

TECHNISCHER BERICHT

Arbeitsplatzqualität

für das EnOB-Verbundvorhaben

BUILD.DIGITIZED

IoT und BIM für die Inbetriebnahme und den Betrieb
von netzdienlichen Niedrigstenergiegebäuden

1.7.2020 – 30.6.2023

MONITORING.digital

FKZ: 03EN1021A

Hochschule Offenburg | Institut für Energiesystemtechnik
Badstraße 24 | 77652 Offenburg

INBETRIEBNAHME.digital

FKZ: 03EN1021B

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2 | 79110 Freiburg

EVALUATION.digital

FKZ: 03EN1021D

Mondas GmbH
Emmy-Noether-Str. 2 | 79110 Freiburg

Luftqualität

FKZ: 03EN1021F

Testo SE & Co. KGaA
Celsiusstraße 2 | 79822 Tititsee-Neustadt

Anlagenplanung mit BIM

FKZ: 03EN1021C

Konzmann Gebäudetechnik GmbH
Niederwiesenstraße 34 | 78050 VS-Villingen

Betriebsführung mit BIM

FKZ: 03EN1021E

Maurer Energie- und Ingenieurleistungen GmbH & Co. KG
Dr.-Kurt-Steim-Strasse 7 | 78713 Schramberg-Sulgen

Autor dieses Berichtes:

Dr. Benjamin Landenberger

Testo SE & Co. KGaA
Celsiusstraße 2 | 79822 Tititsee-Neustadt

BLandenberger@testo.de

Offenburg, 17. November 2021

Kurzfassung

Nicht nur die Luft am Arbeitsplatz, sondern in Innenräumen allgemein, kann unterschiedlich stark chemisch und physikalisch belastet sein und damit das persönliche Wohlbefinden sowie die eigene Konzentrations- und Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Neben dem CO₂, welches von den sich im Raum aufhaltenden Personen kontinuierlich ausgeatmet wird, gehören zu den üblichen Belastungen der Raumluft auch Partikel (Staub, Feinstaub) und flüchtige organische Komponenten (VOC – Volatile Organic Components). Alle drei Faktoren spielen bei der Bewertung der Raumluftqualität (IAQ – Indoor Air Quality) eine wichtige Rolle. In Arbeitspaket 8: Arbeitsplatzqualität wurde ein flexibles Konzept aus Sensorknoten entwickelt, welches den gleichzeitigen Betrieb und die Datenerfassung von mehreren Sensoren verschiedener Hersteller für alle relevanten Messgrößen zur Beurteilung der Raumluftqualität ermöglicht. Auf diese Weise kann das Verhalten der eingesetzten Sensoren effektiv und in vielen relevanten Einsatzumgebungen evaluiert werden.

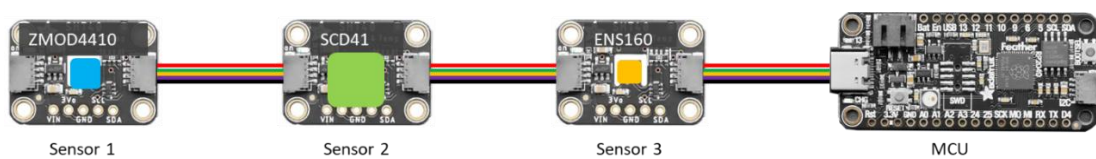


Abbildung 1 Aufbau der Sensorknoten: Die einzelnen Sensoren sind jeweils auf Breakout-Boards montiert, die wiederum zu einem Sensorknoten kombiniert werden können. Herzstück ist ein Mikrocontroller (MCU), der die Ansteuerung der Sensoren übernimmt und die Messdaten speichert oder an eine Cloud sendet.

1 Die Messgrößen

Die Beurteilung der Raumluftqualität erscheint im ersten Moment als subjektives Empfinden. Es geht um den persönlichen Wohlfühlfaktor. Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es allerdings einen schmalen Bereich der Luftzusammensetzung, in dem sich statistisch die Mehrheit der Menschen wohlfühlt. Neben dem persönlichen Wohlfühlfaktor spielen aber auch gesundheitliche Aspekte eine Rolle. Daher kommt es bei der Beurteilung der Raumluftqualität nicht nur auf die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und den Umgebungsdruck an, sondern auch auf die Belastung mit Feinstaubpartikeln und flüchtigen organischen Verunreinigungen (VOC). Diese Messgrößen gilt es bei der Beurteilung der Raumluftqualität zu erfassen und zu bewerten.

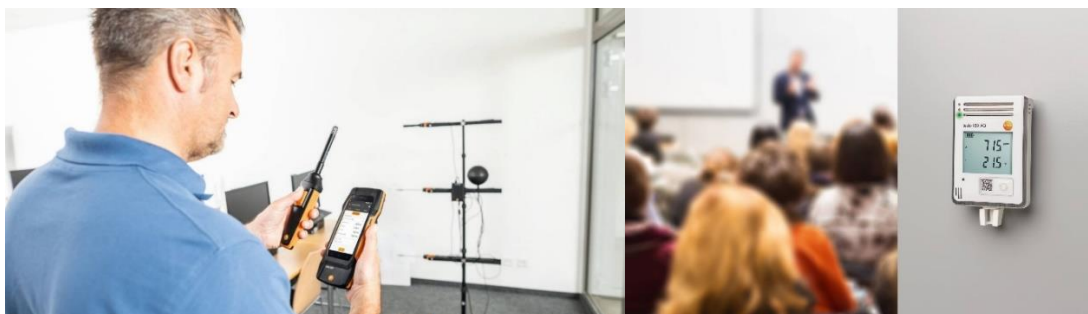


Abbildung 2 Behaglichkeitsmessung mit einem Handfühler und dem testo 400 (links) und Überwachung der Raumluftqualität mit dem Datenlogger testo 160 (rechts). © Testo SE & Co. KGaA

Die Messung von Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck ist in der modernen Messtechnik ein Routineverfahren. Auch die CO₂-Messung erfolgt z. B. im nicht dispersiven infrarot (NDIR)-Verfahren mit hoher Genauigkeit über einen breiten Konzentrationsbereich. Neuerdings kommen auch zunehmend neue Sensoren in MEMS-Bauweise auf den Markt, welche die CO₂-Konzentration anhand des photoakustischen Effekts ermitteln. Die durch Partikel verursachte Belastung kann anhand ihrer Massenkonzentration in einem definierten Luftvolumen bestimmt werden. Durch geeignete Filter werden die in der Luft vorhandenen Partikel in verschiedene Größenklassen (z. B. PM₁₀, PM_{2.5}) getrennt und von einem optischen Partikelzähler quantifiziert. Die VOC-Bestimmung ist hingegen deutlich schwieriger, da der Begriff VOC eine große Bandbreite flüchtiger chemischer Substanzen einschließt, die in gängigen Metalloxid-Sensoren nur ein Summensignal liefern. Diese Sensoren messen den elektrischen Widerstand durch eine beheizte dünne Metalloxid-Schicht. In der Luft vorhandene organische Moleküle können an dieser Schicht oxidiert oder reduziert werden, wobei sie Elektronen an die Metalloxid-Schicht abgeben, bzw. aus dieser aufnehmen. Dadurch verändert sich die Leitfähigkeit bzw. der Widerstand der Metalloxid-Schicht, was als Signal gemessen werden kann. Während einige VOC nicht mit der Oberfläche reagieren und damit nicht erfasst werden können, tragen die detektierbaren Moleküle unterschiedlich stark zum Sensorsignal bei. Eine Aufschlüsselung nach vorhandenen Anteilen ist daher nur äußerst schwierig und in begrenztem Maße möglich. Die eingesetzten Sensoren unterliegen zudem einer Drift, der durch aufwändige Abgleichprozeduren kompensiert werden muss und damit die Messtechnik teuer macht.

2 Ergebnisse der ersten Projektphase

2.1 IAQ-Messgrößen

Das Empfinden der Behaglichkeit in einem Raum hängt neben der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auch von der Gesamtkonzentration organischer Komponenten ab. Wie bereits beschrieben, handelt es sich dabei um eine Mischung aus vielen verschiedenen flüchtigen organischen Substanzen, die über unterschiedliche Quellen in die Raumluft gelangen. Schon geringe Konzentrationen von weniger als 3 mg/m³ in der Raumluft werden vom Umweltbundesamt als hygienisch auffällig bewertet und als akzeptable Obergrenze über einen Zeitraum von 12 Monaten für Räume definiert, die für einen längeren Aufenthalt bestimmt sind. Gemessen wird die Konzentration in der Umwelttechnik mithilfe von Adsorptionsröhrchen, die zunächst die organischen Moleküle aus der Luft binden. Anschließend kann die Konzentration aufgeschlüsselt nach jeweiliger organischer Verbindung mittels GC-MS-Analyse bestimmt werden. Problematisch ist jedoch, dass einige Stoffe, wie z. B. Formaldehyd, Ethanol oder Aceton, mit dieser Methode nicht erfasst werden können. Formaldehyd ist hochgradig gesundheitsschädlich, gelangt aber besonders über neue Bodenbeläge, Möbel und Textilien in die Raumluft. Daher wurden zu Projektbeginn neueste Halbleitersensoren (Metalloxid-Sensoren) favorisiert. Diese können im Gegensatz zur GC-MS-Analytik alle organischen Komponenten, die oxidierbar oder reduzierbar sind, direkt in der Raumluft messen. Auf diese Weise werden auch Formaldehyd, Ethanol und Aceton erfasst. Das erhaltene Signal ist allerdings im Gegensatz zur GC-MS-Analytik ein Summensignal aus allen in der Raumluft vorhandenen Komponenten. Durch spezielle Ansteuerung der Sensoren gekoppelt mit komplexen Algorithmen zur Datenauswertung kann jedoch bis zu einem gewissen Grad zwischen einzelnen Substanzen unterschieden werden. Dies erfordert allerdings einen aufwändigen Abgleich mit einer definierten Referenzzusammensetzung, die zu dem regelmäßig wiederholt werden muss, da die Metalloxid-Sensoren keine hohe Langzeitstabilität aufweisen und anfällig für Vergiftung (speziell Anhaftung anorganischer Substanzen, die die Oberfläche verändern und damit das Sensorsignal langfristig verändern) sind. Außerdem ist eine Unterscheidung zwischen einzelnen Komponenten nur dann zuverlässig möglich, wenn ausschließlich die während des Abgleichs in der Referenz enthaltenen Komponenten in der Raumluft vorhanden sind. Daher ist dieses Verfahren im Hinblick auf Präzision und Verlässlichkeit eher auf den Laborgebrauch beschränkt, wo immer wieder ähnliche, kontrollierte Umgebungen vorherrschen. Im breiten Feldeinsatz sind die

Umgebungen hingegen zu vielseitig und variabel, als dass eine zuverlässige Unterscheidung der einzelnen Komponenten möglich wäre. Hier kann sich lediglich unter Berücksichtigung einer verringerten Messgenauigkeit auf besonders häufig auftretende organische Verunreinigungen beschränkt werden.

Die notwendigen Verbesserungen bei der VOC-Messung sind Gegenstand aktueller Forschung, allerdings werden diese für das laufende Projekt voraussichtlich zu spät umgesetzt werden. Darüber hinaus existiert bisher keine einheitliche Norm zu den Themen VOC-Messung mit Metalloxid-Sensoren und die Berechnung eines IAQ-Index, die eine professionelle Beurteilung der Messergebnisse auch in streng regulierten Umfeldern erlaubt (siehe auch Abschnitt 2: Normierungsaktivitäten). Aufgrund dessen wurde beschlossen, den Fokus bei der Bestimmung der Raumluftqualität neben der Lufttemperatur und -feuchtigkeit zunächst auf die Messgrößen CO₂ und Partikelmassenkonzentration zu legen. Eine angestrebte Verbesserung ist die Reduktion der Leistungsaufnahme bei der CO₂-Messung, so dass Logger bzw. Monitore mit möglichst langen Batteriestandzeiten entwickelt werden können. Dies soll durch die geschickte Kombination geeigneter Sensoren erreicht werden. Im Bereich der Partikelsensorik werden die Messverfahren an bekannte Umgebungen und damit auf erwartbare Partikelarten angepasst. Dadurch sollen die Qualität und die Verlässlichkeit der Messungen entscheidend verbessert werden und ein aussagekräftigeres Ergebnis liefern.

2.2 Normierungsaktivitäten

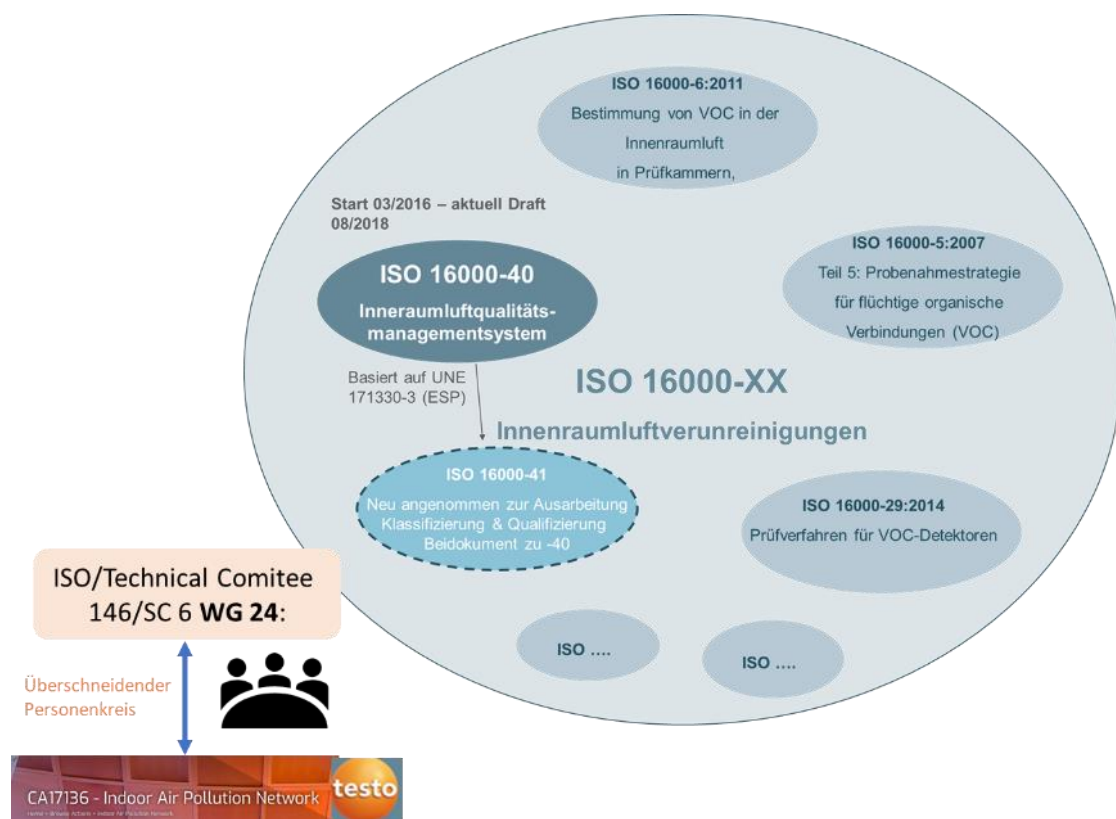


Abbildung 3 Bestrebungen zur Normierung der Messgröße VOC im Hinblick auf die Indoor-Air-Quality. Im Rahmen des Projekts versucht Testo die Bestrebungen über das Indoor Air Pollution Network zu unterstützen und voranzutreiben.

Die Rechercheergebnisse im Rahmen des Projekts haben gezeigt, dass derzeit noch keine europäische oder weltweite Norm existiert, die eine Vereinheitlichung von VOC-Messverfahren erlaubt. Daher sind viele Hersteller moderner Sensorik dazu übergegangen, die eingesetzten Sensoren nicht zur Detektion absoluter VOC-Konzentrationen sondern als Ereignisdetektoren zur Detektion von Veränderungen in der Raumluft zu nutzen. Auf Grundlage dieser detektierten Veränderungen wird dann ein IAQ-Index berechnet, der als Indikator für die Raumluft fungieren soll. Allerdings ist auch dieser Index und dessen Berechnung an keine Norm gekoppelt, so dass dieser willkürlich von den Herstellern implementiert werden kann. Daher wurde sich im ersten Projektabschnitt aktiv im begleitenden Ausschuss VOC4IAQ eingebracht, um an der Erarbeitung eines ganzheitlichen Regelwerks zu den Themen VOC-Messung und IAQ-Index mitzuwirken. In diesem Prozess, der auch in den folgenden Projektabschnitten fortgesetzt wird, soll erarbeitet und festgelegt werden, wie sich solche Messungen und Angaben vereinheitlichen lassen und woran sich zukünftig entwickelte Sensoren messen müssen. Dies beinhaltet z. B. die Einigung auf eine definierte VOC-Zusammensetzung als Prüfreferenz und die Verarbeitung der gemessenen Umweltdaten zu einem einheitlichen IAQ-Index. Durch die vereinheitlichende Normierung der (Mess-)Größen VOC und IAQ-Index soll für den Endnutzer der Messtechnik eine Vergleichbarkeit und Verlässlichkeit hergestellt werden, die es erlaubt, qualifizierte Aussagen über die Qualität der Raumluft zu treffen.

2.3 Sensorknoten

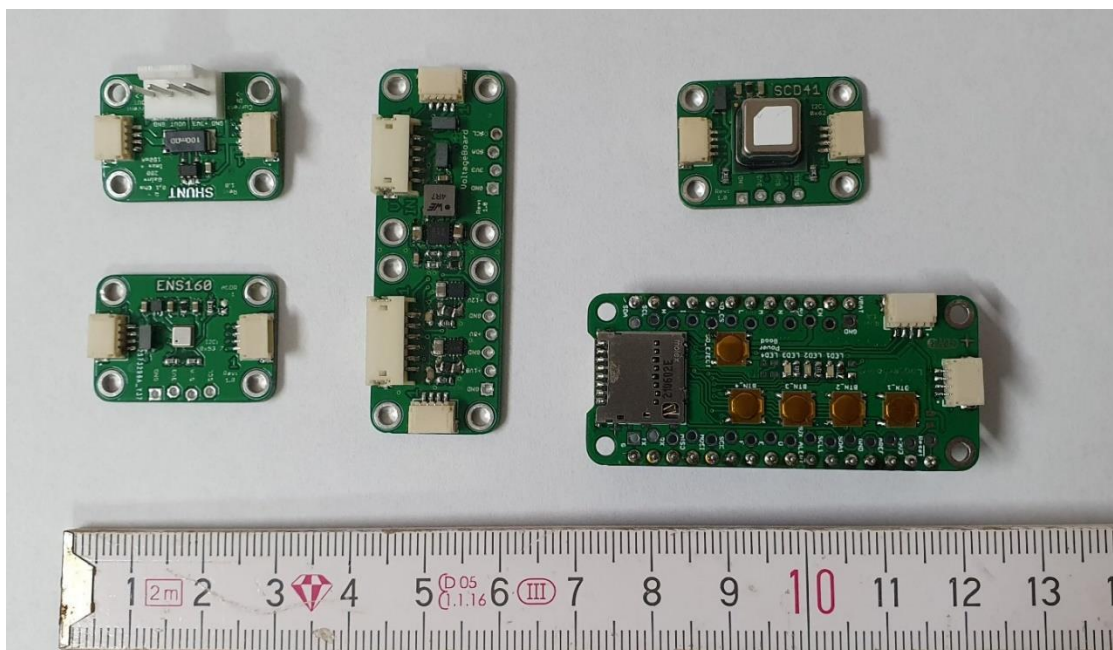
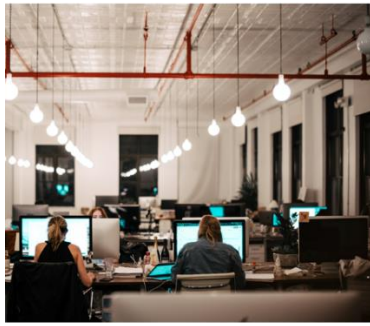


Abbildung 4 Prototypen der Bauteile des Sensorknoten-Systems. Die einzelnen Module können über das Qwiic-Connect-System miteinander verbunden werden. Die einzelnen Sensoren werden von der MCU über den digitalen I2C-Bus angesteuert und ausgelesen.

Im Rahmen des Arbeitspakets 8: Arbeitsplatzqualität wurde ein flexibles Konzept von Sensorknoten (s. o.) entwickelt, welches die synchrone Evaluierung verschiedener Sensoren für alle relevanten Messgrößen (Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, CO₂, Partikel, VOC) unterschiedlicher Hersteller in verschiedenen Einsatzumgebungen erlaubt. Eine große Schwierigkeit stellen dabei die erwarteten Anforderungen unterschiedlicher Einsatzumgebungen an die Messtechnik dar. Ziel ist die Entwicklung einer Sensorplatt-form, die sowohl in messtechnisch einfachen Umgebungen wie z. B. Großraumbüros und privaten Wohnzimmern, aber auch in anspruchsvollen Umgebungen wie z. B. Restaurantküchen, Sportumkleiden und Chemielaboren, zuverlässige Werte liefert.



Ort / Umgebung	Herausforderung
Klassenraum	★ ★
Großraumbüro	★
Restaurantküche	★ ★ ★ ★
Großküche	★ ★ ★ ★
Kantinenraum	★ ★ ★
Haushaltsküche	★ ★ ★
Umkleide	★ ★ ★ ★ ★
Sporthalle	★ ★ ★
Wohnraum	★
Schlafzimmer	★
Einrichtungshaus	★ ★ ★ ★ ★
Technisches Labor	★ ★
Chemisches Labor	★ ★ ★ ★ ★
Lebensmitteleinzelhandel	★ ★ ★ ★ ★

Abbildung 5 Anforderungen unterschiedlicher Einsatzgebiete an die Messtechnik. Die Sensoren sollen sowohl im Großraumbüro mit wenig Dynamik in der Luftzusammensetzung als auch in der Großküche, in der die Dämpfe und Gerüche (Partikel/Aerosole, VOC) ständig wechseln, zuverlässige Messergebnisse liefern.

Die ausgewählten Sensoren wurden bereits in ersten Funktionstests untersucht, um Einblicke in ihr Ansprechverhalten, mögliche Abgleichprozeduren, die Datenauslesung und die Implementierung verschiedener Messmodi zu erlangen. Um die unterschiedlichen Einsatzumgebungen zu charakterisieren und die Messtechnik auf diese abzustimmen, sind für den nächsten Schritt zahlreiche Feldtests geplant, bei denen zunächst umfangreiche Daten erhoben werden. Diese sollen dann als Grundlage zur Entwicklung komplexer Mess- und Auswertungsprozeduren dienen, um in allen anvisierten Einsatzumgebungen verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Daher werden die Sensorknoten derzeit in größerer Stückzahl angefertigt, damit diese im nächsten Projektabschnitt in den anderen Arbeitspaketen für Messungen zur Verfügung gestellt werden können. Nach dem entwickelten Konzept sind die Sensoren einzeln auf sog. Breakout-Boards montiert, so dass sich diese bedarfsgerecht kombinieren und an einen Mikrocontroller (MCU – Microcontroller Unit) als zentrale Steuereinheit anschließen lassen. Die MCU wird mit einem Akku betrieben und kann die gesammelten Daten entweder auf einer SD-Karte speichern oder über ein Funkmodul an einen Cloud-Speicher oder die Mondas-Plattform (Arbeitspaket 2) senden. Später können die Sensoren auch in einen Air-Quality-Fühler für das testo 400 integriert werden, das als zentrales Hilfsmittel für die Gebäudeinbetriebnahme dienen soll. Die gesammelten Daten sollen genutzt werden, um die Messmethodik, die automatische Messdatenverarbeitung und deren Interpretation zur Beurteilung der Raumluftqualität kontinuierlich weiterzuentwickeln und mit dem Ziel zu verbessern, die Sensorik in zukünftigen Logger- und Handmessgeräten zur Überwachung und Prüfung der Raumluft in möglichst vielen Umgebungen einzusetzen.

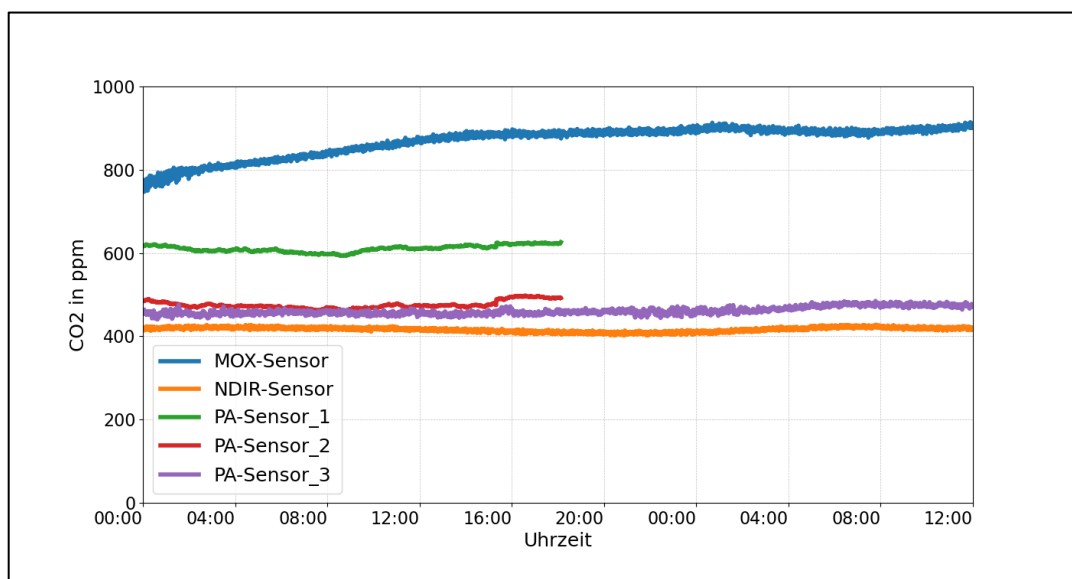


Abbildung 6 Funktionstests der CO₂-Sensoren: Vergleich der CO₂-Messwerte von Sensoren verschiedener Technologien an Umgebungsluft.