

## **Stabilität und Kalibrierfähigkeit von Kohlendioxid Gassensoren für die Klima- und Lüftungstechnik**

Prof. Dr. Udo D. J. Gieseler<sup>1,2</sup>, Prof. Dr. Gerhard Wiegleb<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Fachhochschule Dortmund, Fachbereich Informations- und Elektrotechnik  
Sonnenstraße 96, 44139 Dortmund

<sup>2</sup>Europäisches Testzentrum für Wohnungslüftungsgeräte (TZWL)  
Ernst-Mehlich-Str. 4a, 44141 Dortmund

<sup>3</sup>Institut für Mikrosensorik & Fahrzeugelektronik (IfM)  
Sonnenstraße 96, 44139 Dortmund

### ***1. Einleitung***

Die bedarfsgerechte Lüftung gehört mittlerweile zum Standard, wenn es um Energieeinsparungen in Gebäuden geht. Auch bezüglich sonstiger hygienischer und bauphysikalischer Anforderungen wird in Wohn- und Geschäftsgebäuden zunehmend die kontrollierte Raumlüftung zu einem zentralen Thema. So ist gemäß DIN 1946-6 [1] für neu zu errichtende oder zu modernisierende Gebäude mit lüftungstechnisch relevanten Änderungen ein Lüftungskonzept zu erstellen.

Verbreiteter Stand der Technik sind bisher Lüftungseinrichtungen, die eine konstante Luftzufuhr vorsehen. In Stoßzeiten reicht diese Art der Lüftung allerdings nicht aus, während diese in „Ruhezeiten“ zu einem erhöhten Energieeinsatz führt. Durch eine bedarfsgerechte Lüftung kann der Energieeinsatz in „Ruhezeiten“ reduziert und in Stoßzeiten der Komfort bzw. die Luftqualität gesteigert werden. Dies gilt umso mehr je variabler der Nutzungsgrad, insbesondere bezogen auf den Tagesrhythmus des Gebäudes ist (z.B. Schulen, Besprechungsräume usw.). Als Regelgröße kann z.B. der Kohlendioxidgehalt (CO<sub>2</sub>) genutzt werden, da er ein direktes Maß für die verbrauchte Luft darstellt.

Die DIN EN 15251 [2] definiert für allgemeine Gebäude eine Kategorisierung der Luftqualität (Kategorien I bis IV), wobei Kategorie II als normales Maß für neue und renovierte Gebäude gilt. Als Parameter für die Raumlüftungsqualität dient hierbei die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Unter Annahme des ungestörten Außenluftwertes von etwa 400 ppm führt dies zu CO<sub>2</sub>-Referenzwerten von 900 ppm. Ähnliche Grenzwerte schlägt die DIN EN 13779 [3] für Nichtwohngebäude vor (IDA 1 bis 4). Auch diese Norm schlägt als Parameter für die direkte Klassifizierung insbesondere die CO<sub>2</sub>-Konzentration vor. Entsprechend gilt als maximaler Wert für eine mittlere Raumlüftungsqualität (IDA 2) ein Wert von maximal 1000 ppm (auch hier unter Annahme des ungestörten Außenluftwertes von etwa 400 ppm). Die von den beiden zitierten Normen vorgeschlagenen Grenzwerte für eine normale bzw. mittlere Raumlüftungsqualität liegen damit im Bereich einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 900 ppm bis 1000 ppm. Der Wert von 1000 ppm entspricht der Pettenkoferzahl. Diese wurde vom deutschen Wissenschaftler Max von Pettenkofer vorgeschlagen, als CO<sub>2</sub>-Konzentration oberhalb derer das Wohlbefinden von Personen gestört ist. In der früheren Lüftungsnorm DIN 1946 Teil 2 wurde dieser Wert daher auch als Maß für die Luftqualität eingeführt. Tabelle 1.1 fasst die Grenzwerte für die Raumlüftungsqualität zusammen.

**Tabelle 1.1:** Zusammenfassung der CO<sub>2</sub>-Grenzkonzentrationen für gute Raumlufqualität verschiedener Autoren.

| Quelle       | Kategorie | CO <sub>2</sub> -Konzentration bei Außenluftwert in Höhe von 400 ppm | Qualitätsbezeichnung bei Unterschreitung |
|--------------|-----------|--|--|
| DIN EN 15251 | II        | bis 900 ppm  | normal, empfohlen                        |
| DIN EN 13779 | IDA 2     | bis 1000 ppm   | mittel                                   |
| Pettenkofer  |           | bis 1000 ppm   | unbedenklich                             |

Um eine Regelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in Gebäuden realisieren zu können, werden Gassensoren eingesetzt, die den CO<sub>2</sub>-Gehalt permanent messen. Diese Regelung kann auf Werte unterhalb der Pettenkoferzahl erfolgen, wodurch eine optimale Frischluftzufuhr gewährleistet wird. Die Gassensoren werden vom Hersteller auf einen bestimmten Messbereich eingestellt (z.B. 0 bis 2000 ppm CO<sub>2</sub> oder 0 bis 5000 ppm CO<sub>2</sub>) und mit diesen Kalibrierwerten ausgeliefert. Nach der Installation im Gebäude muss der Sensor dann über Jahre (mind. 10 Jahre) zuverlässige Werte liefern. Die Drift der Sensorsignale sollte daher in sehr engen Grenzen gehalten werden, um Fehlfunktionen ausschließen zu können. Die im Markt befindlichen Sensoren arbeiten alle nach dem Prinzip der Infrarotabsorption und sind damit sehr selektiv auf das zu messende Kohlendioxid abgestimmt.

Für eine langzeitstabile und zuverlässige Messung können Auswertekonzepte verwendet werden, die eine interne Referenz beinhalten. Dadurch kann der Messwert regelmäßig mit dem Referenzwert verglichen werden. Die überwiegende Anzahl von Herstellern der Sensoren hat aus Kostengründen allerdings auf eine Referenzmessung verzichtet, da die Genauigkeitsanforderungen (5%) an diese Sensoren vergleichsweise gering sind. Die Langzeitstabilität wird i. A. durch eine Softwarelösung (z.B. ABC-Logic™) realisiert, die einen gleitenden Mittelwert der Minimalwerte (= *Frischluft*) als Bezugsgröße bildet. Für die Auswertung werden nur Abweichungen von diesem Mittelwert herangezogen.

Je nach Anwendungsfall kann diese Art der Messung in der Praxis zu Problemen führen, insbesondere, wenn das Frischluftniveau im Raum nur sehr unregelmäßig erreicht wird. Im TZWL werden seit vielen Jahren entsprechende Messungen durchgeführt, die dieses Verhalten bestätigen. Da in der Klima- und Lüftungstechnik keine regelmäßigen Kalibrationen bzw. Justierungen der Sensoren im Betrieb möglich sind, können diese Fehler zu erheblichen Problemen in der Regelungstechnik für Gebäude bzw. Niedrigenergiehäuser führen.

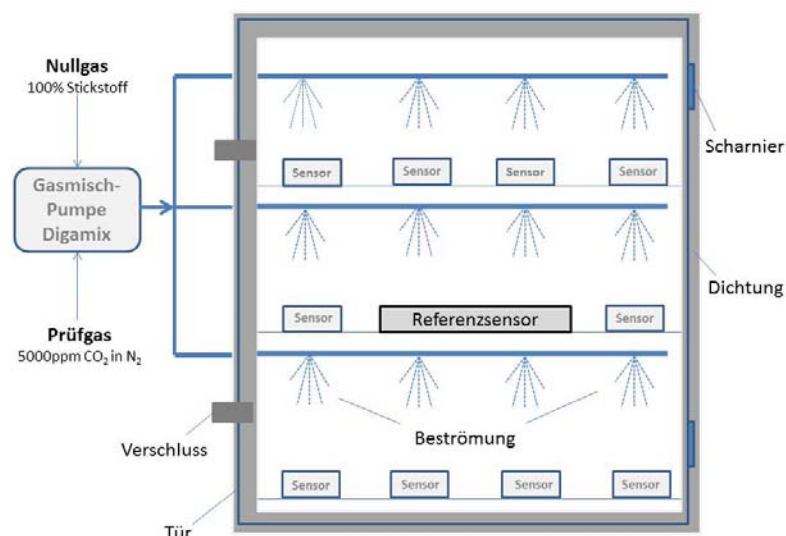
Im Rahmen des Projektes an der FH Dortmund wurden die Produkte der wichtigsten Sensorhersteller untersucht und hinsichtlich der Einsatzfähigkeit in der Gebäudesystemtechnik miteinander verglichen. Um eine unabhängige Referenz für den Dauerversuch vorweisen zu können wurde ein eigener Sensor mit hochwertigen und somit driftfreien Bauteilen aufgebaut. Der Referenzsensor wurde im Vorfeld der Versuchsreihen hinsichtlich der Drift, der Ansprechzeit des Temperatur- und Druckfehlers sowie der Kennlinie ausführlich untersucht. Am Dortmunder IfM liegen umfassende Erfahrungen auf diesem Gebiet vor. Insgesamt wurden 28 Gassensoren von 7 Herstellern getestet (siehe Tabelle 1.2). Die Anzahl der Sensoren wurde jeweils so ausgewählt, dass auf jeden Hersteller in etwa die gleichen Kosten entfallen.

**Tabelle 1.2:** Im Rahmen der Messkampagne untersuchte CO<sub>2</sub>-Sensoren.

| Hersteller                                | Modell                          | Messbereich (in ppm) | Anzahl baugleicher Sensoren |
|---|---------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| J. DITTRICH ELEKTRONIK GmbH & Co. KG      | MF420-IR-CO2<br>BN1.000.213G    | 0 – 6000             | 2                           |
| E+E ELEKTRONIK GmbH                       | EE80-2CT2/T04*                  | 0 – 2000             | 3                           |
| GE Sensing & Inspection Technologies GmbH | T6613                           | 400 – 2000           | 3                           |
| SenseAir AB (Sweden)                      | K30 - STA CO2                   | 0 – 5000             | 5                           |
| SenseCube (Korea)                         | SEN CO2 O 100 5                 | 0 – 5000             | 5                           |
| smartGAS Mikrosensorik GmbH               | smartMODUL Connect<br>C1-212505 | 0 – 5000             | 3                           |
| Vaisala GmbH                              | GMW115                          | 0 – 5000             | 2                           |

## 2. Messungen

Sämtliche Messungen wurden in einer Prüfkammer (Abbildung 2.1) durchgeführt, in der die Temperatur  $T$ , der Druck  $p$  und die Gaskonzentration  $c$  konstant gehalten werden können. Die Prüfkammer besteht aus einem Edelstahlgehäuse (Abmessungen 45 × 45 × 45 cm, Kammer-volumen ca. 90 Liter) mit einer Plexiglastür, die über eine Moosgummidichtung verschlossen wird. Die Kammer wurde so konzipiert, dass die gesamte Einheit in einem Klimaschrank installiert werden kann. Die Sensoren wurden in der Prüfkammer auf drei Ebenen platziert, so dass alle Sensoren in der Kammer Platz fanden und sich thermisch gegenseitig nicht beeinflussen. Weiterhin wurde die Prüfkammer mit einer Gasversorgung versehen, um die Prüfgase zeitnah zu den Sensoren leiten zu können. Zu diesem Zweck wurde oberhalb der



**Abbildung 2.1:** Aufbau der Prüfkammer mit den eingebauten Gassensoren und Lage des Referenzsensors.

einzelnen Sensoren eine Gasleitung rechenförmig verlegt. Die Austrittsöffnungen (Düsen) befinden sich direkt über den Sensoren, so dass eine direkte Bestromung gewährleistet ist. Der Referenzsensor [4] befand sich während der Messungen im Zentrum der Prüfkammer, um einen repräsentativen Wert für die Gaskonzentration zu erhalten. Da der Referenzsensor für alle Messungen als Bezugsgröße herangezogen wird, mussten die Messeigenschaften detailliert untersucht werden.

In Abbildung 2.2 ist die Kennlinie des Referenzsensors mit dem gemessenen Linearitätsfehler zu sehen. Der Referenzsensor wurde stufenweise mit Prüfgas beaufschlagt, das über eine Gasmischpumpe (Digamix/Fa. Wösthoff, Bochum) erzeugt wurde. Die Abweichungen der Messwerte innerhalb der Kennlinie liegen bei  $\pm 6$  ppm. Die Linearität ist also mit hinreichender Genauigkeit gewährleistet.

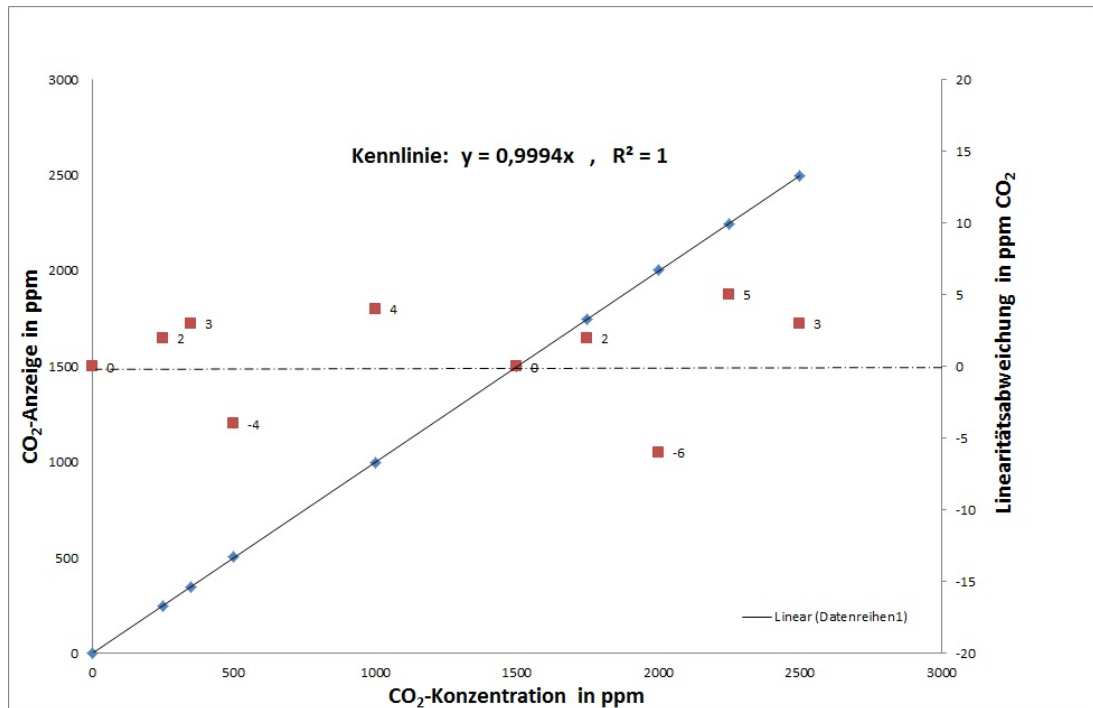
Der Druckfehler ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Zur Aufnahme dieser Kurve wurde Prüfgas mit einer Konzentration von 2500 ppm CO<sub>2</sub> in die Küvette des Referenzsensors geleitet. Am Ausgang der Küvette wurde dann mit einem Nadelventil der Druck stufenweise erhöht und mit einem Referenzdrucksensor erfasst. Der Unterdruckbereich wurde mit einer Membranpumpe in gleicher Weise erzeugt. Die Anzeigewerte, bei den unterschiedlichen Druckverhältnissen wurden dann als Funktion des Küvettendruckes aufgetragen. Das Verhalten ist nahezu linear. Insgesamt ist der Fehler mit 19% pro 100 mbar aber größer, als man aufgrund der Dichteänderung von 10% pro 100 mbar erwarten würde.

Der Temperaturfehler wurde zwischen 0°C und 50°C in einem Klimaschrank ermittelt und liegt im Nullpunkt bei -0,26 ppm/°C. Im Ausschlag (Messpunkt bei 2500 ppm CO<sub>2</sub>) wurde ein Fehler von 5,68 ppm/°C festgestellt.

Die Nachweisgrenze lag bei einem Messwert von 1500 ppm CO<sub>2</sub> bei 2,3 ppm. Dieser Wert wurde über das Rauschsignal in einem Zeitintervall von 100 Sekunden (=100 Messwerte) mit der 3-fachen Standartabweichung ermittelt.

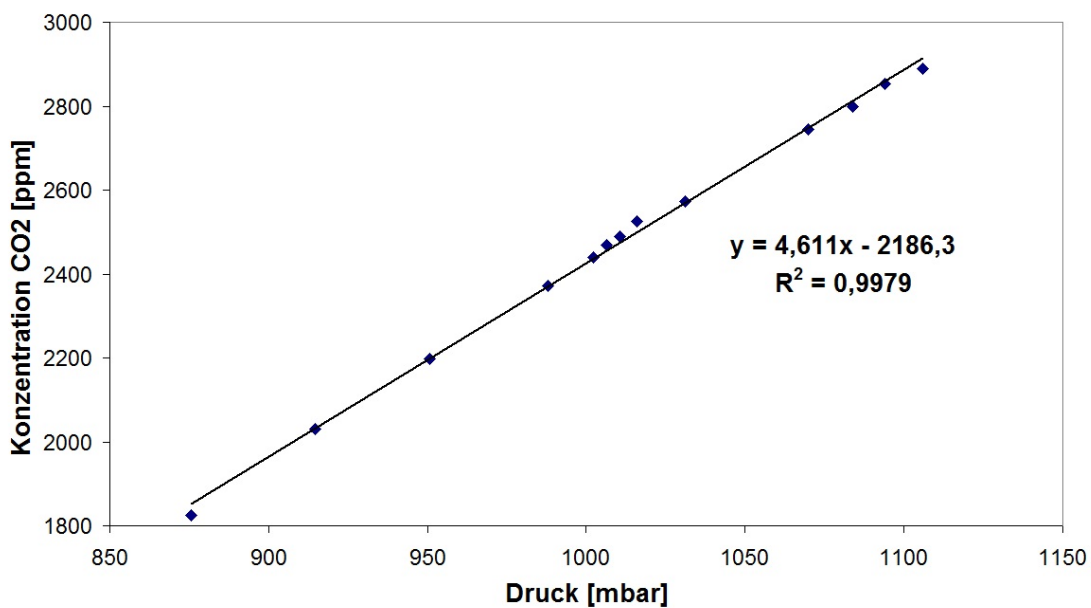
Im ersten Schritt wurden mehrere Messreihen über Zeiträume von bis zu etwa 16 Tagen durchgeführt. Hierbei wurden die Sensoren zunächst in der o.g. Box vorgegebenen Werten von CO<sub>2</sub>-Konzentration, Temperatur und Feuchte ausgesetzt. Außerdem wurden die Sensoren typischen Laborbedingungen ausgesetzt. Diese Ergebnisse liegen nun vor und werden nachfolgend beschrieben.

Einzelne Sensoren wiesen bei den CO<sub>2</sub>-Werten Abweichungen auf, welche signifikant über die sonstige Streubreite der Ergebnisse hinausgingen. Hierzu zählen wir Sensoren, welche im Vergleich zum Referenzsensor über einen Zeitraum von mehr als 24 Stunden eine Abweichung von über 100% aufwiesen, d.h. bei einem Referenzwert von z.B. 400 ppm, Werte außerhalb des Intervalls 200 ppm bis 800 ppm anzeigten. Dies ist vermutlich auf Herstellungsfehler bzw. Fehler in der Kalibrierlogik zurückzuführen. Die Messwerte dieser Sensoren über einen Zeitraum von 15,8 Tagen bei Laborbedingungen sind in Abbildung 2.4 zusammen mit denen des Referenzsensors dargestellt. Da die Ursache der starken Abweichungen im Rahmen des Projekts nicht abschließend geklärt werden konnte, sind diese Sensoren nicht mit in die weitere Bewertung eingeflossen.

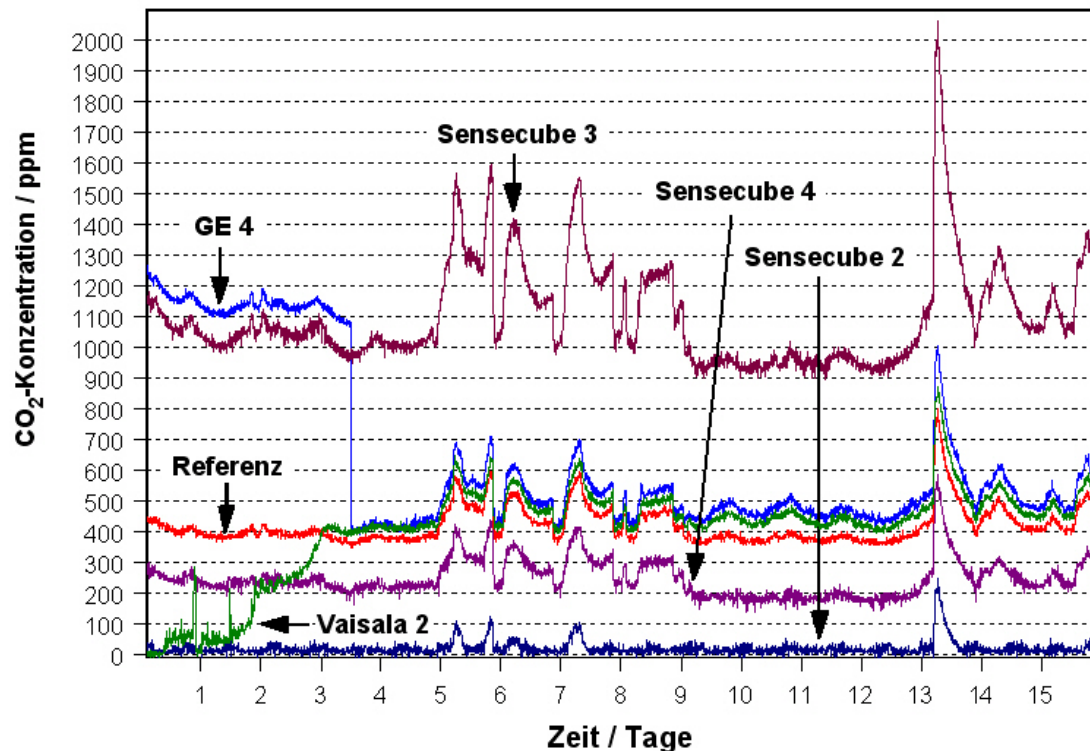


**Abbildung 2.2:** Kennlinie des Referenzsensors (smartGAS). Die Zahlenwerte der roten Messpunkte geben die Abweichung zwischen der vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Konzentration und der angezeigten CO<sub>2</sub>-Konzentration an.

**Unterdruck / Druckfehler bei 2500ppm CO<sub>2</sub>**



**Abbildung 2.3:** Abhängigkeit der Konzentrationsanzeige vom Umgebungsdruck  $p$ . Barometrische Luftdruckänderungen von  $\pm 25$ mbar führen demnach zu einem Fehler von  $\pm 4,6\%$  vom Anzeigewert.



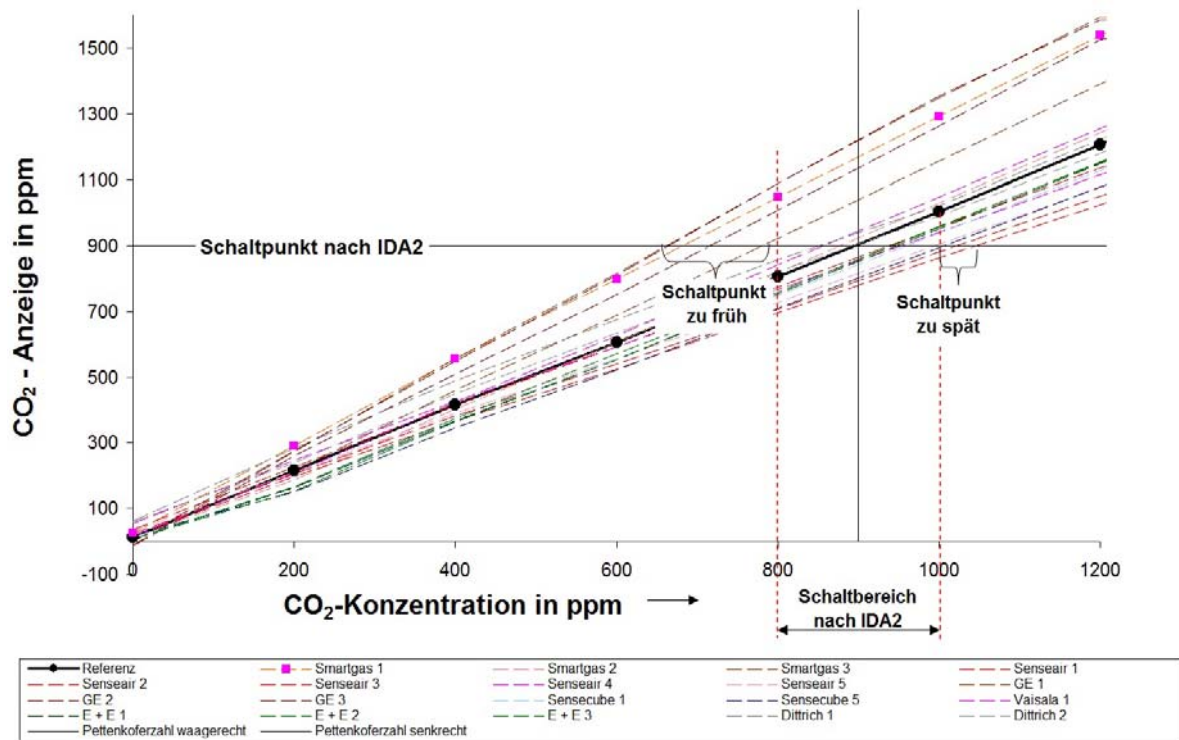
**Abbildung 2.4:** Messwerte bei Laborluft über einen Zeitraum von 15,8 Tagen. Dargestellt sind neben dem Referenzsensor solche Sensoren, welche signifikante Abweichungen aufzeigen und daher im Weiteren von der Analyse ausgeschlossen wurden.

### 3. Schaltverhalten

Die wichtigste Funktion der untersuchten Gassensoren, liegt im Schaltverhalten bei steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum. Um dieses Verhalten untersuchen zu können wurde die Gaskonzentration in der Prüfkammer stufenweise erhöht und die Signale der einzelnen Sensoren aufgezeichnet. Ziel dieser Messung war es, festzustellen ob alle Sensoren eine Schaltschwelle von  $(900 \pm 100)$  ppm CO<sub>2</sub> (IDA2) sicher erkennen können. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Alle Sensoren reagieren auf eine steigende Gaskonzentration, wobei die Steigungen sehr unterschiedlich sind. Aufgrund der im Datenblatt bekannt gegebenen Eigenschaften sollten aber allen Sensoren das gleiche Verhalten haben. In dem Praxistest zeigt sich jedoch, dass einige Sensoren zu früh und andere Sensoren zu spät die Schaltschwelle erkennen. Die Schaltpunkte sind zur Verdeutlichung auch in der Tabelle 3.1 aufgeführt.

Die GE-Sensoren schalten demnach deutlich zu früh. Ähnlich verhält sich der smartGAS 1. SmartGAS 3 schaltet knapp vor dem Erreichen der Schaltschwelle. SenseAir 1 und 3 sowie SenseCube 5 schalten etwas zu spät. Die restlichen Sensoren erfüllen alle das Kriterium und schalten zu den vorgegebenen Werten zwischen 800 ppm und 1000 ppm.

Das Schaltverhalten ist also in den meisten Fällen akzeptabel. Ein zu frühes Schalten bei unter 800 ppm führt lediglich zu einer besseren Raumluftqualität als erforderlich. Das zu späte Schalten ist mit 50 ppm Verzögerung zu vernachlässigen. Die hier dargestellten Schaltwerte sind jedoch nur eine Momentaufnahme. Aufgrund der im nächsten Abschnitt dargestellten zeitlichen Variationen können sich die Schaltwerte gegenüber desjenigen des Referenzsensors durchaus verschieben.



**Abbildung 3.1:** Schaltverhalten der Sensoren bei ansteigender Gaskonzentration in der Prüfkammer

**Tabelle 3.1:** Schaltpunkte der Sensoren gemäß Abbildung 3.1

| Sensorbezeichnung     | Schaltpunkt in ppm | Bemerkung               |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|
| GE 1                  | 660                | schaltet zu früh        |
| GE 2                  | 665                |                         |
| SmartGAS 1            | 680                |                         |
| GE3                   | 715                |                         |
| SmartGAS 3            | 780                |                         |
| Dittrich 1            | 850                | schaltet im Normbereich |
| Vaisalla 1            | 855                |                         |
| SmartGAS 2            | 875                |                         |
| Dittrich 2            | 895                |                         |
| <b>Referenzsensor</b> | <b>900</b>         |                         |
| SenseAir 2            | 939                |                         |
| E+E 3                 | 940                |                         |
| E+E 2                 | 943                |                         |
| E+E 1                 | 948                |                         |
| SenseAir 4            | 952                |                         |
| SenseCube 1           | 960                |                         |
| SenseAir 5            | 995                |                         |
| SenseCube 5           | 1010               | schaltet zu spät        |
| SenseAir 1            | 1025               |                         |
| SenseAir 3            | 1050               |                         |

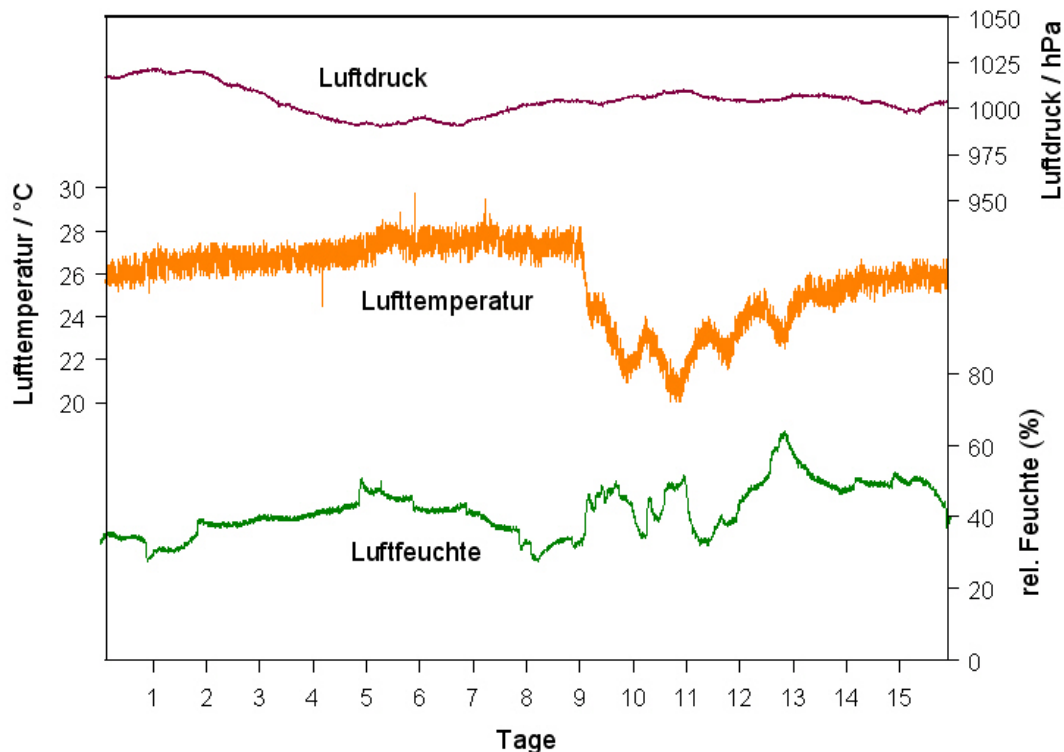
#### 4. Zeitliche Variationen

Zur Analyse des Verhaltens der Sensoren unter realen Bedingungen wurde die Messkammer mit Laborluft beströmt. Hierzu wurde ein Zeitraum von 15,8 Tagen verwendet, in dem das Labor regulär von mehreren Personen besucht wurde. Dementsprechend variiert der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft, der die Sensoren ausgesetzt waren. Die Raumparameter Temperatur, Luftdruck, relative Feuchte sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Messintervall für einen Messpunkt beträgt 6 Minuten.

Ziel der Untersuchung ist die Einschätzung der Genauigkeit und Stabilität der Sensoren in Bezug zum Referenzsensor. Aus dem Zeitverhalten kann analysiert werden, ob die Sensoren konstant vom Referenzsensor abweichen, Schwankungen oder zeitlichen Drifts unterliegen. Einen ersten Eindruck hiervon vermittelt die direkte Darstellung der Zeitreihen für den CO<sub>2</sub>-Messwert in 6-Minuten-Intervallen (Abbildungen 4.2 bis 4.8). Der Boxplot (Abbildung 4.9) fasst die Abweichungen zum Referenzsensor für dieselbe Periode in einer Grafik übersichtlich zusammen. Grundlage ist die Differenz  $\Delta K$  der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen:

$$\Delta K = K_{\text{CO}_2, \text{Sensor}} - K_{\text{CO}_2, \text{Referenzsensor}}$$

In den Abbildungen 4.2 bis 4.8 können, auch aufgrund des relativ begrenzten Zeitraumes von etwas über 2 Wochen, keine signifikanten Anzeichen von starken Drifts, d.h. zeitabhängige Vergrößerung (oder Verkleinerung) der Differenz zum Referenzsensor oder auffälligen Sprüngen festgestellt werden. Das Driftverhalten und Sprünge sind daher Gegenstand von nachfolgenden Untersuchungen über längere Zeiträume. Die vorhandenen Variationen in Bezug auf den Referenzsensor sind daher hauptsächlich statistischer Natur. Unter dieser Annahme



**Abbildung 4.1:** Werte der Luftparameter Temperatur, Luftdruck und relative Feuchte in der Messkammer während der Messperiode von 15,8 Tagen, bei der diese mit Laborluft beströmt wurde.



einer rein statistischen Streuung um einen Mittelwert kann für jeden einzelnen Sensor die Verteilung  $\Delta K$  der Differenzen mit Hilfe der Standardabweichung dargestellt werden:

$$\Delta K = K_M \pm \sigma$$

Dabei bezeichnet  $K_M$  Mittelwert und  $\sigma$  die Standardabweichung, so dass innerhalb des Intervalls  $\pm\sigma$  eine Anzahl von 68,3 % der Differenzen liegt. Bei einem Sensor, welcher sehr präzise dem Referenzsensor folgt ist also der Mittelwert  $K_M$  der Differenz Null, als auch die Standardabweichung  $\sigma$  sehr klein. In Abbildung 4.9 sind die Mittelwerte  $K_M$  für die einzelnen Sensoren als Kreuz eingetragen. Dieses Kreuz wird von einer Box umgeben, welches die Standardabweichung  $\pm\sigma$  repräsentiert (also 68,3 % der Messwerte). Die Gesamtheit der Differenzen ist als Balken nach oben und unten eingetragen.

Die Ergebnisse stellen sich für die Sensoren der einzelnen Hersteller wie folgt dar:

Dittrich: Abbildungen 4.2 und 4.9

Die Zeitreihen zeigen deutlich, dass die beiden Sensoren etwas oberhalb des Referenzsensors anzeigen. Der Boxplot bestätigt, dass die Mittelwerte  $K_M$  um 51 bzw. 87 ppm höher als der Referenzsensor sind. Die Standardabweichung von  $\sigma = 10$  ppm für beide Sensoren ist jedoch die kleinste der Messkampagne.

E+E: Abbildungen 4.3 und 4.9

Die drei Sensoren von E+E liegen sehr nahe am Referenzsensor. Demzufolge haben diese Sensoren auch relativ geringe Mittelwerte  $K_M$  von 14 ppm bis 26 ppm für die Differenz zum Referenzsensor. Die Standardabweichung von  $\sigma = 18$  bis 19 ppm ist ebenso vergleichsweise moderat wie die gesamte Maximalabweichung, welche im Bereich zwischen -33 ppm und +98 ppm bleibt.

GE: Abbildungen 4.4 und 4.9

Die Sensoren verhalten sich ähnlich zu den zuvor beschriebenen. Hier zeigen sich jedoch Anzeichen einer Drift im Zeitverhalten, da die Abweichungen zum Referenzsensor ab dem 3. Tag deutlicher sind als zu Beginn. Dies führt dazu, dass der Mittelwert  $K_M$  insgesamt um 42 bis 44 ppm höher liegt als der Referenzsensor. Die Standardabweichung von  $\sigma = 17$  bis 19 ppm bleibt jedoch noch moderat, ebenso wie die gesamte Maximalabweichung im Bereich zwischen -20 ppm bis +110 ppm.

SenseAir: Abbildungen 4.5 und 4.9

Bei den SenseAir-Sensoren zeigt sich eine deutliche Streuung um die Messwerte des Referenzsensors, wobei diese zunächst eher oberhalb liegen und zum Ende des 16-Tage-Zeitraums alle unterhalb des Referenzsensors. Dies führt zu den größten Standardabweichungen im Messprogramm, mit  $\sigma$  zwischen 38 ppm (SenseAir 3) und 55 ppm (SenseAir 2). Auch die Abweichung nach unten ist hier besonders groß, mit Maximalabweichungen zwischen -106 ppm (SenseAir 4) und -190 ppm (SenseAir 3). Diese Maximalabweichungen sind (wie bei den meisten anderen Sensoren auch) am 13. Tag entstanden, als die  $\text{CO}_2$ -Konzentration aufgrund der Anwesenheit von mehreren Personen innerhalb von ca. 2 Stunden von 430 ppm auf 800 ppm angestiegen ist. Die Abweichung von -190 ppm entspricht bei einem Referenzwert von 762 ppm einer relativen Abweichung von 25%.

SenseCube: Abbildungen 4.6 und 4.9

Trotz des Ausschlusses von drei SenseCube-Sensoren zeigten auch die verbliebenen beiden Sensoren sehr starke Differenzen zum Referenzsensor. Die Zeitreihen zeigen, dass die Messwerte deutlich nach unten abweichen. Die Mittelwerte  $K_M$  von -90 ppm bzw. -92 ppm bilden die größten Abweichungen innerhalb des Messprogramms

smartGAS: Abbildungen 4.7 und 4.9

Bei den smartGAS-Sensoren zeigt sich insgesamt in der Zeitreihe eine relativ große Streubreite. Dies ist insbesondere auf den Sensor 1 zurückzuführen. Dieser hat die höchste Maximalabweichung nach oben, mit +160 ppm (aufgetreten am 7. Tag). Die Sensoren 2 und 3 zeigen dagegen eine relativ geringe Abweichung des Mittelwertes  $K_M$  von -34 ppm bzw. -27 ppm. Auch die Standardabweichung  $\sigma$  ist mit 11 ppm bzw. 17 ppm noch moderat.

Vaisala: Abbildungen 4.8 und 4.9

Von den beiden vorhandenen Vaisala-Sensoren musste einer aufgrund von unrealistischen Messwerten über die ersten 3 Tage ausgeschlossen werden. Der verbleibende Sensor zeigt ein unauffälliges Zeitverhalten, das leicht oberhalb des Referenzsensors liegt. Der Mittelwert  $K_M = 35$  ppm und die Standardabweichung  $\sigma = 14$  ppm repräsentieren eine enge Orientierung am Referenzsensor. Die relativ hohe Maximalabweichung von 123 ppm ist im Rahmen des Anstieges auf 800 ppm am 13. Tag aufgetaucht und entspricht bei einem Referenzwert von 719 ppm einer Abweichung von 17%.

## **5. Zusammenfassung und Ausblick**

Die Messungen zeigen, dass die Abweichungen vom Referenzsensor teils erheblich sind. Abgesehen von einzelnen Ausfällen, mit Sensoren von signifikant starken Abweichungen vom Referenzsensor, verhielten sich die Sensoren eines Herstellers untereinander relativ ähnlich, im Verhältnis zu jeweils den anderen Herstellern.

Insgesamt schnitten bei diesem Messprogramm über gut 2 Wochen die Sensoren von E+E am besten ab, da der Mittelwert nahe am Referenzsensor lag und die Streubreite relativ gering war. Alle E+E Sensoren liegen mit ihrer Abweichung innerhalb der in Abschnitt 2 definierten Schalttoleranz von  $\pm 100$  ppm gegenüber dem Referenzsensor. Außerdem musste keiner der untersuchten E+E-Sensoren aufgrund von ungeklärtem Verhalten aussortiert werden.

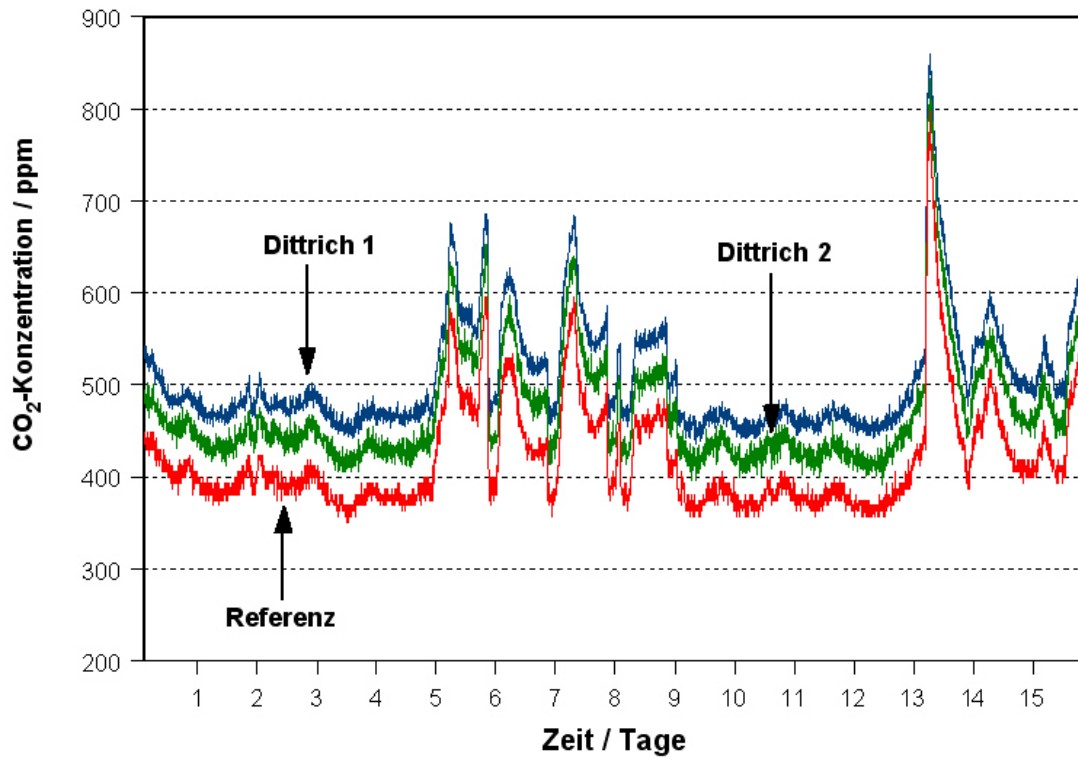
Lässt man einzelne Sensoren der Hersteller GE, SmartGAS und Dittrich unberücksichtigt, erfüllen die restlichen ähnlich gute Übereinstimmung mit dem Referenzsensor, wie diejenigen von E+E.

Die Analyse hat gezeigt, dass die Streubreite der Messwerte von CO<sub>2</sub>-Sensoren sehr groß und zeitabhängig ist. Für die verlässliche Regelung von Lüftungsanlagen ist zumindest eine individuelle Überprüfung der Sensoren notwendig. Hervorzuheben ist, dass selbst über einen relativ kleinen Zeitraum von 2 Wochen das Sensorsignal im Vergleich zu einem Referenzsensor stark variieren kann.

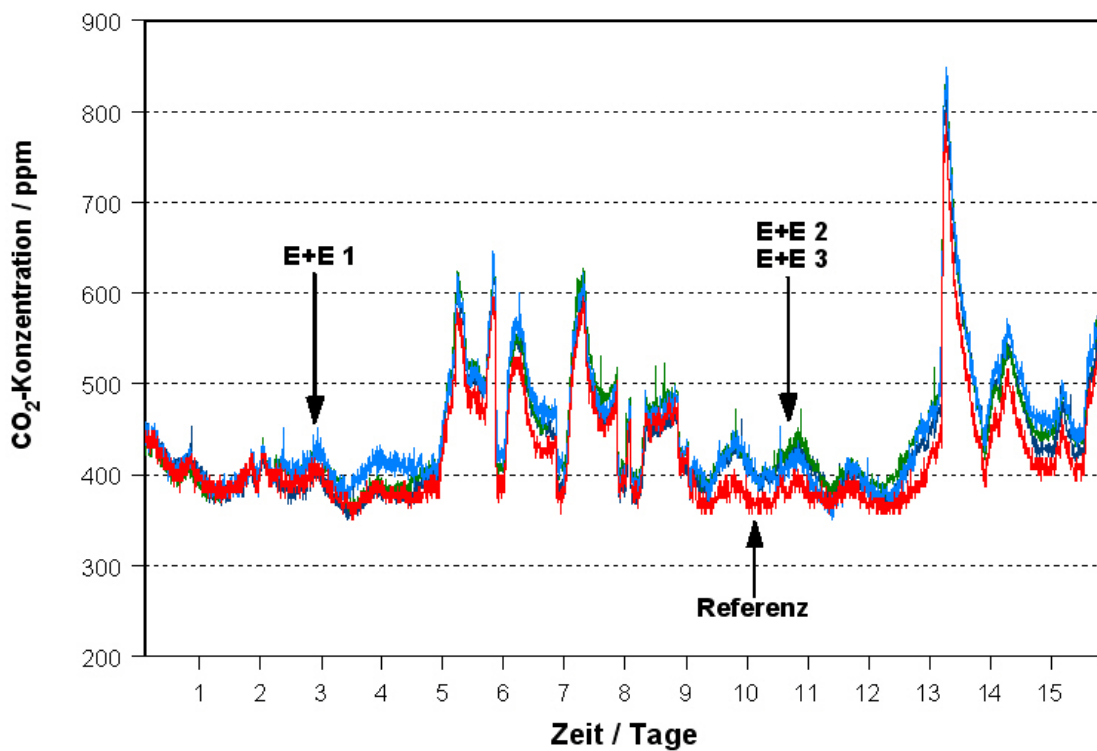
Um belastbare Aussagen über die Langzeitstabilität zu machen, werden die Messungen über möglichst mehrere Jahre weitergeführt. Wir erwarten uns davon u.a. eine Einschätzung, inwieweit eine über mehrere Jahre verlässliche Einstellung der Luftqualität im Rahmen der Vorgaben der Normen DIN EN 15251 und DIN EN 13779 mit diesen Sensoren möglich ist.

## **6. Referenzen**

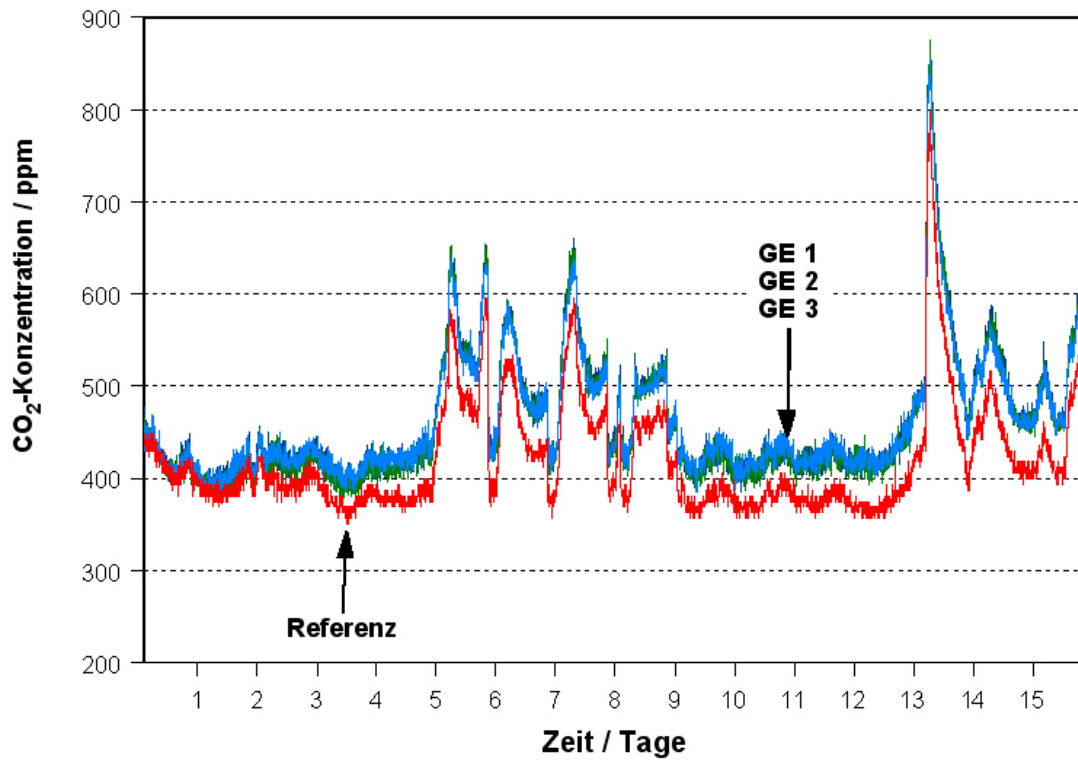
- [1] DIN 1946: *Raumluftechnik, Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung*, Beuth-Verlag (Mai 2009).
- [2] DIN EN 15251: *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, Beuth-Verlag (August 2007).
- [3] DIN EN 13779: *Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme*, Beuth-Verlag (September 2007).
- [4] Referenzsensor (*Sondermodell der Baureihe smartMODUL Flow*) der Firma smartGAS Mikrosensorik GmbH Heilbronn



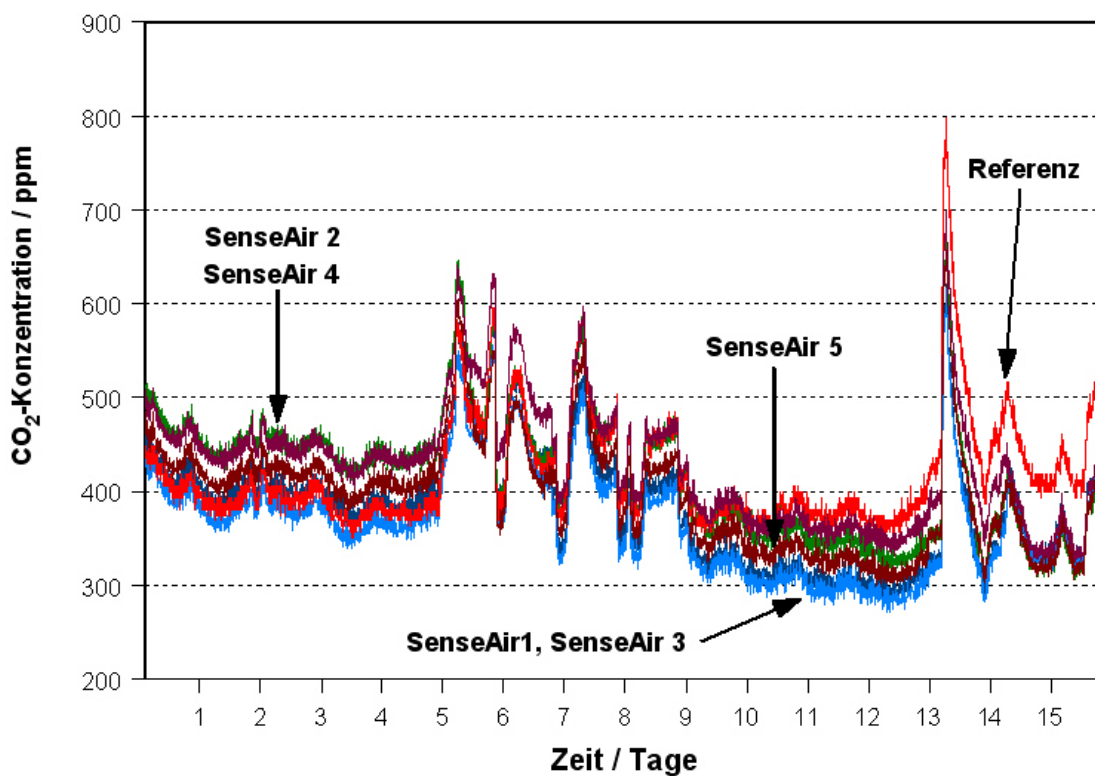
**Abbildung 4.2:** Messwerte der Sensoren von Dittrich im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Bestromung mit Laborluft.



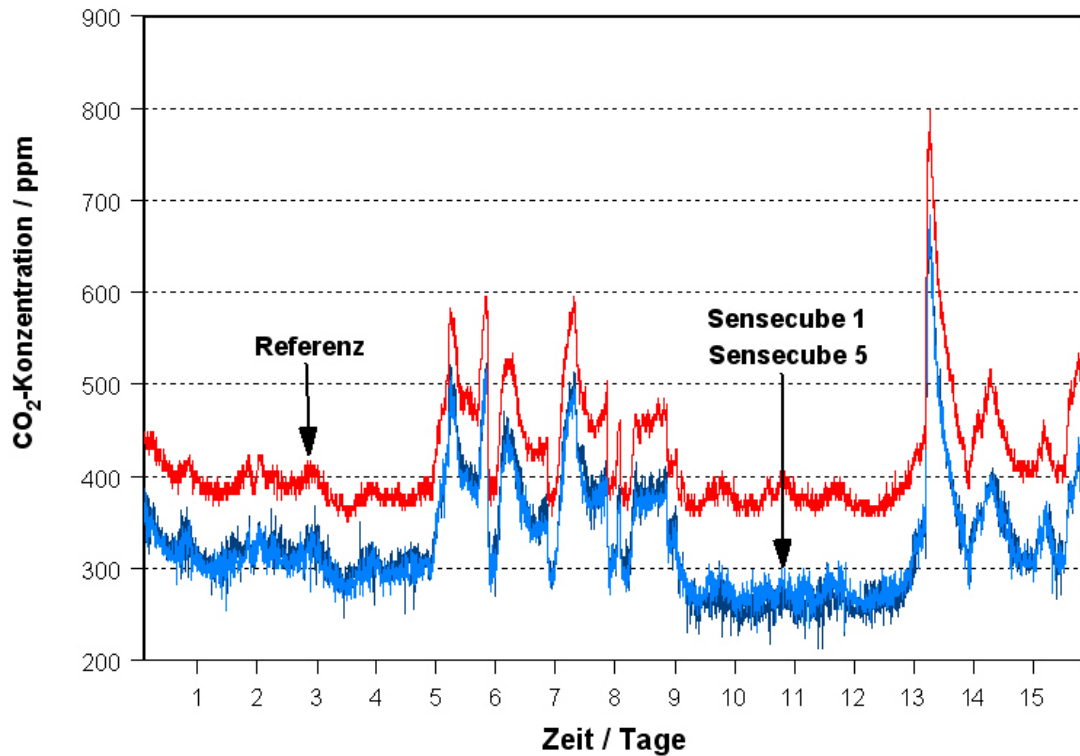
**Abbildung 4.3:** Messwerte der Sensoren von E+E im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Bestromung mit Laborluft.



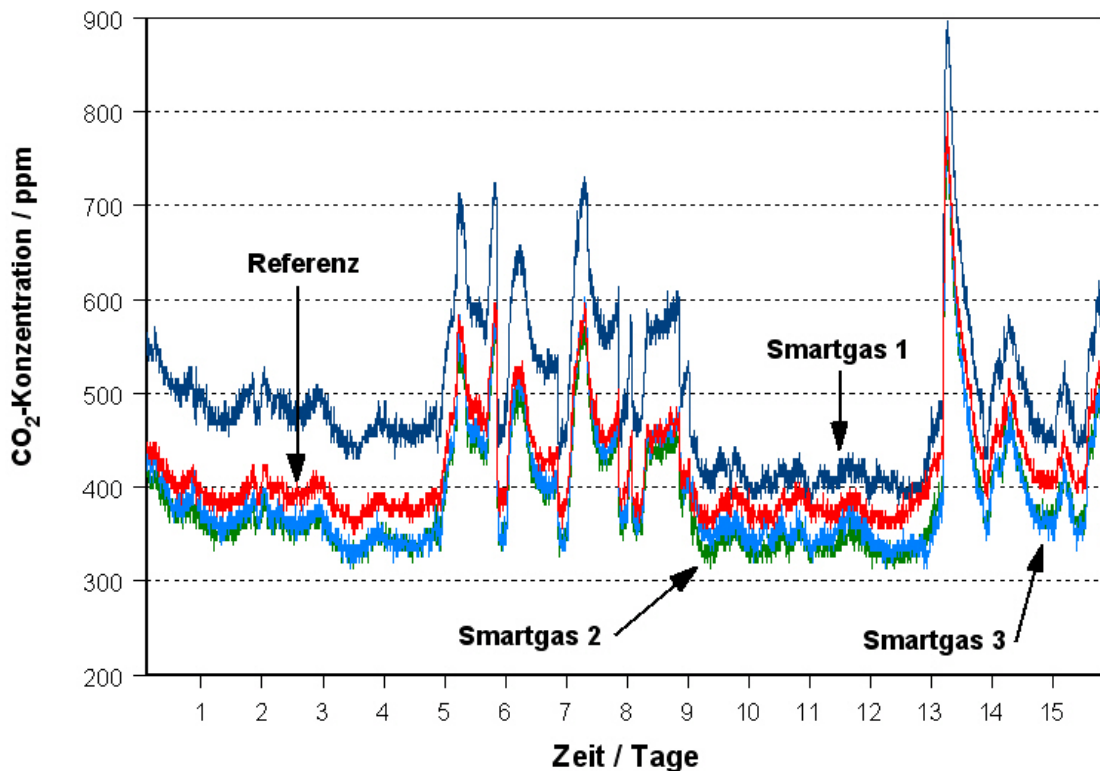
**Abbildung 4.4:** Messwerte der Sensoren von GE im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Bestromung mit Laborluft.



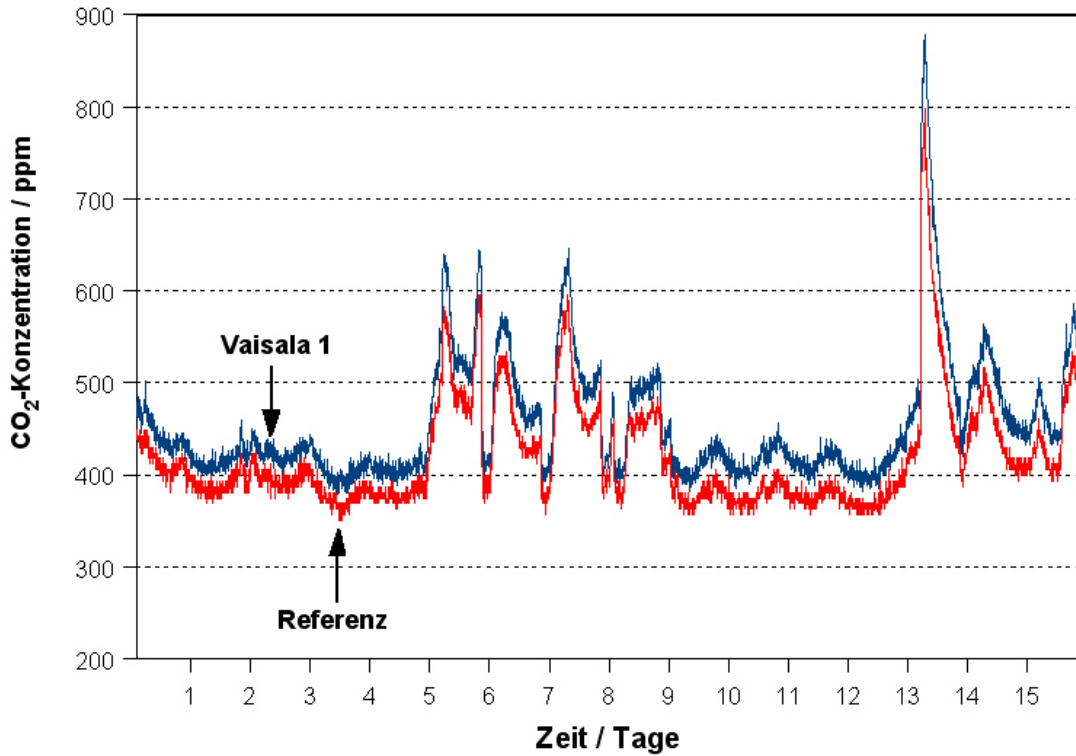
**Abbildung 4.5:** Messwerte der Sensoren von SenseAir im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Bestromung mit Laborluft.



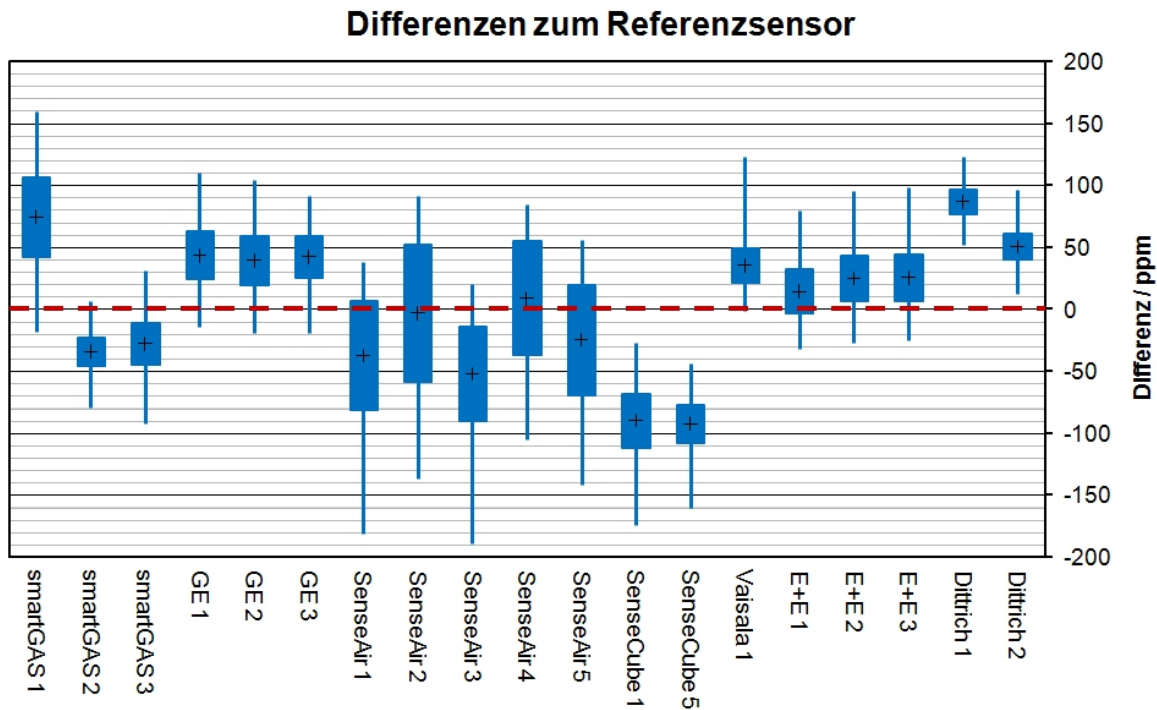
**Abbildung 4.6:** Messwerte der Sensoren von SenseCube im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Bestromung mit Laborluft.



**Abbildung 4.7:** Messwerte der Sensoren von smartGAS im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Bestromung mit Laborluft.



**Abbildung 4.8:** Messwerte des Sensors von Vaisalla im Vergleich zum Referenzsensor während der Periode von 15,8 Tagen bei Beströmung mit Laborluft.



**Abbildung 4.9:** Boxplot für alle Sensoren. Dargestellt ist jeweils die Abweichung des CO<sub>2</sub>-Wertes zum Referenzsensor in ppm. Die Box repräsentiert die Standardabweichung mit dem Kreuz als Mittelwert. Die Balken zeigen den Gesamtbereich der Differenzen zum Referenzsensor.