Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft

N. Rudnik[1], B. Kroll[1], U. Schneiderwind[1], R. Arocas[2], T. Schultze[2], J.C. Balzer[2], C. Asbach[1] und S. Schumacher[1]

[1]Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA), 47229 Duisburg
[2]Fachgebiet Nachrichtentechnische Systeme, Universität Duisburg-Essen, 47057 Duisburg
Kontakt: rudnik@iuta.de

Zusammenfassung

Die Innenraumluftqualität ist aus gesundheitlicher Sicht von hoher Bedeutung, da der Mensch in Industrienationen einen Großteil seiner täglichen Zeit in Innenräumen verbringt. Dennoch ist die Innenraumluftqualität insbesondere in privaten Räumlichkeiten bislang nur begrenzt erforscht. Da herkömmliche Messgeräte aufgrund von Lautstärke, Platzbedarf und hohen Kosten nur eingeschränkt für einen flächendeckenden Einsatz in bewohnten Innenräumen geeignet sind, wird in diesem Beitrag die Entwicklung und Validierung eines mobilen Innenraummesssystems auf Basis kostengünstiger Sensoren vorgestellt. Hierzu werden die Ergebnisse umfangreicher Validierungsversuche unter Labor- und Realbedingungen vorgestellt und darauf basierend falls erforderlich spezifische Korrekturfunktionen abgeleitet. Darüber hinaus werden erste Ergebnisse aus dem Einsatz des Messsystems im Rahmen einer Pilotstudie in Privathaushalten vorgestellt. Die hierbei erzielten Messwerte werden im Vergleich zu aktuellen Leitwerten für die Innenraumluftqualität eingeordnet.

Einleitung

In Industrienationen verbringen Menschen den Großteil ihrer Zeit in Innenräumen. Aktuelle Studien zeigen, dass bis zu 90 % der täglichen Zeit in geschlossenen Räumen verbracht werden, wovon rund zwei Drittel auf den eigenen Wohnbereich entfallen [1, 2]. Während dieser Zeit stehen die Menschen mit einer Vielzahl an potenziell gesundheitsrelevanten Luftschadstoffen in Kontakt: Hierzu zählen sowohl partikelförmige Schadstoffe, beispielsweise Feinstaub und Black Carbon, als auch gasförmige Schadstoffe wie etwa flüchtige organische Verbindungen, Stickoxide oder Radon. Darüber hinaus können auch Umgebungsparameter wie Temperatur, Luftfeuchte, Beleuchtung oder Lärm Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit haben. Zahlreiche epidemiologische und toxikologische Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen der luftgetragenen Schadstoffbelastung und negativen gesundheitlichen Folgen [1, 3]. Insgesamt werden nach Schätzungen der Lancet Kommission durch Luftverschmutzung in Haushalten weltweit etwa 2,3 Millionen vorzeitige Todesfälle pro Jahr verursacht [4].

Dennoch ist die Innenraumluftqualität im Gegensatz zur Außenluft bislang nur wenig untersucht. Neben dem privaten Charakter der Innenräume stellt insbesondere die verfügbare Messtechnik eine Herausforderung dar:

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Klassische Messsysteme sind aufgrund von Platzbedarf, Lautstärke und Kosten für einen breiten Einsatz im Alltag nur eingeschränkt einsetzbar. Eine vielversprechende Alternative sind kostengünstige Sensoren, die als zusätzliche Vorteile weniger Platzbedarf und geringere Lautstärke aufweisen. Allerdings ist deren Anwendbarkeit im Innenraum in Hinblick auf Genauigkeit, Sensitivität, Langzeitstabilität und Querempfindlichkeiten für die Innenraumluft bislang kaum validiert [5, 6]. Hieraus ergibt sich der Bedarf, die Anwendbarkeit von kostengünstigen Sensoren zur Erfassung von Schadstoffen im Innenraum zu untersuchen.

Zu diesem Zweck entwickelt und validiert das IUTA zusammen mit dem Fachgebiet Nachrichtentechnische Systeme der Universität Duisburg-Essen in einem aktuellen Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) ein neuartiges Innenraummesssystem auf Basis kostengünstiger Sensoren, um eine große Bandbreite an Schadstoffen der Innenraumluft mit hoher Anwendungsfreundlichkeit und reduziertem Aufwand zu erfassen. Ein solches Messsystem bietet das Potenzial, in zukünftigen Gesundheitsstudien flächendeckend eingesetzt werden zu können, um die Datenbasis zur Innenraumluftqualität zu erweitern. In diesem Beitrag soll die bisher abgeschlossene Validierung der Sensoren vorgestellt werden. Diese erfolgte in einem zweistufigen Ansatz: Im ersten Schritt wurden alle Sensoren unter definierten Prüfbedingungen im Labor kalibriert und falls erforderlich Korrekturfunktionen abgeleitet. Im zweiten Schritt erfolgte eine Validierung der zusammengebauten Messsysteme unter realistischen Bedingungen, um die zuvor ermittelten Korrekturfunktionen zu revalidieren. Anschließend wurden erste Messungen im Rahmen einer Pilotstudie in Privathaushalten durchgeführt, deren Ergebnisse am Ende dieses Beitrages vorgestellt werden.

Konzeptionierung und Aufbau des Innenraummesssystems

In Innenräumen setzt sich die Luftqualität aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Schadstoffen zusammen. Bei der Konzeptionierung des neuen Innenraummesssystems wurde daher das Ziel verfolgt, ein möglichst breites Spektrum an gasförmigen und partikulären Schadstoffen sowie an Umgebungsparametern abzudecken. Auf dieser Grundlage wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Messgrößen festgelegt. Zur besseren Einordnung der Messwerte soll das System zusätzlich über einen Bewegungssensor verfügen, der die Präsenz von Personen im näheren Umfeld erfasst. Im nächsten Schritt wurden hierfür geeignete Sensoren ausgewählt: Die Auswahl basierte auf im Vorfeld durchgeführten Vorversuchen mit unterschiedlichen Sensortypen sowie auf den Erkenntnissen bereits abgeschlossener Forschungsvorhaben. Für die Messung von ultrafeinen Partikeln ist derzeit kein kostengünstiger Sensor verfügbar. Daher wurde hier als Kompromiss aus Kosten und der Möglichkeit zur größenaufgelösten Messung von ultrafeinen Partikeln der Partector 2 Pro ausgewählt. Alle im Messsystem verwendeten Sensormodelle sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der Messgrößen und Sensormodelle des Innenraummesssystems.

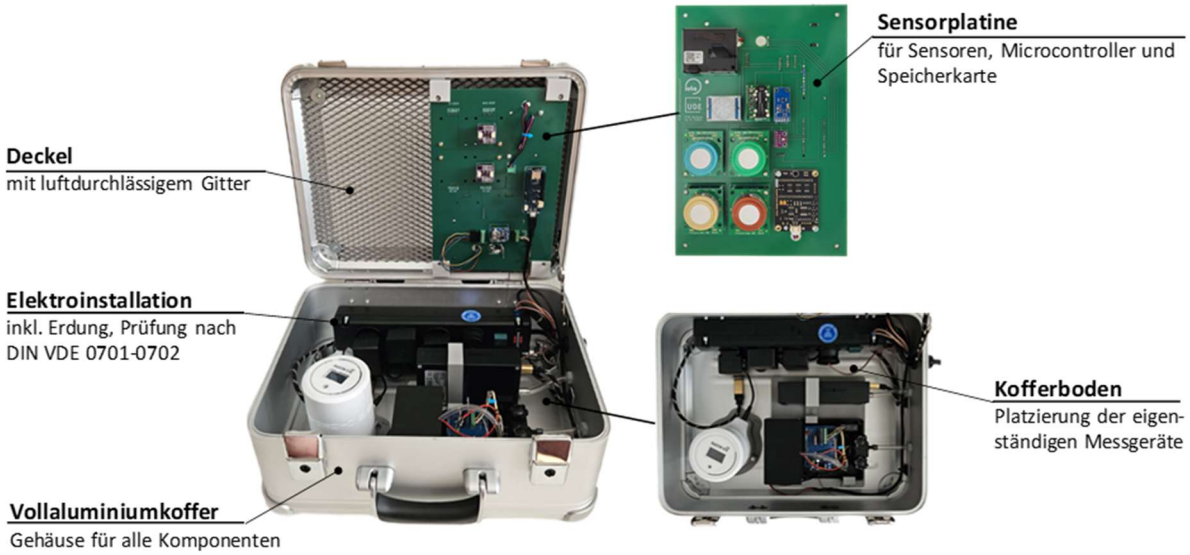
Schadstoffgruppe	Messgröße	Hersteller, Sensormodell
Gasförmige Schadstoffe	CO, NO, NO_2, O_3	Alphasense., B4-Serie
	CO_2	Sensirion, SCD30
	VOC	Sensirion, SEN55

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

	Radon	Ecosense, RadonEye RD200
Partikelförmige Schadstoffe	PM_1, $PM_{2,5}$	Sensirion, SEN55
	Black Carbon	OpenSource, bcMeter
	Ultrafeine Partikel	Naneos, Partector 2 Pro
Umgebungsparameter	Raumklima	Bosch, BME280
	Beleuchtungsstärke	Rohm Semiconductor, BH1750
	Schallimmissionen	DFRobot, SEN0232
	Präsenzdetektion	Sunlephant, AM312

Anschließend wurden alle Sensoren zu einem Multiparametermesssystem vernetzt und in ein Gehäuse integriert. Dieses umfasst zusätzlich einen Microcontroller und eine Speicherkarte, um die Kommunikation mit den Sensoren zu ermöglichen und deren Daten lokal zu speichern. Das Messystem ist mobil konzipiert und besteht aus einem Aluminiumkoffer, in den alle Komponenten integriert sind (s. Abbildung 1). Der Deckel besteht aus einem luftdurchlässigen Gitter, unter dem sich auf einer individuell angefertigten Sensorplatine die erste Gruppe an Sensoren befindet. Dazu zählen die Sensoren für Feinstaub, gasförmige Schadstoffe, das Raumklima, den Schallpegel und die Lichtintensität sowie der Bewegungssensor. Auf dem Boden befindet sich die zweite Gruppe an Sensoren, die die eigenständigen Messgeräte für Radon, Ultrafeine Partikel und Black Carbon umfasst. Insgesamt wurden von diesem Messsystem sechs Exemplare für den späteren Einsatz in der Pilotstudie gebaut.

Abbildung 1: Fotografie des Messkoffers mit Anordnung der Sensorik im Kofferboden und -



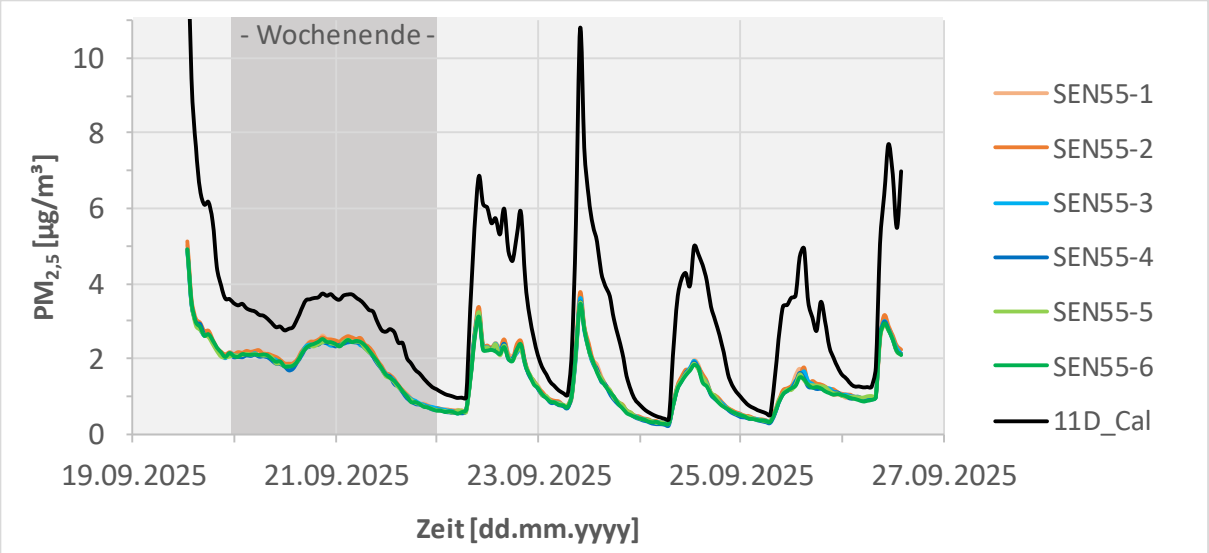
Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Validierung der einzelnen Sensoren

Kostengünstige Sensoren basieren häufig auf konstruktiven Kompromissen, die mit messtechnischen Grenzen in Hinblick auf Genauigkeit, Sensitivität, Langzeitstabilität und Querempfindlichkeiten verbunden sind. Bevor das Messsystem in Privathaushalten zur Erfassung der Luftqualität eingesetzt wird, ist es daher erforderlich, alle Sensoren gegenüber Referenzmesstechnik zu validieren. Im Folgenden wird der erste Teil der Validierung beschrieben, bei dem die einzelnen Sensoren betrachtet wurden.

Die hier verwendeten Feinstaubsensoren des Typs SEN55 von Sensirion basieren wie die meisten kostengünstigen Feinstaubsensoren auf dem Prinzip der Streulichtmessung [7, 8]. Da bislang keine standardisierten Teststäube für Innenraumanwendungen definiert sind, erfolgte die Validierung unter Realbedingungen an verschiedenen Messorten am Institut sowie in einem Privathaushalt. Insgesamt wurden sechs einwöchige Messreihen durchgeführt. Als Referenzmessgeräte kamen gravimetrische Kleinfiltergeräte mit $PM_{2,5}$-Impaktor (Leckel, MiniVS, Leihgabe des UBA) und ein optisches Aerosolspektrometer (Durag, Grimm 11-D) zum Einsatz. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgte in Anlehnung an die technische Spezifikation CEN/TS 18086 [9] und wird anhand der Messung in einem Büroraum des IUTA exemplarisch vorgestellt. Im ersten Schritt wurde das Aerosolspektrometer anhand der mittleren gravimetrischen Feinstaubkonzentration justiert. Die justierten Referenzmesswerte sind zusammen mit den unkorrigierten Sensormesswerten in Abbildung 2 dargestellt (Stundenmittelwerte). Hier wird einerseits deutlich, dass die Sensoren untereinander eine sehr hohe Übereinstimmung aufweisen, andererseits jedoch auch die Feinstaubkonzentration systematisch unterschätzen. Daher wurde im letzten Schritt für die Sensoren ein gravimetrischer Korrekturfaktor (Verhältnis der gravimetrischen und sensorbestimmten $PM_{2,5}$-Konzentration) bestimmt, der in diesem Fall bei 2,1 lag. Die Auswertung der übrigen Messkampagnen führte zu vergleichbaren Ergebnissen, wobei die ermittelten

Abbildung 2: Validierung der Feinstaubsensoren: Zeitlicher Verlauf der Feinstaubkonzentration ($PM_{2,5}$) in einem Büroraum von gravimetrisch justiertem



Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Korrekturfaktoren je nach Messort etwa zwischen 1 und 2 variierten. Dies deutet auf jeweils unterschiedliche Zusammensetzungen des Aerosols hin und soll im weiteren Projektverlauf tiefergehend untersucht werden. Für die Durchführung der Pilotstudie wurde daher in Anlehnung an die Empfehlungen von Morawska et al. [8] festgelegt, nach Möglichkeit auch Kleinfiltergeräten in den Haushalten für eine Vor-Ort Kalibrierung einzusetzen.

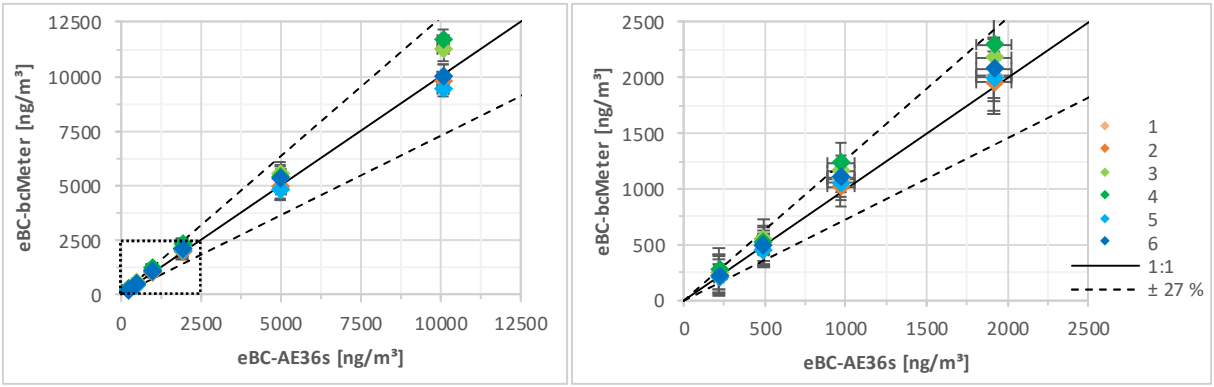
Ein vergleichbarer Ansatz wurde auch für die Validierung der Messgeräte zur Erfassung ultrafeiner Partikel gewählt. Da eine grundlegende Untersuchung der Performance bereits von Asbach et al. [10] durchgeführt wurde, beschränkt sich die Validierung im Rahmen dieser Arbeit auf drei einwöchige Messkampagnen in der Prüfstandshalle des Instituts. Als Referenz diente ein Mobility Particle Size Spectrometer (MPSS). Die Ergebnisse zeigen für alle eingesetzten Partectoren eine leichte Überschätzung der Partikelanzahlkonzentration (Messbereich: 7,8 – 382,4 nm) von etwa 5 bis 20 %. Hier muss jedoch beachtet werden, dass herstellerseitig eine Messunsicherheit von bis zu 30 % angegeben ist [11]. Bei Betrachtung der einzelnen Größenkanäle zeigte sich insbesondere zwischen 16 und 188 nm eine hohe Übereinstimmung der zugehörigen Anzahlkonzentrationen gegenüber dem MPSS, in denen der Großteil der erfassten Partikel liegt. Bei den äußeren beiden Größenkanälen am unteren Messbereich (7,8 – 12,7 nm) sowie am oberen Messbereich (235,2 – 382,4 nm) traten dagegen deutlich größere Abweichungen auf. Allerdings kann dies auch der Tatsache geschuldet sein, dass beide Messgeräte eine unterschiedliche Anzahl an Größenkanälen mit abweichenden oberen und unteren Kanalgrenzen verwenden: So liegt das untere Limit des Partector 2 Pro bei 7,8 nm, während das verwendete MPSS eine untere Kanalgrenze von 10,7 nm aufwies. Im größten Messkanal wurde darüber hinaus eine sehr geringe Anzahlkonzentration registriert, die wiederum nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gesamtanzahlkonzentration hat (ca. 1,2 %).

Für die Messung von Black Carbon kommt das „bcMeter“ [12] zum Einsatz, ein kostengünstiger Sensor, der auf einem Open-Source-Ansatz basiert und anhand frei verfügbarer Bauanleitungen in Eigenleistung zusammengebaut werden kann. Ähnlich wie bei Aethalometern werden auch beim bcMeter Partikel auf einem Filter abgeschieden, der gleichzeitig von Infrarotlicht durchleuchtet wird. Anhand der zeitlichen Zunahme der Absorption durch Black Carbon lässt sich hieraus eine äquivalente Black Carbon Konzentration (eBC) berechnen. Für den Einsatz im Innenraummesssystem wurde die Originalversion hinsichtlich Lautstärke, Benutzerfreundlichkeit, Integration in das gesamte Messsystem und Luftdichtigkeit am IUTA weiterentwickelt. Anschließend wurden alle bcMeter bei Umgebungsbedingungen in der Prüfstandshalle des IUTA gegenüber einem Aethalometer (AE36s, Magee Scientific) validiert. Dabei zeigten sich bei Betrachtung des Zeitverlaufs nur sehr geringe Messabweichungen, die innerhalb der Messunsicherheit des Aethalometers (± 27 %) lagen. In einem zweiten Schritt wurden die bcMeter in einer 30 m³-Prüfkammer unter definierten Prüfbedingungen (23 °C, 50 % rel. Luftfeuchtigkeit) bei Black-Carbon-Konzentrationen zwischen 200 und 10.000 ng/m³ validiert. Die Ergebnisse sind in Form der Streudiagramme in Abbildung 3 dargestellt, in denen die mittlere Black Carbon Konzentration der bcMeter gegenüber den Konzentrationen des Aethalometers dargestellt sind. Dabei zeigt das linke Diagramm den gesamten Untersuchungsbereich bis 10.000 ng/m³, das rechte Diagramm eine Vergrößerung des unteren Konzentrationsbereichs bis 2500 ng/m³, der vorwiegend im Innenraum erwartet wird. Zusätzlich sind die Standardabweichungen der Messwerte (Mittelwerte über 10 Minuten) als Fehlerbalken dargestellt. Hier zeigt sich

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Aethalometer sowie eine hohe Vergleichbarkeit der bcMeter untereinander. Insgesamt kann aus diesen Versuchen abgeleitet werden, dass keine spezifische Korrekturfunktionen für die bcMeter anzuwenden sind.

Abbildung 3: Validierung der bcMeter in einer Prüfkammer: Streudiagramm der Black-Carbon Konzentrationen der bcMeter gegenüber einem Aethalometer (Modell AE36s).



Die Validierung der elektrochemischen Gassensoren (NO, NO_2, O_3 und CO) sowie des nichtdispersiven Infrarot-CO_2-Sensors (NDIR) erfolgte unter Laborbedingungen an einem eigens entwickelten Prüfstand. Hierzu wurden für jedes Prüfgas Konzentrationen von der Hintergrundbelastung bis in den Bereich der maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) bei einer Temperatur von 23 °C und relativer Luftfeuchtigkeit von 50 % eingestellt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Luftfeuchtigkeit durch Variation auf 30 % bzw. 70 % bei einem Konzentrationsniveau von 1000 Vol. ppb untersucht. Am Prüfstand konnte darüber hinaus gleichzeitig eine Untersuchung der Querempfindlichkeiten der Sensoren gegenüber den jeweils anderen Prüfgasen erfolgen. Nach Abschluss der Versuche wurden durch den Vergleich der Messwerte von Sensoren und Referenzmessgeräten mittels linearer Regression individuelle Korrekturfunktionen für jeden Sensor bestimmt. Über den gesamten Konzentrationsbereich zeigten sich bei allen Sensoren hohe Linearitäten und Bestimmtheitsmaße. Allerdings wurden im unteren Konzentrationsbereich bei nahezu allen Sensoren additive Offsets gegenüber den Referenzmessgeräten festgestellt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der linearen Regressionen. Da sich die Parameter der der einzelnen Sensoren nur gering unterscheiden, sind hier die Mittelwerte über alle Sensoren je Prüfgas zusammenfassend angegeben.

Tabelle 2: Validierung der anorganischen Gassensoren am Prüfstand: Ergebnisse der linearen Regression gegenüber Referenzmessgeräten.

Regressionsparameter	**NO_2-Sensoren**	**NO-Sensoren**	**CO-Sensoren**	**O_3-Sensoren**	**CO_2-Sensoren**
Bestimmtheitsmaß	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99
Steigungsparameter	1,02	0,84	0,83	1,13	0,89

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Achsenabschnitt [ppb]	20,7	13,2	332	23,2	$121 \cdot 10^3$

Auch die Validierung der VOC-Sensoren erfolgte unter definierten Laborbedingungen am zuvor beschriebenen Gassensorprüfstand. In Anlehnung an die DIN-ISO 16000-29 (Innenraumluftverunreinigungen: Prüfverfahren für VOC-Detektoren) [13] wurden mit Aceton, Toluol und Acetaldehyd drei typische Stoffgruppenvertreter flüchtiger organischer Verbindungen untersucht. Die Konzentrationen wurden hierbei zwischen 200 und 20.000 ppb variiert, wobei ein Protonen-Transfer-Reaktions-Massenspektrometer (PTR-MS) als Referenzmessverfahren zum Einsatz kam. Zusätzlich erfolgte eine Validierung bei Umgebungsbedingungen in der Prüfstandshalle gegenüber einem Flammenionisationsdetektor (FID) während einer Woche. Insgesamt zeigten sich sowohl zwischen den einzelnen Prüfgasen als auch im Vergleich zur Innenraumluft deutliche Unterschiede in der Sensorantwort. Für die Laboruntersuchungen konnten zwar jeweils stoffspezifische Kalibrierfunktionen mit hohen Bestimmtheitsmaßen ($R^2 > 0,99$) abgeleitet werden. Allerdings unterschieden sich die Kalibrierungen erheblich zwischen den einzelnen Substanzen und wichen zudem deutlich von den Ergebnissen unter realen Innenraumbedingungen ab. Somit konnte keine mittlere oder universelle Kalibrierung gefunden werden, die alle VOC-Gemische im gesamten Größenbereich mit einer akzeptablen Genauigkeit erfassen kann. Da sich die VOC-Belastung in Innenräumen aus einem komplexen Gemisch zahlreicher Einzelverbindungen zusammensetzt, ist die quantitative Aussagekraft der eingesetzten VOC-Sensoren entsprechend eingeschränkt. Das Potential der VOC-Sensoren liegt damit vor allem in der relativen Messgenauigkeit, beispielsweise zur Trenderkennung.

Die Kalibrierung der Radonsensoren erfolgte dagegen in einem externen Prüflabor. Da sich bereits im Vorfeld bei zahlreichen Messungen auf verschiedenen Etagen und Radonkonzentrationen eine hohe Übereinstimmung zwischen den einzelnen baugleichen Sensoren gezeigt hatte, wurde exemplarisch ein Sensor kalibriert. Die Kalibrierung umfasste die Bestimmung von Korrekturfaktoren bei Radonkonzentrationen von 330 Bq/ m³ und 3000 Bq/m³ sowie die Ermittlung der jeweiligen Messunsicherheiten und des Nulleffekts. Die ermittelten Korrekturfaktoren betrugen 1,06 bei 330 Bq/m³ und 1,30 bei 3000 Bq/ m³. Die Messunsicherheit lag bei 9 Bq/ m³ für den Nulleffekt sowie bei 330 Bq/m³ und bei 22 Bq/m³ für 3000 Bq/m³. Daraus ergibt sich, dass bei sehr geringen Radonkonzentrationen mit vergleichsweise hohen relativen Messunsicherheiten zu rechnen ist. Mit zunehmender Radonkonzentration nimmt die relative Messunsicherheit hingegen deutlich ab, sodass insbesondere im Bereich des Referenzwertes des Bundesamtes für Strahlenschutz von 300 Bq/m³ eine zuverlässige Bewertung möglich ist.

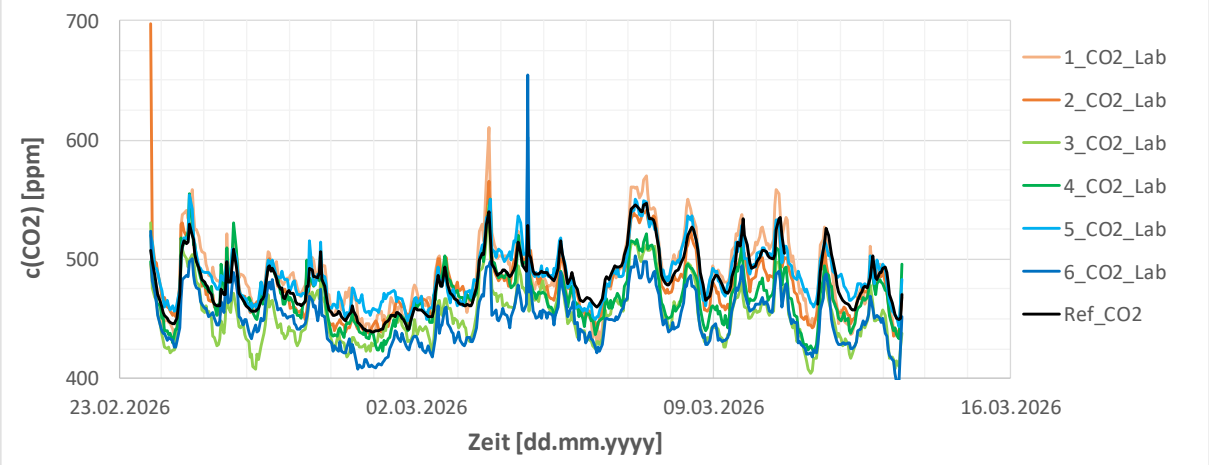
Abschließend soll auf die Validierung der Sensoren für die Umgebungsparameter eingegangen werden. Für die Temperatur- und Feuchtesensoren wurden umfassende Messreihen im Zweiparameterfeld aus Temperatur (10 – 40°C) und Luftfeuchte (30 – 80 % rF) durchgeführt. Während lineare Regression für die Temperaturmessung hohe Übereinstimmungen lieferte, zeigten die Ergebnisse für die Feuchtemessung Abweichungen sowohl bei Steigungsparameter und Offset. Auch für die verbleibenden Sensoren für Schallimmissionen, Luftdruck und Beleuchtungsstärke wurden umfassende Validierungsversuche unter verschiedenen Prüfbedingungen und in weiten Teilen des relevanten Messwertebereichs durchgeführt. Hier hat sich für die meisten Sensoren ebenfalls eine lineare Nachkalibrierung als geeignet erwiesen, um eine für den Anwendungszweck ausreichende Genauigkeit zu erreichen.

Validierung der Messsysteme

Nach Abschluss der Validierung der einzelnen Sensoren erfolgte im zweiten Schritt die Validierung der zusammengebauten Messkoffer unter realitätsnahen Bedingungen in der Prüfstandshalle des Instituts. Ziel war es, alle Messsysteme untereinander zu vergleichen sowie gegen Referenzmessgeräte zu revalidieren. Dabei sollte insbesondere untersucht werden, ob die Laborkalibrierungen aller Sensoren bei Realbedingungen verifiziert werden können. Zu diesem Zweck wurde für den Großteil der Messgrößen des Messsystems geeignete Referenzmessgeräte betrieben. Zusätzlich wurde ein Satz baugleicher Sensoren ohne Anordnung in einem Messkoffer parallel betrieben, um eine mögliche Beeinflussung der Sensoren durch die Anordnung im Koffer zu untersuchen. Insgesamt wurde die Validierung über einen Zeitraum von etwa 2,5 Wochen durchgeführt.

Für einen großen Teil der eingesetzten Sensoren konnten die Laborvalidierungen bestätigt werden, sodass nicht von einer Beeinflussung durch die Anordnung im Koffer auszugehen ist. Darüber hinaus zeigte sich eine hohe Vergleichbarkeit der Messwerte aller Messkoffer untereinander. Hierzu zählten die Sensoren für Feinstaub, Black Carbon, Ultrafeine Partikel, CO_2, und Radon. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Zeitverlauf der CO_2-Sensoren, deren Messwerte mit den zuvor am Prüfstand ermittelten Korrekturfunktionen justiert wurden zusammen mit den Messwerten des Referenzmessgeräts (Mittelwerte über eine Stunde). Hier zeigte sich, dass die Messwerte der Sensoren überwiegend innerhalb der vom Hersteller spezifizierten Messunsicherheit von ± (30 ppm + 3% des gemessenen Wertes) [14] lagen, sodass die Laborvalidierung bestätigt werden konnten. Ähnlich stellten sich auch

Abbildung 4: Validierung der Messsysteme: Revalidierung der Laborkalibrierung der CO_2-



die Ergebnisse der Feinstaub-, Black Carbon- und Radonsensoren sowie der Partectoren 2 Pro dar.

Für die restlichen Sensoren konnten dagegen die ermittelten Korrekturfunktionen nicht unmittelbar übernommen werden. Bei den elektrochemischen Gassensoren zeigte sich, dass zwar eine hohe Übereinstimmung im relativen Verlauf der Konzentrationen vorlag, die Messwerte der Sensoren jedoch um einen konstanten Offset von den Messwerten der Referenzgeräte abwichen. Somit konnte aus den Laborkalibrierungen nur der Steigungsparameter der linearen Regression übernommen werden, wohingegen ein neuer Offsetparameter abgeleitet werden musste. Auch bei den Temperatur- und Feuchtsensoren wurden

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Abweichungen gegenüber dem Referenzfühler festgestellt: Hier kam es zu einer systematischen Überschätzung der Temperatur sowie Unterschätzung der relativen Feuchte. Eine Ursache könnten Wärmequellen innerhalb des Koffers sein, die aus dem Betrieb der Sensorik resultieren und in der Folge zu einer lokalen Erwärmung führen. Gleichzeitig beeinflusst dies auch die Feuchtemessung. Zur Kompensation wurden die Parameter der linearen Korrekturfunktionen angepasst. Auch die Messwerte der Schallpegelsensoren wurde durch den Betrieb der Sensorik beeinflusst. Hier wurde eine deutliche Überschätzung des Schallpegels gegenüber dem Referenzmessgerät festgestellt, die ebenfalls aus dem Betrieb der Sensorik hervorgerufen wird. Diese Problematik konnte gelöst werden, indem die Eigenschallpegel der Messkoffer bestimmt wurden und von den Messwerten der Schallsensoren logarithmisch subtrahiert werden. Darüber hinaus wiesen auch die Lichtintensitätssensoren innerhalb des Koffers Abweichungen gegenüber dem Sensor außerhalb des Koffers sowie zum Referenzmessgerät auf. Dies kann auf die Anordnung unterhalb des Gitters im Kofferdeckel zurückgeführt werden, das zu einer partiellen Abschattung auf der Sensorplatine führen. Hier zeigte sich ebenfalls eine Anpassung der linearen Korrekturfunktion zielführend.

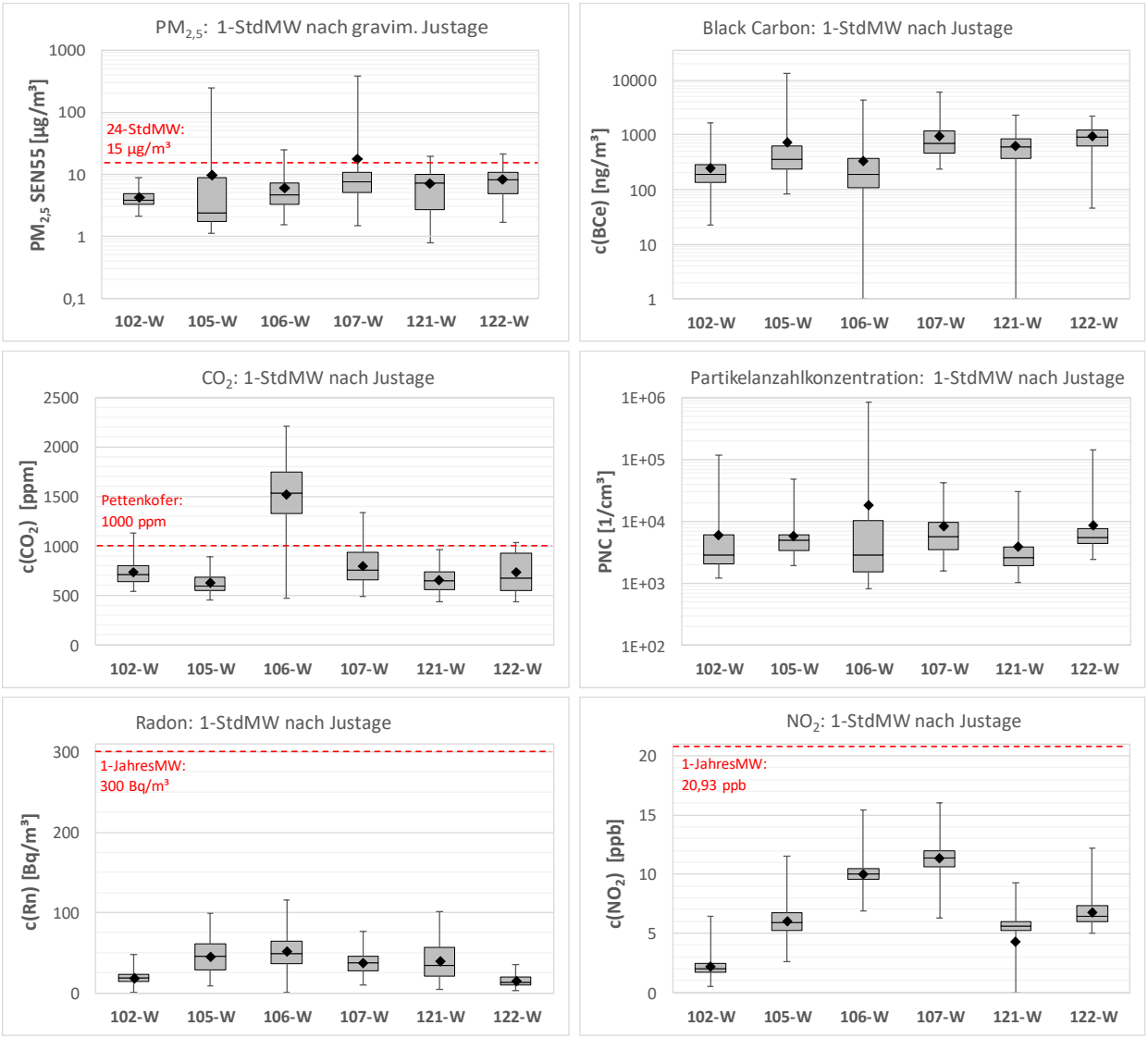
Durchführung und erste Ergebnisse aus der Pilotstudie

Nach Abschluss der Validierung aller Messkoffer und Anpassung der Korrekturfunktionen konnte die Erprobung der Messkoffer im Rahmen einer Pilotstudie beginnen. Bei der Pilotstudie werden die Messkoffer eingesetzt, um in 30 Haushalten mit Fokus auf Duisburg und Umgebung die Innenraumluftqualität unter alltagstypischen Bedingungen zu erfassen. Jeder Haushalt wird dabei für jeweils eine Woche einmal in den Sommermonaten sowie während der Heizperiode aufgesucht. Neben den Messkoffern werden bei Zustimmung auch die gravimetrischen Kleinfiltergeräte aufgestellt. Parallel dazu werden Angaben zu gebäude- und nutzungsspezifischen Faktoren sowie die Luftqualität betreffende Aktivitäten der Teilnehmenden in einem Fragebogen mit Protokoll erfasst. Vor Beginn wurde die Pilotstudie von der Ethikkommission der Johannes-Rau-Forschungsgemeinschaft hinsichtlich ethischer Belange geprüft und positiv bewertet.

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen*
„Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere SVOC“

Zum aktuellen Zeitpunkt wurde bereits die erste Messkampagne im Winter 2025/26 vollständig abgeschlossen. Hier wurde jedoch nur ein erster Anteil von 6 Haushalten besucht, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden. Aus Platzgründen wird sich an dieser Stelle auf die Ergebnisse für Feinstaub ($PM_{2,5}$), Black Carbon, CO_2, Partikelanzahlkonzentration, Radon sowie NO_2 beschränkt. Abbildung 5 zeigt die mit den ermittelten Korrekturfunktionen justierten Ergebnisse (Mittelwerte über eine Stunde) aus den 6 Privathaushalten als Boxplots zusammen mit dem arithmetischen Mittelwert und der Teilnehmernummer des Haushalts (XXX-W).

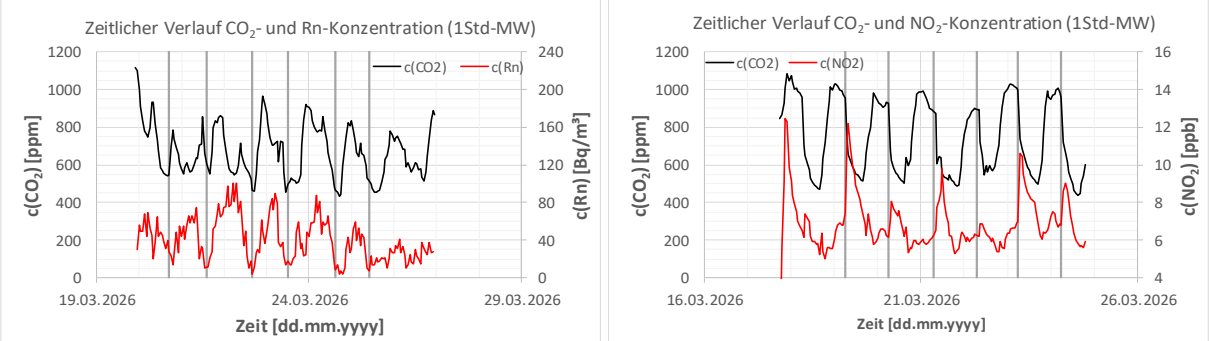
Abbildung 5: Ergebnisse des ersten Teils der Pilotstudie aus 6 Privathaushalten im Winter



Für Feinstaub ($PM_{2,5}$) konnten in allen hier dargestellten Haushalten Kleinfiltergeräte aufgestellt werden, sodass die mittlere Wochenkonzentration gravimetrisch justiert werden konnte. Hierbei wurden Korrekturfaktoren in einem ähnlichem Größenbereich wie zuvor bei den Validierungsmessreihen festgestellt. Diese lagen zwischen 0,9 und 2,1. Bei Einordnung der Messwerte anhand des Leitwertes für Feinstaub in der Innenraumluft des Ausschusses für Innenraumrichtwerte (AIR) von 15 µg/m³ (Tagesmittel) [15] zeigt sich, dass dieser größtenteils nicht überschritten wird. Allerdings treten vereinzelt Spitzenkonzentrationen von bis zu 500 µg/m³ auf, welche anhand des Protokolls der Teilnehmenden auf besondere Ereignisse (z.B. Anbrennen von Essen im Backofen) zurückgeführt werden konnten. Ähnlich stellten sich auch die Messwerte von Black Carbon dar, die überwiegend im Bereich zwischen 100 und 1000 ng/m³ lagen. Bei Betrachtung der CO_2-Konzentrationen zeigte sich, dass der überwiegende Teil unterhalb von 1000 ppm lag. Dieser Wert ist als Pettenkofer-Zahl bekannt und stellt einen häufig verwendeten Schwellenwert zur Beurteilung dar: Konzentrationen unterhalb von 1000 ppm werden gemäß den hygienischen Leitwerten des AIR als hygienisch unbedenklich eingestuft, Konzentrationen oberhalb von 1000 ppm dagegen als hygienisch auffällig bzw. inakzeptabel (ab 2000 ppm) [15]. Die Verteilung der Gesamtanzahlkonzentration (7,8 – 382,4 nm) erstreckte sich ebenfalls über einen weiten Konzentrationsbereich: Während überwiegend Konzentrationen zwischen 1.000 und 10.000 Partikel pro Kubikzentimeter gemessen wurden, gab es vereinzelt auch Messwerte von bis zu etwa $1 \cdot 10^6$ Partikeln pro Kubikzentimeter. Bei Vergleich der Radonkonzentrationen mit dem Referenzwertes des Bundesamts für Strahlschutz von 300 Bq/m³ (im Jahresmittel) [16] zeigten sich keine Überschreitungen. Die meisten Messwerte lagen unterhalb von 100 Bq/m³ mit einer moderat ausgeprägten Streuung. Abschließend soll auf die Ergebnisse für NO_2 eingegangen werden. Hier liegt der Jahresgrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit bei 40 µg/m³ (entsprechend 20,93 ppb), der vom AIR auch für den Innenraum abgeleitet wurde [17]. Abbildung 5 zeigt, dass diese Konzentration im Wochenmittel in keinem der gemessenen Haushalte überschritten wurde.

Durch die Vielzahl an Schadstoffen, die mit dem hier vorgestellten Messsystem erfasst werden können, bietet das Messsystem den Mehrwert, auch Zusammenhänge und Effekte zwischen einzelnen Parametern zu analysieren. Perspektivisch besteht damit die Möglichkeit, auch komplexe Fragestellungen zur Innenraumluftqualität zu untersuchen, beispielsweise Luftwechselraten zu bestimmen oder Unterscheidungen von Schadstoffquellen im Innenraum oder aus der Außenluft abzuschätzen. Dies soll im Folgenden anhand von zwei Beispielen

Abbildung 6: Zusammenhang von CO_2-Konzentration und Radon- bzw. NO_2-Konzentration während der Messung in zwei Haushalten.



demonstriert werden: Abbildung 6 zeigt links die Verläufe der CO_2- und Radonkonzentration. Zusätzlich wurden aus dem Protokoll die Zeitpunkte der manuellen Lüftung übernommen und in der Abbildung als graue, senkrechte Linien dargestellt. Bei Betrachtung der CO_2- und Radonkonzentration zeigt sich eine positive Korrelation der beiden Schadstoffe. Dies kann dadurch erklärt werden, dass Radon typischerweise aus dem Erdreich in Innenräume eindringt und sich dort anschließend anreichert. Eine wirksame Gegenmaßnahme stellt das Lüften dar, welches zu einer raschen Abnahme der Radonkonzentration führt. [16]

Gegensätzliches Verhalten zeigt sich dagegen bei Betrachtung der Korrelation von CO_2 und NO_2: Hier kommt es bei einem Abfall der CO_2-Konzentration infolge von Lüftungsaktivitäten zu einem Anstieg der NO_2-Konzentration. Folglich wird hier NO_2 aus der Außenluft in den Innenraum eingetragen. Mögliche Quellen können die Verbrennungsprozesse fossiler Energieträger darstellen, beispielsweise aus dem Straßenverkehr.

Fazit

In diesem Beitrag wurden die Entwicklung und Validierung eines neuen Innenraummesssystems vorgestellt. Ausgehend von der Festlegung der zu erfassenden Schadstoffe wurden geeignete kostengünstige Sensoren ausgewählt und in einen mobilen Messkoffer integriert. In umfangreichen Versuchsreihen mit allen Sensoren wurden spezifische Korrekturfakten für den späteren Einsatz im Innenraum abgeleitet. Diese basieren für den Großteil der Sensoren auf linearen Regressionsmodellen. Für die Feinstaubsensoren konnte keine universelle Korrekturfunktion gefunden werden, da sich die gravimetrischen Korrekturfaktoren je nach Messort stark unterschieden haben. Daher werden nach Möglichkeit auch während der Pilotstudie Kleinfiltergeräte für eine gravimetrische Vor-Ort Kalibrierung eingesetzt. Auch für die VOC-Sensoren konnte keine allgemeingültige Korrekturfunktion gefunden werden, sodass diese vor allem zur qualitativen Datenanalyse genutzt werden können. Im Gegensatz dazu konnte für die Sensoren für Black Carbon und ultrafeine Partikel eine hohe Übereinstimmung mit den Referenzmessverfahren bereits ohne Justage festgestellt werden. Die anschließende Validierung der zusammengebauten Messsysteme unter realitätsnahen Bedingungen bestätigte die zuvor abgeleiteten Korrekturfunktionen weitestgehend. Teilweise mussten einzelne Parameter der linearen Regressionsmodelle angepasst werden, was beispielsweise durch Wärmeentwicklung, Eigengeräusche oder Abschattungseffekte hervorgerufen wurde. Die Validierung unter realitätsnahen Bedingungen diente außerdem als Ausgangspunkt, um alle Messsysteme vor Beginn der Pilotstudie zu überprüfen und miteinander zu vergleichen. Anschließend konnte die Pilotstudie zur Erfassung der Innenraumluftqualität in 30 Privathaushalten mit Fokus auf Duisburg und Umgebung gestartet werden. Hierzu wurden während der ersten Messkampagne im Winter 2025/26 die ersten 6 Haushalte aufgesucht. Die gemessenen Konzentrationen lagen überwiegend in den für Innenräume typischen Bereichen, wobei einzelne kurzzeitige Belastungsspitzen infolge besonderer Ereignisse der Teilnehmenden auftraten. Durch die gleichzeitige Erfassung verschiedener Schadstoffe und Umgebungsparameter ermöglicht das Messsystem zudem die Analyse von Zusammenhängen zwischen einzelnen Messgrößen. Exemplarisch wurde gezeigt werden, dass Lüftungsvorgänge sowohl die CO_2- und Radonkonzentration reduzieren als auch im Zusammenhang mit einem Eintrag von NO_2 aus der Außenluft stehen können.

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Ausblick

Nach Abschluss des ersten Teils der Pilotstudie erfolgte die Planung und Vorbereitung für den zweiten Teil der Pilotstudie im Sommer 2026, bei dem Messungen in allen 30 Haushalten durchgeführt werden. Hierzu wurden erneut alle Messkoffer parallel mit allen relevanten Referenzmessgeräten unter realitätsnahen Bedingungen verglichen. Bei einer ersten Sichtung der Messdaten konnte weiterhin eine hohe Übereinstimmung aller Sensordaten mit den Referenzmessgeräten festgestellt werden. Somit konnte der zweite Teil der Pilotstudie im Juli 2026 gestartet werden und wird voraussichtlich im September 2026 abgeschlossen werden. Auch danach ist eine umfangreiche Überprüfung der Messkoffer vorgesehen. Im Winter 2026/27 steht der dritte und letzte Teil der Pilotstudie an, bei dem alle verbleibenden Haushalte aufgesucht werden, um saisonale Unterschiede zwischen den Sommermonaten und der Heizperiode zu untersuchen. Anschließend werden alle Messsysteme erneut umfangreich revalidiert, um die Performance aller Sensoren nach etwa einem Jahr Betrieb zu evaluieren. Parallel dazu ist eine umfassende Datenanalyse geplant, um die erhobenen Luftqualitätsdaten einzuordnen und zu vergleichen. Aus den Ergebnissen sollen schließlich Anwendungshinweise und Empfehlungen abgeleitet werden, die für einen wissenschaftlich verlässlichen Einsatz der Sensoren beachtet werden müssen. Neben den messtechnischen Faktoren sollen auch deren Akzeptanz und Alltagstauglichkeit bei den teilnehmenden Haushalten berücksichtigt werden. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen kostengünstiger Sensorsysteme zu definieren und die Eignung für deren Anwendung in zukünftigen Gesundheitsstudien zu bewerten. Langfristig könnten kostengünstige Sensorsysteme dazu beitragen, die Datenbasis an Luftqualitätsdaten im Innenraum zu erweitern und ein tieferes Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Luftqualität und Gesundheit zu entwickeln.

Rudnik, N.; Kroll, B.; Schneiderwind, U.; Arocas, R.; Schultze, T.; Balzer, J.C.; Asbach, C.; Schumacher, S. (2026): Einsatz kostengünstiger Sensoren zur Messung von ausgewählten Schadstoffen und Behaglichkeitsparametern in der Innenraumluft. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF. https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/einsatz-kostenguenstiger-sensoren-zur-messung-von-ausgewaehlten-schadstoffen-und-behaglichkeitsparametern-in-der-innenraumluft
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 *in Bremen „Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere* SVOC“

Literaturverzeichnis

[1] Pluschke, P.: *Luftschadstoffe in Innenräumen*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1996.

[2] Brasche, S. und Bischof, W.: *Daily time spent indoors in German homes-baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants*. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 208 (4), 2005; pp. 247–253, doi: 10.1016/j.ijheh.2005.03.003.

[3] Birmili, W., Hurraß, J., und Straff, W.: *Schadstoffbelastung der Innenraumluft – Prävalenz, Bedeutung und Implikationen für die Prävention und Gesundheitsförderung*. Prävention und Gesundheitsförderung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2020.

[4] Fuller, R. *et al.*: *Pollution and health: a progress update*. The Lancet Planetary Health, 6 (6), 2022; e535-e547, doi: 10.1016/S2542-5196(22)00090-0.

[5] Silva, G., Duarte, J., Baptista, J. S., und Rufo, J. C.: *Low-cost sensors for indoor air quality monitoring: A systematic review of accuracy, applications, and limitations*. Journal of the Air & Waste Management Association, 76 (5), 2026; pp. 315–341, doi: 10.1080/10962247.2026.2624795.

[6] Mannan, M. und Al-Ghamdi, S. G.: *Indoor Air Quality in Buildings: A Comprehensive Review on the Factors Influencing Air Pollution in Residential and Commercial Structure*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18 (6), 2021; p. 3276, doi: 10.3390/ijerph18063276.

[7] Sensirion AG: *Datasheet SEN5x.* [Online]. Available: sensirion.com/media/documents/6791EFA0/62A1F68F/Sensirion_Datasheet_environmental_Node_SEN5x.pdf (accessed: 2026/07/29).

[8] Morawska, L., Asbach, C., und Patel, H.: *Application of PM 2.5 low-cost sensors for indoor air quality compliance monitoring*. Aerosol Science and Technology, 59 (10), 2025; pp. 1210–1220, doi: 10.1080/02786826.2025.2457326.

[9] CEN/TS 18086:2024: *Workplace exposure – direct-reading low-cost particulate matter sensors for measuring airborne noaa – guidelines for application.* Comite'Europe'en de Normalisation (CEN), Brussels, 2024.

[10] Asbach, C., Todea, A. M., und Kaminski, H.: *Evaluation of a Partector Pro for atmospheric particle number size distribution and number concentration measurements at an urban background site*. Aerosol Research, 2 (1), 2024; pp. 1–12, doi: 10.5194/ar-2-1-2024.

[11] naneos particle solutions gmbh: *Partector 2 - Operation Manual* (accessed: 2026/07/29).

[12] Jonas Dahl: *bcMeter.* [Online]. Available: bcmeter.org (accessed: 2026/07/29).

[13] DIN ISO 16000-29:2015-02: *Innenraumluftverunreinigungen- Teil_29: Prüfverfahren für VOC-Detektoren.* Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2015.

[14] Sensirion AG: *Datasheet SCD30.* [Online]. Available: sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf (accessed: 2026/07/29).

[15] Umweltbundesamt: *Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR): Hygienische Leitwerte für die Innenraumluft.* [Online]. Available: www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/4031/bilder/dateien/hygienische_leitwerte_0.pdf (accessed: 2026/07/29).

[16] Bundesamt für Strahlenschutz: *Radon in Innenräumen* (accessed: 2026/07/29).

[17] Umweltbundesamt: *Informationen zu den Luftschadstoffen Stickstoffdioxid und Stickstoffoxiden.* [Online]. Available: www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/370/dokumente/infoblatt_stickstoffdioxid_stickstoffoxide_0.pdf (accessed: 2026/07/29).