einsatzfertiges Werkzeug, das von jedem Nutzenden verwendet werden kann, der die Aerosolkonzentration in der Luft wissen möchte. Die Integration des Sensors in einen Monitor erhöht die Kosten von ca. 250 Euro auf einige Tausend Euro deutlich. Einige Monitore enthalten auch noch andere Sensoren, zum Beispiel Gassensoren, für eine Messung mehrerer Schadstoffe.

	Alphasense OPC-R1	Nova Fitness SDS011	Plantower PMS 7003	Sensirion SPS30	Groupe Tera Next PM	Groupe Tera Next PM CR
Anzahlkonzentration	16 Kanäle, 0.3 – 12.4 µm	X	6 Fraktionen >0.3, >0.5, >1.0, >2.5, >5.0, <10 µm	5 Fraktionen <0.5, <1.0, <2.5, <4.0, <10 µm	3 Fraktionen <1.0, <2.5, <10 µm	5 Fraktionen <0.5, <1.0, <2.5, <4.0, <10 µm
Massenkonzentration	3 Fraktionen PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	2 Fraktionen PM _{2.5} , PM ₁₀	3 Fraktionen PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	4 Fraktionen PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀	3 Fraktionen PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	X
Preis	~280 €	~30 €	~25 €	~30 €	~65 €	~150 €

Bild 3. Eigenschaften jedes der sechs ausgewählten Typen von Miniatur-Aerosolsensoren. Grafik: Autoren

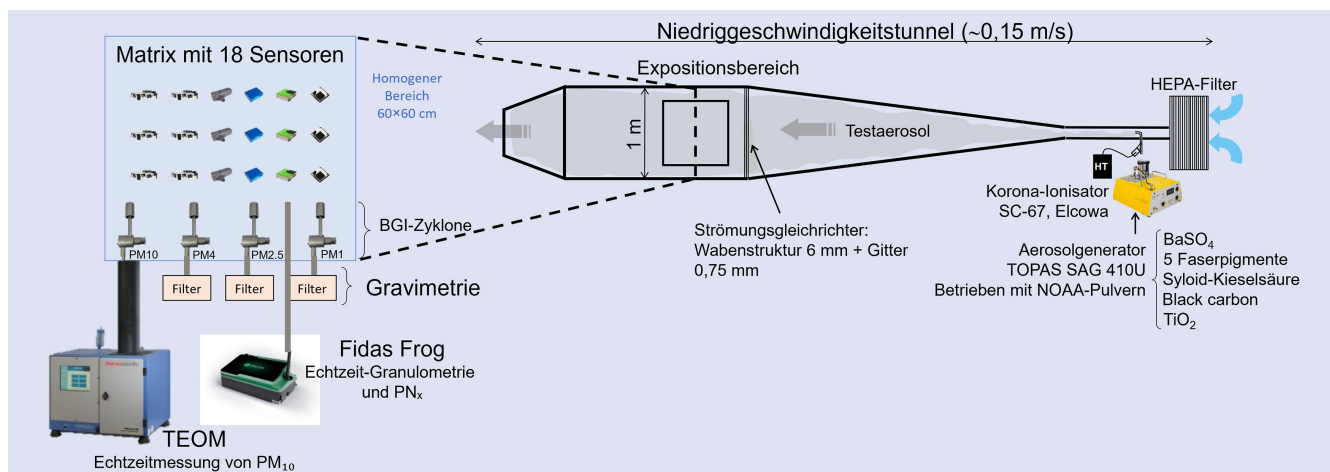


Bild 4. Schematische Darstellung des Prüfstandes und der Methodik, die angewendet wurde, um die von den Miniatur-Aerosolsensoren gemessenen Konzentrationen mit Referenzmessungen für neun NOAA-Pulveraerosole zu vergleichen. Grafik: Autoren

3 Leistungsbewertung

3.1 Pränormatives Forschungsprojekt

Das INRS hat sich 2019 in einem Konsortium mit fünf europäischen Partnern mit dem Ziel verpflichtet, experimentelle Arbeiten zur Leistungsbewertung von Miniatur-Aerosolsensoren gegenüber unterschiedlichen Aerosolen durchzuführen, die im Trockenverfahren aus NOAA-Pulvern hergestellt werden.

Neben dem INRS gehören zu diesem Konsortium außerdem die IUTA, die BAuA, das IFA, die TNO und das LNE.⁴ Diese Arbeiten haben zur Erstellung des normativen Dokumentes CEN/TS 18086 [3a] beigetragen, bei dem es sich um eine „technische Spezifikation“ handelt und in dem die Vorteile und Einschränkungen beim Einsatz der Miniatur-Aerosolsensoren zur Bewertung der Luftqualität am Arbeitsplatz aufgezeigt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten, die zum Teil von der Europäischen Kommission im Rahmen des Mandats M/461 fi-

nanziert wurden, werden in vorliegendem Dokument vorgestellt.

3.2 Inhärente Leistung der Sensoren Material und Methoden

Für diese experimentelle Studie wurden sechs Miniatur-Aerosolsensoren basierend auf einer gezielten Literaturrecherche nach

wege eindringt. Dabei handelt es sich um die alveolengängige Fraktion.
⁴ IUTA: Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik, Deutschland; BAuA: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Deutschland; IFA: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Deutschland; TNO: Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek, Niederländische Organisation für angewandte Forschung, Niederlande. LNE: Laboratoire national de métrologie et d'essais, Nationales Laboratorium für Metrologie und Tests, Frankreich.

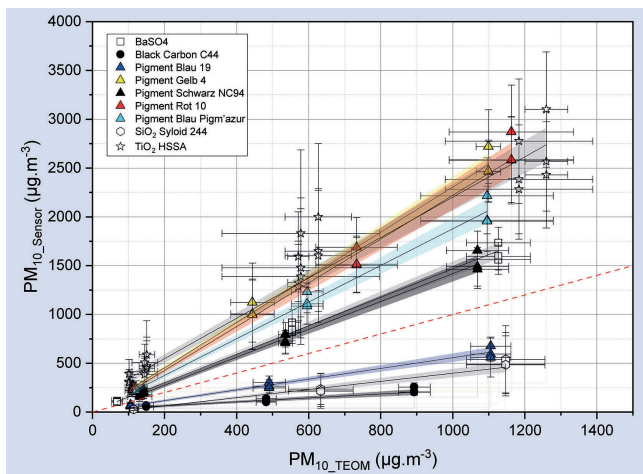


Bild 5. Vergleich der Durchschnittswerte der PM10-Massenkonzentrationen, die von drei Prüfxemplaren derselben Sensorart und vom Referenzinstrument bestimmt wurden, für neun NOAA-Pulver, die in drei unterschiedlichen Konzentrationsstufen erzeugt wurden. Die Fehlerbalken (horizontale und vertikale Intervalle) stehen für die Konzentrationsschwankungen, die während des Messzeitraums beobachtet wurden und einer Standardabweichung ($\pm \sigma$) entsprechen. *Grafik: Autoren*

unterschiedlichen Kriterien (Einsatzhäufigkeit, technische Eigenschaften, Kompatibilität mit einem Einsatz am Arbeitsplatz, Kosten, Platzbedarf) ausgewählt. In **Bild 3** werden die wichtigsten Eigenschaften dieser sechs Sensoren gezeigt: Messdaten abhängig von den Zählkanälen, von den Massenfraktionen und Preis.

Gemäß den Herstellerangaben beträgt der kleinste Durchmesser, der bei einer Effizienz von 50 % (d_{50}) erfasst wird, für alle Sensoren 0,3 μm . Mit Ausnahme des Sensors NextPM CR, der für Messungen in Reinnräumen bestimmt ist, liefern alle ausgewählten Sensoren Werte für die Massenfraktionen $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} . Optional können einige Sensoren auch Werte für die Massenfraktionen PM_1 und PM_4 oder die Partikelanzahlkonzentrationen liefern, die mit unterschiedlichen Größenklassen verbunden sind. Durch die Heterogenität der Daten, die von den unterschiedlichen Sensortypen geliefert werden, wird ein Vergleich ihrer Leistung erschwert.

Es wurden drei Exemplare jedes Sensortyps in der homogenisierten Expositionszone eines Niedergeschwindigkeits-Lufttunnels angebracht und zur gleichen Zeit Prüfaerosolen ausgesetzt [8]. Neun NOAA-Pulver mit unterschiedlichen optischen und physikalischen Eigenschaften wurden ausgewählt. Es wurde ein Trockenaerosolgenerator (TOPAS SAG 410U) verwendet, um je

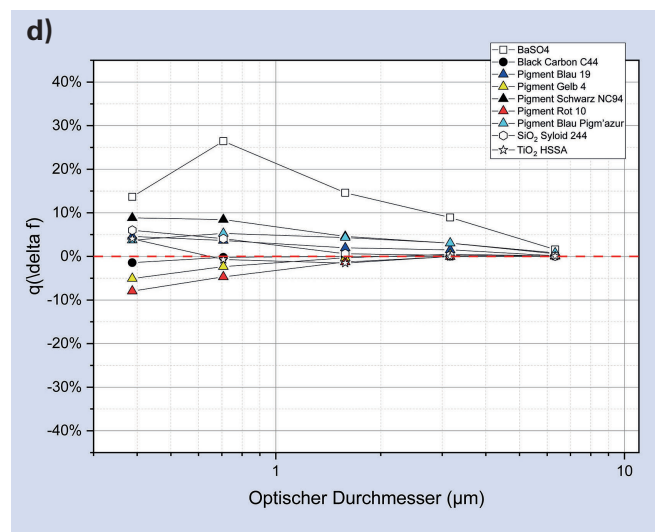
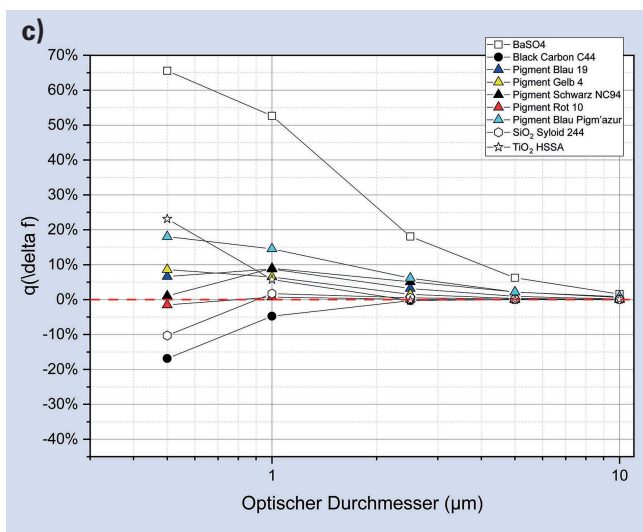
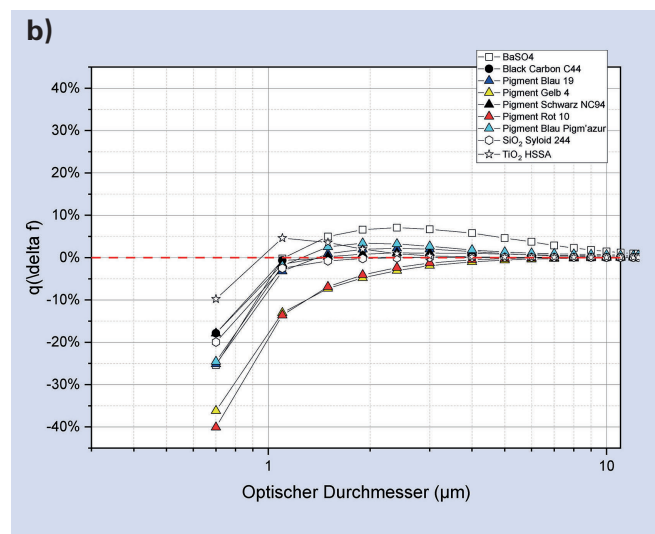
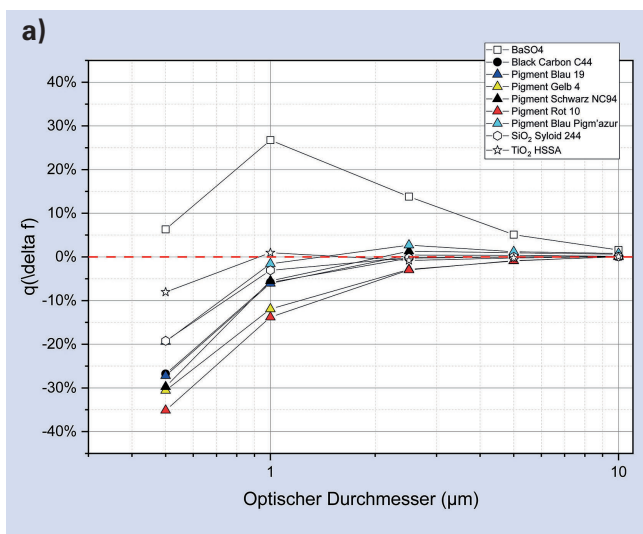


Bild 6. Abweichungen der kumulierten Partikelgrößenverteilungen zwischen vier Sensortypen und dem Referenzinstrument. *Grafik: Autoren*

Tabelle. Reaktionszeit (in Sekunden) eines Referenzinstrumentes und von vier Sensortypen bei plötzlichen Konzentrationsschwankungen nach oben (von 10 % auf 90 % der endgültigen Konzentration) und nach unten (von 90 % auf 10 % der endgültigen Konzentration). Sensortypen: 1: Next PM; 2: SPS30; 3: SDS011; 4: OPC-R1.

Instrumente	Theoretisch	Welas (Referenz)	Sensor Typ 1	Sensor Typ 2	Sensor Typ 3	Sensor Typ 4
t_{10-90} (s) – Anstieg	0,5	0,78	8,1	4,5	8,7	1,5
t_{90-10} (s) – Abfall	0,5	0,69	8,2	5,0	24,6	1,5

des dieser Pulver nach einer Neutralisierung der elektrischen Ladungen der Partikel durch einen Corona-Ionisator (SC67 Elcowa) im Tunnel zu dispergieren. Es wurde auf drei Massenkonzentrationsniveaus (100, 500 und 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) abgezielt.

In **Bild 4** wird eine schematische Darstellung des Prüfstandes und der Methodik gezeigt, die bei der Durchführung dieser Arbeiten verwendet wurden. Die Konzentrationswerte der Sensoren wurden mit folgenden Referenzmethoden verglichen:

- Echtzeit-Messgerät (TEOM-Oszillationsmikrowaage), ausgestattet mit einem Selektor für die Fraktion PM_{10} ,
- Probenahme mit Zyklonen [9] und gravimetrische Analyse mit einer Präzisionsmikrowaage für die Fraktionen PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$, und PM_4 . Es wurden die Konzentrationen der Partikelanzahl pro Partikelgrößenklasse mit denjenigen Konzentrationen verglichen, die mit einem optischen Partikelzähler Fidas Frog (Palas) gemessen wurden.

Die wichtigsten Ergebnisse

Die Konzentrationswerte (Massen- oder Anzahlwerte), die von den untersuchten Sensoren bestimmt wurden, wurden mithilfe von Vergleichsdiagrammen, wie sie in **Bild 5** für den Sensor Alphasense OPC-R1 dargestellt sind, mit den Werten der Referenzmethoden verglichen. Dieses Diagramm vergleicht den Mittelwert der PM_{10} -Massenkonzentration, der von einem Sensor gemessen wurde, mit dem Mittelwert der PM_{10} -Massenkonzentration, der vom Referenzgerät gemessen wurde. Jede NOAA-Pulverart, die erzeugt wurde, wird durch eine eigene Kombination aus spezifischen Symbolen und Farben dargestellt. Die Ergebnisse (**Bild 5**) führen zu mehreren Feststellungen:

- Es gibt eine lineare Beziehung zwischen den PM_{10} -Konzentrationen der Sensoren und denjenigen der Referenzmessung mit zufriedenstellenden Regressionskoeffizienten von mehr als 0,95.
- Abhängig von der Art des NOAA-Aerosols variieren die Steigungen der linearen Regression stark.
- Die Steigungen sind systematisch weit von der Paritätsgeraden entfernt, die durch die rote gestrichelte Linie dargestellt wird.
- Die PM_{10} -Messwerte der drei Sensoren desselben Typs zeigen bei jedem Experiment eine geringe Streuung.

Diese Beobachtungen bleiben unabhängig vom betrachteten Sensortyp, von der gemessenen Größe (PM_{1-7} , $\text{PM}_{2,5-7}$, PM_{4-7} , PM_{10} -Konzentrationen auch in Partikelanzahl) und von der Art des Prüfaerosols gültig. Es besteht außerdem eine starke Heterogenität der gemessenen Konzentrationen zwischen den unterschiedlichen untersuchten Sensormodellen (die um einen Faktor von 0,02 bis 4 gegenüber der Referenzmessung variieren können).

Einige Sensoren können darüber hinaus auch Angaben zur Partikelgrößenverteilung des Aerosols liefern [10]. Diese Daten wurden mit der Partikelgröße verglichen, die mit dem Referenzinstrument gemessen wurde (optischer Partikelzähler). Die Sensoren weisen andere Partikelgrößenklassen als das Referenzinstrument auf. Daher wurden die relativen kumulativen Häufigkeiten der Partikelgrößen berechnet und im Anschluss die Abweichungen δf (%) zwischen diesen Häufigkeiten bestimmt.

In **Bild 6** wird für vier unterschiedliche Sensortypen der Verlauf der Abweichung δf abhängig vom oberen optischen Durchmesser jeder Partikelgrößenklasse und für jede Art von erzeugtem NOAA-Pulver gezeigt. Im Idealfall beträgt δf gleich 0 %, wenn es keinen Unterschied zwischen der relativen Partikelgröße, die vom Sensor gemessen wurde, und derjenigen, die vom Referenzgerät ermittelt wurde, gibt.

Bild 6 zeigt, dass die Abweichung δf bei Partikeln mit einem optischen Durchmesser von höchstens 1 μm allgemein groß ist (größer als ± 10 %) und im Einzelfall +70 % erreichen kann. Über einen optischen Durchmesser von 1 μm hinaus beträgt die Abweichung δf folglich weniger als ± 10 %, was eine Übereinstimmung zwischen den Werten, die von den Sensoren gemessen wurden, und dem Referenzgerät zeigt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Miniatursensoren in der Mehrheit nicht dazu geeignet zu sein scheinen, die Partikel im Submikrometerbereich korrekt zu bestimmen und die Partikelgrößenverteilung eines NOAA-Aerosols ableitbar zu berücksichtigen.

Schließlich wurde die Reaktionszeit der Sensoren im Rahmen von experimentellen Tests bewertet, die vom IUTA durchgeführt wurden. In der **Tabelle** werden die Reaktionszeiten (in Sekunden) von vier Sensortypen und einem Labor-Referenzinstrument (Welas, Fa. Palas) gezeigt. Die genannten Werte stellen die Zeit dar, die das Instrument benötigt, um von 10 % auf 90 % der endgültigen Konzentration zu gelangen (t_{10-90} , Anstieg) und umgekehrt (t_{90-10} , Abfall). Anhand der Ergebnisse der Tabelle können die folgenden Feststellungen getroffen werden:

- Alle Sensoren haben signifikant höhere Reaktionszeiten als das Referenzinstrument. Die Analyse der Daten zeigt, dass die Sensoren Algorithmen zur Glättung der Schwankungen und zur Reduzierung des Messwerttrauschens enthalten, dass diese Algorithmen allerdings dazu beitragen, ihre Reaktionszeit zu erhöhen.
- Die Reaktionszeiten sind für einen Konzentrationsanstieg oder -abfall gleich, mit Ausnahme des Sensors vom Typ 3, dessen Reaktionszeit in der Abfallphase dreimal länger ist als in der Anstiegsphase. Die Ursache für dieses Verhalten ist wahrscheinlich der interne Algorithmus.
- Die Reaktionszeiten dauern überwiegend weniger als zehn Sekunden, wodurch die untersuchten Sensoren grundsätzlich dennoch die meisten Spitzenwerte der Partikelkonzentration,

die in Arbeitssituationen vorkommen können, erkennen und berücksichtigen können.

4 Diskussion und Fazit

Die Experimente, die im Rahmen dieser Arbeiten durchgeführt wurden, zeigen die Stärken und Grenzen des Einsatzes von kostengünstigen Aerosolsensoren in Arbeitsumgebungen auf. Man muss dabei beachten, dass diese Sensoren vorwiegend für die Messung von Partikelkonzentrationen in der Umgebungsluft und nicht in Arbeitsumgebungen entwickelt wurden. Tatsächlich besitzen die Sensoren Algorithmen, die so optimiert wurden, dass sie Konzentrationswerte ergeben, die mit Referenzinstrumenten zur Messung von Umweltaerosolen vergleichbar sind. Allerdings haben die Aerosole, die bei unterschiedlichen beruflichen Tätigkeiten freigesetzt werden können, häufig Eigenschaften, die sich von denen typischer Umweltaerosole stark unterscheiden, zum Beispiel die Partikeldichte, ihre Morphologie, ihre Partikelgrößenverteilung und ihr Brechungsindex. Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Konzentrationen, die von den Miniatursensoren geliefert werden, in ihrem Absolutwert fehlerhaft sein und Verzerrungen enthalten können, die abhängig vom Sensor-/Aerosol-Paar variieren können.

Darüber hinaus werden die Konzentrationswerte, die von diesen Sensoren stammen, in PM_x -Fraktionen angegeben, die im Bereich der Hygiene und Gesundheit am Arbeitsplatz keine Referenz darstellen. Daher ist es derzeit nicht möglich, diese Aerosolsensoren zur gesetzlich vorgeschriebenen Bewertung der Exposition von Arbeitnehmern einzusetzen.

Allerdings haben die durchgeführten Experimente gezeigt, dass diese Sensoren zur Risikoprävention in Arbeitsumgebungen verwendet werden können. Tatsächlich werden unter den getesteten Bedingungen für ein bestimmtes Aerosol stabile Verhältnisse zwischen den von den Sensoren gelieferten Konzentrationswerten und denjenigen beobachtet, die von Referenzmethoden und -instrumenten stammen. Das weist darauf hin, dass es möglich ist, die Messverzerrung zu bestimmen und die von diesen Sensoren für ein bestimmtes Aerosol gelieferten Werte zu korrigieren. Darüber hinaus scheinen sich die Reaktionszeiten dafür zu eignen, die Dynamik der Aerosolkonzentrationen, die allgemein am Arbeitsplatz beobachtet wird, zu berücksichtigen.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Studie wurden einige Leistungsmerkmale und Grenzen kostengünstiger Aerosolsensoren in einem Kontext der Prävention beruflicher Risiken aufgezeigt. Auch wenn sie praktisch sind und wenig kosten, weisen sie signifikante Abweichungen gegenüber den Referenzinstrumenten bei der Messung der Konzentrationen und Partikelgrößenverteilung von Aerosolen auf. Diese Abweichungen sind in erster Linie von der Art der Partikel sowie von den spezifischen Eigenschaften jedes einzelnen Sensors abhängig. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass sich mit diesen Geräten Änderungen der Konzentration in Echtzeit entdecken lassen, was für die Überwachung der Verfahren, für das Sicherheitsmanagement der Arbeitnehmer beziehungsweise für die Priorisierung der Präventionsmaßnahmen von großem Wert sein kann.

Um sich die kostengünstigen Aerosolsensoren im Kontext der Prävention beruflicher Risiken zunutze zu machen, können mehrere Forschungs- und Entwicklungsperspektiven angedacht wer-

den. Zunächst ist es unerlässlich, dass die Entwickler und Hersteller von Sensoren die Bestimmung repräsentativer Massenkonzentrationen einer oder mehrerer konventioneller Partikelfraktionen im Zusammenhang mit der Gesundheit (einatembar, thorakal und/oder alveolengängig) in ihre Algorithmen integrieren. Diese Funktionalität würde die Integration dieser Sensoren in die Ansätze zur Expositionsprävention und zur Kontrolle der Verfahren am Arbeitsplatz vereinfachen. Es wäre außerdem relevant, die Bemühungen zur Verbesserung der Kalibrierungsmethoden dieser Sensoren weiter zu verfolgen und sie spezifisch an die Arbeitsumgebung anzupassen. Die Integration fortgeschrittener Techniken zur Datenverarbeitung, wie maschinelles Lernen, könnte die Korrelation zwischen den Messungen der Sensoren und den Referenzwerten verbessern. Parallel dazu wären zusätzliche Feldstudien notwendig, um die Robustheit der Sensoren in verschiedenen Arbeitsumgebungen zu bewerten, unter Berücksichtigung der Komplexität der Zusammensetzungen und Eigenschaften der am Arbeitsplatz vorkommenden Aerosole. Durch ein besseres Verständnis der systematischen Abweichungen der Sensoren wäre demnach eine Optimierung ihres Einsatzes in einem beruflichen Umfeld möglich. Schließlich stellt der Einsatz dieser Sensoren in einem Messnetz in Arbeitsbereichen ein Thema von wachsendem Interesse dar, da er zahlreiche Vorteile für die Prävention bietet: Überwachung der Emissionen in einem Arbeitsbereich in Echtzeit, Lokalisierung der Quellen, Schätzung der individuellen Exposition, Expositionsdiagnosen je nach Aufgabe und weiteres.

L I T E R A T U R

- [1a] INRS – Base de données – Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP): Substances chimiques. www.inrs.fr/publications/bdd/vlep.html
- [1b] GESTIS – Internationale Grenzwerte für chemische Substanzen (GESTIS-ILV). dguv.de/ifa/gestis/gestis-internationale-grenzwerte-fuer-chemische-substanzen-limit-values-for-chemical-agents/index.jsp
- [2] Bau, S.; Witschger, O.; Galland, B.; Martin, P.: Métrologie en temps réel de substances chimiques au poste de travail: intérêts et limites. Hygiène & sécurité du travail, 2015, 239, DC 9, S. 6-10. www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%209
- [3a] DIN CEN/TS 18086 – Exposition am Arbeitsplatz – Direkt anzeigende kostengünstige Feinstaubsensoren zur Messung luftgetragener NOAA – Leitlinien für den Einsatz. DIN 2025
- [3b] DIN EN 12341 – Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{10} oder $PM_{2,5}$ -Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2023
- [4] DIN EN 481 – Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel; Deutsche Fassung EN 481:1993.
- [5] Simon, X. et al.: Analyse des fractions granulométriques utilisées pour l'évaluation des expositions par inhalation d'aérosols. Pertinence et comparaison des fractions environnementales – PM_{10} , $PM_{2,5}$ – et professionnelles – inhalable, thoracique, alvéolaire. Anses, 2023, Rapport. anses.hal.science/anses-04170323
- [6] INRS – Guide méthodologique: prélèvement des aérosols. Généralités. 2015. <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-generalite-aerosol.pdf>
- [7] Ouimette, J. et al.: Fundamentals of low-cost aerosol sensor design and operation. *Aerosol Sci. Technol.*, 2024, 58, 1, S. 1-15. doi:10.1080/02786826.2023.2285935
- [8] Fabries, J.F.; Carton, B.: Realization of a dust tunnel. Response of some air sampling instruments used in industrial hygiene. *Stud. Environ. Sci.*, 1980, S. 279-283. Zugänglich über: doi:S0166-1116(08)71668-6
- [9] INRS – Guide méthodologique. Prélèvement des aérosols par cyclone. 2019. www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cyclone/metro-pol-prelevement-cyclone.pdf
- [10] Matera, V., Gaudel, N., Bau, S.: Intérêts et optimisation des prélèvements d'aérosols par impacteurs en cascade. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 269, NT 104, S. 34-41. www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20104

Benjamin Sutter,

Xavier Simon,

Sebastian Bau

Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Nancy/Frankreich.

Christof Asbach,

Ana Maria Todea

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik (IUTA), Duisburg.

Carsten Möhlmann

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Eelco Kuijpers

Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO), Den Haag/Niederlande.