

TEXTE

77/2023

# Sensoren zur Messung von Luftschadstoffen: Möglichkeiten und Grenzen sowie Hinweise zu deren Einsatz

Broschüre



TEXTE 77/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3718 51 240 0  
FB001105

## **Sensoren zur Messung von Luftschadstoffen: Möglichkeiten und Grenzen sowie Hinweise zu deren Einsatz**

Broschüre

von

Prof. Dr. Christoph Schneider,  
Prof. Dr. Tobias Sauter,  
M. Sc. Janani Venkatraman Jagatha  
Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin  
Unter den Linden 6, 10099 Berlin

Dr.-Ing. Ulrich Vogt,  
M. Sc. Miriam Chacón Mateos  
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik,  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

vertreten durch die,  
Humboldt-Innovation GmbH  
Herrn Volker Hoffmann  
Ziegelstraße 30, 10117 Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

Prof. Dr. Christoph Schneider,  
Prof. Dr. Tobias Sauter,  
M. Sc. Janani Venkatraman Jagatha  
Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin  
Unter den Linden 6  
10099 Berlin

Dr.-Ing. Ulrich Vogt,  
M. Sc. Miriam Chacón Mateos  
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23  
70569 Stuttgart

### Abschlussdatum:

November 2022

### Redaktion:

Fachgebiet II 4.1 – Grundsatzfragen der Luftreinhaltung  
Frank Hoffmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren. Die Erwähnung von oder Verweise auf Produkte oder Dienstleistungen und/oder Links zu Webseiten impliziert keine Billigung oder Verantwortung für die dargestellten Meinungen, Ideen, Daten oder Produkte und garantiert nicht die Gültigkeit der bereitgestellten Informationen.

## **Vorwort**

Viele Bürgerinnen und Bürgern beschäftigen sich in ihrer Freizeit vertieft mit Fragestellungen, denen früher nur Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nachgegangen sind. Es hat sich diesbezüglich in den letzten Jahren eine Bewegung entwickelt, welche unter dem englischen Begriff „Citizen Science“ bekannt wurde. Interessierte Bürgerinnen und Bürger schließen sich dabei in Gruppen und Netzwerken zusammen und arbeiten gemeinsam an wissenschaftlichen Themen. In jüngster Zeit wird zum Beispiel verstärkt mit preiswerten Sensoren zur Messung der Luftqualität gearbeitet, die inzwischen von zahlreichen Herstellern angeboten werden. Sind diese kleinen Messgeräte tatsächlich in der Lage verlässlich die Luftqualität zu messen? Was wissen wir über die Möglichkeiten und Grenzen dieser kleinen, einfachen Messgeräte?

Diese Broschüre beschäftigt sich mit Möglichkeiten zur Messung von Luftverunreinigungen in der Außenluft mit Luftqualitätssensoren (LQS) und soll sowohl interessierten Bürgerinnen und Bürgern als auch der Wissenschaft einen ersten Überblick zu diesem Thema geben.

Die Zukunft von LQS ist vielversprechend, da die Hersteller in kurzen Abständen neue Modelle mit immer fortschrittlicheren Technologien auf den Markt bringen und damit die breite Anwendung vorantreiben. Bei der Nutzung im Rahmen von „Citizen Science“ ist es wichtig, dass die Nutzerinnen und Nutzer von LQS über deren Funktionsweise, die notwendigen Maßnahmen bei der Messung und Interpretation der Daten, die Grenzen der Anwendbarkeit, aber auch über die Möglichkeiten und Potenziale von LQS informiert sind.

In dieser Broschüre werden Antworten auf genau diese Fragestellungen gegeben und den Nutzern und Nutzerinnen von Sensoren sowie an diesem Thema Interessierten Informationen und Untersuchungsergebnisse zum Einsatz von LQS zur Verfügung gestellt. Anwendern und Anwenderinnen wird damit eine Hilfestellung gegeben, um bei der eigenen Messung ein höheres Qualitätsniveau zu erreichen. Weiterhin werden Strategien und Empfehlungen für die Durchführung von Messungen mit LQS in der Außenluft vorgestellt und es werden Anleitungen für die Erhebung, Analyse und Interpretation der Messdaten zur Verfügung gestellt.

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis.....  | 7  |
| Tabellenverzeichnis.....  | 8  |
| Abkürzungsverzeichnis.....  | 9  |
| 1 Einführung.....   | 10 |
| 1.1 Was versteht man unter Luftqualität und warum ist diese von Bedeutung? .....  | 10 |
| 1.2 Luftqualitätsmessnetze: Wie wird die Luftqualität in Deutschland gemessen?.....   | 12 |
| 2 Luftqualitätssensoren.....  | 14 |
| 2.1 Was sind Luftqualitätssensoren?.....  | 14 |
| 2.2 Kosten von Sensoren für die Messung der Luftqualität .....  | 15 |
| 2.3 Messprinzipien für Feinstaub.....   | 16 |
| 2.4 Messprinzipien für gasförmige Luftverunreinigungen.....   | 17 |
| 3 Anwendung und Probleme bei Sensoren.....  | 21 |
| 3.1 Anwendungsbereiche von Sensoren .....   | 21 |
| 3.2 Grenzen und Probleme bei Messungen der Luftqualität mit Sensoren .....  | 23 |
| 3.3 Vorteile und Nachteile von Sensoren gegenüber Referenzmessgeräten .....   | 26 |
| 3.4 Empfehlungen für die Platzierung und den Außeneinsatz von Sensoren und Sensor-<br>Systemen zur Messung der Luftqualität ..... | 27 |
| 3.5 Darstellung und Kommunikation von Messungen mit Luftqualitätssensoren .....   | 30 |
| 4 Qualitätssicherung beim Einsatz von Sensoren zur Messung der Luftqualität.....  | 32 |
| 4.1 Was versteht man unter Kalibrierung?.....   | 32 |
| 4.2 Wie können Messungen mit Sensoren für die Luftqualität qualitätsgesichert<br>durchgeführt werden? .....                       | 33 |
| 4.3 Wie wird die Qualitätssicherung der Referenzmessgeräte durchgeführt? .....  | 38 |
| 4.4 Einsatzmöglichkeiten von Luftqualitätssensoren mit Bezug zu den Datenqualitätszielen...                                       | 39 |
| 4.5 Möglichkeiten zur Verbesserung der Messqualität beim Einsatz von Sensoren .....   | 40 |
| 5 Projekte und Nutzergruppen mit Bezug zu Sensoren zur Messung von Luftqualität .....   | 45 |
| 5.1 Laufende Citizen Science Projekte im Bereich der Luftqualität.....  | 45 |
| 5.2 Wo kann man sich über Sensoren informieren? .....   | 45 |
| 6 Zusammenfassung und Ausblick .....  | 47 |
| Definitionen.....   | 49 |
| Literaturverzeichnis.....   | 51 |
| A Bauanleitung für Trockenstrecken beim Einsatz einfacher Luftqualitätssensoren.....  | 55 |
| B Vorlage für ein Messprotokoll.....  | 60 |
| B.1 Vorlage für ein Messprotokoll – Beispiel 1 .....  | 60 |
| B.2 Vorlage für ein Messprotokoll – Beispiel 2 .....  | 61 |

## Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Visualisierung der Luftqualitätsdaten in der Luftqualitäts-App für die Messstation in Berlin-Wedding und die QR-Codes zum Herunterladen der App auf Android- und iOS-gestützte Smartphones .....  | 13 |
| Abbildung 2:  | LQS-Systeme .....   | 15 |
| Abbildung 3:  | Messung von Feinstaub nach dem Streulicht-Photometrischen Messprinzip ...   | 17 |
| Abbildung 4:  | Schematischer Sensoraufbau eines amperometrischen Gassensors mit drei Elektroden  | 18 |
| Abbildung 5:  | Schematische Ansichten eines Sensors auf der Basis von Metalloxid-Halbleitern   | 18 |
| Abbildung 6:  | Prinzip eines Chemilumineszenz-Gerätes zur Bestimmung von NO bzw. NO + NO <sub>2</sub>  | 19 |
| Abbildung 7:  | Prinzip eines UV-Gerätes zur Bestimmung von O <sub>3</sub> .....  | 20 |
| Abbildung 8:  | PM <sub>10</sub> -Vergleichsmessungen der LQS unter Laborbedingungen .....  | 24 |
| Abbildung 9:  | PM <sub>2,5</sub> -Vergleichsmessungen der Sensoren unter Laborbedingungen .....  | 25 |
| Abbildung 10: | Zeitlicher Verlauf der NO <sub>2</sub> -Konzentration eines Referenzmessgerätes und eines LQS mit Herstellerkalibrierung .....  | 26 |
| Abbildung 11: | Messeinlass für PM-LQS .....  | 29 |
| Abbildung 12: | Gassensoren, eingebaut in einen Sensorblock .....   | 29 |
| Abbildung 13: | Wetterfestes Sintermetallgitter-Gehäuse für Temperatur-/Feuchtesensoren auf SHT-30-Basis der Firma Sensirion .....  | 30 |
| Abbildung 14: | Grundkalibrierung eines NO <sub>2</sub> -Sensors .....  | 33 |
| Abbildung 15: | Zeitlicher Verlauf der PM <sub>2,5</sub> -Konzentrationen an drei verkehrsreichen Messstandorten: an einem Sensor- und zwei Referenz-Messstandorten .....   | 34 |
| Abbildung 16: | Zeitlicher Verlauf der PM <sub>10</sub> -Konzentrationen mit drei PM-LQS an einem Messstandort in der Hauptstätter Str. und der PM <sub>10</sub> -Konzentration an der Referenz-Messstation Stuttgart Am Neckartor .....  | 35 |
| Abbildung 17: | Anpassung der Sensordaten an das Referenzmessgerät .....  | 35 |
| Abbildung 18: | Darstellung des zeitlichen Verlaufs der NO <sub>2</sub> -Konzentration eines Sensors mit Herstellerkalibrierung im Vergleich zum Referenzmessgerät und korrigierten Sensordaten auf Basis einer multilinenen Regressionsanalyse sowie Temperatur und Luftfeuchtigkeit ..... | 36 |
| Abbildung 19: | Lineare Regression der NO <sub>2</sub> -Konzentrationen der Sensordaten bei unterschiedlichen Kalibrierungen gegenüber einem Referenz-Datensatz .....   | 37 |
| Abbildung 20: | Beispiel eine Expositions-kammern für LQS .....   | 38 |

## Tabellenverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Luftqualitätsstandards der EU, Richtwerte der WHO, Quellen der Schadstoffe<br>und jeweilige gesundheitliche Auswirkungen für PM, NO <sub>2</sub> und O <sub>3</sub> ..... | 11 |
| Tabelle 2: | Klassifizierung von LQS-Systemen auf Grundlage des Anschaffungspreises.....   | 15 |
| Tabelle 3: | Datenqualitätsziele (DQO) zur Luftqualitätsbeurteilung.....   | 40 |
| Tabelle 4: | Mögliche Verbesserungsmethoden für Daten von Messungen mit LQS .....  | 41 |
| Tabelle 5: | Information über Sensornetzwerke für Messungen der Außenluftqualität .....  | 45 |
| Tabelle 6: | Definition von häufig gebrauchten Begriffen zur Beschreibung von<br>Luftqualitätsmessgeräten.....   | 49 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                   |   |
|-------------------|---|
| 39. BImSchV       | Neununddreißigste Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz  |
| ABS               | Acrylnitril-Butadien-Styrol   |
| ANN               | Künstliches Neuronales Netz (engl.: Artificial Neural Network)  |
| BImSchG           | Bundes-Immissionsschutzgesetz   |
| DQO               | Datenqualitätsziele für die Luftqualitätsbeurteilung (engl.: Data Quality Objective)  |
| LQS               | Luftqualitätssensoren   |
| EPA               | Environmental Protection Agency   |
| Fa.               | Firma   |
| JRC               | Joint Research Center   |
| k. A.             | Keine Angabe  |
| LCS               | Luftqualitätssensoren (engl.: low cost sensors)   |
| LUBW              | Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg  |
| NO <sub>x</sub>   | Stickstoffoxide (engl.: nitrogen oxides)  |
| NO <sub>2</sub>   | Stickstoffdioxid (engl.: nitrogen dioxide)  |
| NO                | Stickstoffmonoxid (engl.: nitrogen monoxide)  |
| OPC               | Optische Partikelzähler (engl.: Optical Particle Counter)   |
| O <sub>3</sub>    | Ozon (engl.: ozone)   |
| PM                | Feinstaub (engl.: particulate matter)   |
| PM <sub>10</sub>  | Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometer einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist  |
| PM <sub>2,5</sub> | Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 Mikrometer einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist |
| Präd              | Prädiktor   |
| ppb               | parts per billion, also „Teile pro Milliarde“   |
| R <sup>2</sup>    | Bestimmtheitsmaß  |
| RH                | Relative Luftfeuchtigkeit (engl.: Relative Humidity)  |
| RF                | Random Forest   |
| T                 | Temperatur (Umgebungstemperatur)  |
| UBA               | Umweltbundesamt   |
| UDO               | Umwelt-Daten und -Karten Online   |
| UV                | Ultraviolett  |
| VDI               | Verein Deutscher Ingenieure e. V.   |
| VOC               | Flüchtige organischen Verbindungen (engl.: volatile organic compounds)  |
| WHO               | Weltgesundheitsorganisation (engl.: World Health Organization)  |
| WMO               | Weltorganisation für Meteorologie (engl.: World Meteorological Organization)  |

# 1 Einführung

## 1.1 Was versteht man unter Luftqualität und warum ist diese von Bedeutung?

Luftqualität bezeichnet den Grad, zu dem die Luft mit festen, flüssigen oder gasförmigen Beimengungen vermischt ist, welche in reiner Luft nicht vorkommen und welche für Menschen, Tiere oder Pflanzen eine schädliche Wirkung haben können. Saubere Luft ist grundlegend für gesundes menschliches Leben (United Nations Environment Programme 2017).

Die Luft kann durch eine Vielzahl von Komponenten verunreinigt werden. In der Außenluft sind vor allem Feinstaub (PM), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Ozon (O<sub>3</sub>) als Luftverunreinigungen von Bedeutung, da es in der jüngeren Vergangenheit besonders bei diesen Komponenten teilweise zu massiven Überschreitungen von Luftqualitätsstandards kam. Die Abkürzung PM für Feinstaub leitet sich vom englischen Begriff „Particulate Matter“ ab und steht für die Masse von Aerosolen in der Luft. Aerosole liegen in Form fester Partikel und/oder flüssiger Tröpfchen verschiedenster Herkunft und chemischer Zusammensetzung als Suspension in der Luft vor. Üblicherweise findet eine Unterscheidung in die Partikelgrößen PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> statt. Dabei handelt es sich vereinfacht um Partikel mit einem Durchmesser von kleiner als 10 µm (PM<sub>10</sub>) bzw. 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>)<sup>1</sup>.

Allgemein betreffen die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen den Atemtrakt, das Herz-Kreislauf-System, Stoffwechselerkrankungen und die kindliche Entwicklung (Schulz et al. 2019). Schadstoffe wie PM und NO<sub>2</sub> verursachen vor allem Atemwegs- und Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems des Menschen (Hemmingsen et al. 2015; Mehta et al. 2013; Münzel et al. 2018). Eine höhere Ozonbelastung in der warmen Jahreszeit ist bei einem Anstieg des Mittelwertes der Ozonkonzentration um 10 µg/m<sup>3</sup> für eine Erhöhung der Sterberate aufgrund von Atemwegserkrankungen um 1,13 % verantwortlich (Gryparis et al. 2004).

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat im September 2021 ihre Luftqualitätsleitlinien verschärft und sich für niedrigere Konzentrationen in der Außenluft, u. a. für Stickstoffdioxid und Feinstaub, ausgesprochen. Die WHO wertete hierfür eine große Anzahl aktueller wissenschaftlicher Veröffentlichungen und Erkenntnisse aus und stellt den Schutz der menschlichen Gesundheit in den Fokus ihrer Empfehlungen (WHO 2021). Die Europäische Union, welche die rechtlich geltenden Luftqualitätsstandards in Form verbindlicher Grenzwerte oder als Zielwerte für maximal zulässige Konzentrationen in der Außenluft festlegt, orientiert sich bei der Festlegung dieser Luftqualitätsstandards u. a. an den Luftqualitätsleitlinien der WHO. Momentan überarbeitet die EU-Kommission im Rahmen des Europäischen Green Deals die aktuellen Luftqualitätsstandards, um sie voraussichtlich stärker an die Empfehlungen der WHO anzupassen (European Commission 2019).

Die aktuellen europäischen Grenz- und Zielwerte wurden mit der 39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (39. BImSchV) in deutsches Recht übernommen. Die Luftqualitätsstandards, die Quellen und die jeweiligen gesundheitlichen Auswirkungen für die wichtigsten Luftverunreinigungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

---

<sup>1</sup> Exakte Definition: Partikel, die einen gröÙenselektierenden Lufteinlass eines Messgerätes passieren, der für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm (PM<sub>10</sub>) bzw. 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist.

**Tabelle 1: Luftqualitätsstandards der EU, Richtwerte der WHO, Quellen der Schadstoffe und jeweilige gesundheitliche Auswirkungen für PM, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>**

| Schadstoff        | Zeitraum                                      | EU-Luftqualitätsstandard  | WHO-Empfehlung   | Emissionsquellen   | Gesundheitliche Auswirkung   |
|-------------------|---|---|--|--|--|
| PM <sub>10</sub>  | Tagesmittelwert                               | 50 µg/m <sup>3</sup> dürfen nicht öfter als 35 Tage im Kalenderjahr überschritten werden                            | 45 µg/m <sup>3</sup> sollen nicht öfter als 3-4 Tage im Jahr überschritten werden  | Straßenverkehr, Industrie, Baustellen, Bergbau, Steinbrüche, Raffinerien und chemische Industrie, Gebäudeheizung                           | V. a. akute und chronische Gesundheitsprobleme der Atemwege und des Herz-Kreislauf-Systems   |
|                   | Jahresmittelwert                              | 40 µg/m <sup>3</sup>  | 15 µg/m <sup>3</sup>   |  |  |
| PM <sub>2,5</sub> | Tagesmittelwert                               | n. e. <sup>1</sup>  | 15 µg/m <sup>3</sup> sollen nicht öfter als 3-4 Tage im Jahr überschritten werden  | Feinstaub bildet sich zudem in der Atmosphäre aus gasförmigen Vorläufersubstanzen  |  |
|                   | Jahresmittelwert                              | 25 µg/m <sup>3</sup>  | 5 µg/m <sup>3</sup>  |  |  |
| NO <sub>2</sub>   | 1-Stundenmittelwert                           | 200 µg/m <sup>3</sup> dürfen nicht öfter als 18 Stunden im Kalenderjahr überschritten werden                        | n. e.  | Verbrennungsprozesse (Heizung, Stromerzeugung, Motoren in Fahrzeugen und Schiffen)   | V. a. Asthma, bronchiale Symptome und verminderte Lungenfunktion                             |
|                   | Tagesmittelwert                               | n. e.   | 25 µg/m <sup>3</sup> sollen nicht öfter als 3-4 Tage im Jahr überschritten werden  |  |  |
|                   | Jahresmittelwert                              | 40 µg/m <sup>3</sup>  | 10 µg/m <sup>3</sup>   |  |  |
| O <sub>3</sub>    | 8-Stunden Tageshöchstwert                     | 120 µg/m <sup>3</sup> dürfen nicht öfter als 25 Tage pro Kalenderjahr, gemittelt über 3 Jahre, überschritten werden | 100 µg/m <sup>3</sup> sollen nicht öfter als 3-4 Tage im Jahr überschritten werden | entsteht als Reaktionsprodukt zwischen NO <sub>x</sub> aus Fahrzeug- und Industrieemissionen und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) | Verminderte Lungenfunktion, entzündliche Reaktionen in den Atemwegen und Atemwegsbeschwerden |
|                   | 8-Stunden-Mittelwert, Hochsaison <sup>2</sup> | n. e.   | 60 µg/m <sup>3</sup>   |  |  |

<sup>1</sup>n. e.: nicht existent

<sup>2</sup>Die Hochsaison ist definiert als Durchschnitt der maximalen 8-Stunden-Mittelwerte der O<sub>3</sub>-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit dem höchsten laufenden Sechsmonatsmittelwert der O<sub>3</sub>-Konzentration

## 1.2 Luftqualitätsmessnetze: Wie wird die Luftqualität in Deutschland gemessen?

Die Überwachung der Luftqualität ist in Deutschland durch die 39. BImSchV nach deutschem Recht geregelt (Bundesministerium für Justiz, Deutschland 2010), welche inhaltlich auf der EU-Richtlinie 2008/50/EG beruht. Die EU legt in dieser Richtlinie u. a. die Luftqualitätsstandards als Grenz- oder Richtwerte für die Außenluftkonzentrationen fest. Die Mitgliedsstaaten müssen diese Werte als Mindeststandards in nationales Recht übernehmen, dürfen diese aber auf eigenen Wunsch auch strenger auslegen. Die Messnetze der Bundesländer überwachen die Luftqualität in großem Umfang. Das Umweltbundesamt (UBA) betreibt darüber hinaus Hintergrundmessstationen, die Schadstoffkonzentrationen großräumig verteilter Luftverunreinigungen im ländlichen Raum messen. Die Daten aus den Messnetzen der Länder und des UBA bilden die Grundlage für die Dokumentation der Luftqualität in Deutschland und die Berichterstattung an die Europäische Kommission.

Die uns umgebende Luft hat einen starken Einfluss auf unsere Gesundheit und Lebensqualität. Die Luftqualität an verschiedenen Orten unterliegt einer enormen Variabilität in der Schadstoffkonzentration, abhängig von der Quelle und Menge der Emissionen und der Wettersituation. Um unsere Umwelt zu charakterisieren, ist es wichtig, die Luftschadstoffe mit schnellen, zuverlässigen Messungen zu quantifizieren. Dies wird durch eine Reihe verschiedener Referenzmessgeräte ermöglicht.

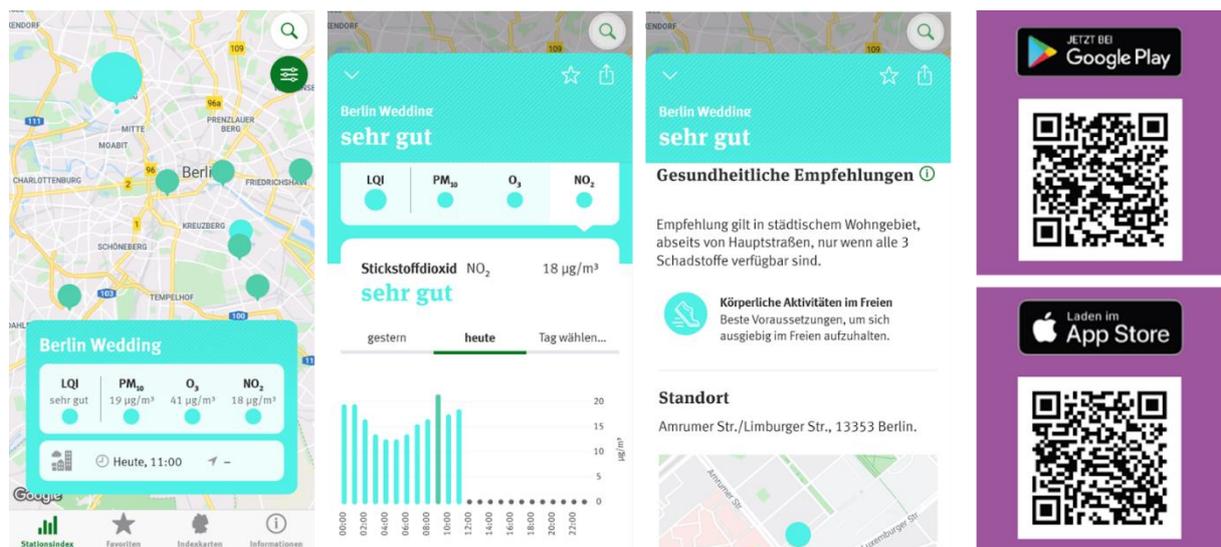
### **INFOKASTEN: Referenzmethoden und Referenzmessgeräte**

In der 39. BImSchV sind in Anlage 6 Referenzmethoden für die Messung der verschiedenen Luftschadstoffe festgelegt. Referenzmessgeräte messen mit diesen Methoden. Daneben kommen an den Luftmessstationen auch Geräte zum Einsatz, bei denen in einem aufwendigen Prüfverfahren der Nachweis der Gleichwertigkeit zu den Referenzmessgeräten erbracht wurde.

Das UBA ist die zentrale Umweltbehörde in Deutschland. Zudem verfügt jedes Bundesland in Deutschland über eine eigene Behörde, die für die Überwachung der Luftqualität verantwortlich ist und die ein eigenes Luftmessnetz gemäß der 39. BImSchV an verschiedenen Standorten betreibt. Demnach ist mindestens an den Orten, an denen die Grenzwerte für die Schadstoffbelastung überschritten werden und an denen sich Bürgerinnen und Bürgern aufhalten können, eine ortsfeste Messstation zur Überwachung der Schadstoffbelastung vorgeschrieben. Darüber hinaus sind ortsfeste Messstationen in ländlichen Gebieten abseits signifikanter Verschmutzungsquellen erforderlich, um ein Mindestmaß an Informationen über den Transport von Luftverunreinigungen und die generelle chemische Zusammensetzung von Feinstaub zu erhalten. Die ortsfesten Messstationen enthalten oft Messgeräte, die alle oder einige der Luftverunreinigungen wie PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub> und meteorologische Parameter wie Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (RH), Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag, Globalstrahlung usw. messen. Die Hauptfunktion dieser punktuellen Überwachungsnetze besteht darin, einen allgemeinen und repräsentativen Überblick über die Luftqualität an diesen spezifischen Standorten zu erhalten.

Die Echtzeit-Luftqualitätsdaten an über 500 Luftmessstationen<sup>2</sup> in ganz Deutschland können über die Website des UBA ([Aktuelle Luftdaten<sup>3</sup>](#)) oder über die App *Luftqualität* ([App Luftqualität | Umweltbundesamt<sup>4</sup>](#)) bezogen werden. Abbildung 1 zeigt die Visualisierung der Luftqualitätsdaten in der Luftqualitäts-App für die Messstation in Berlin-Wedding und die QR-Codes zum Herunterladen der App auf Android- und iOS-gestützte Smartphones. Die Luftqualitäts-App ermöglicht die Visualisierung der Daten. Sie unterstützt keine Datenübertragung bzw. ermöglicht keinen Download von Daten, dies ist nur über die Website des UBA möglich.

**Abbildung 1: Visualisierung der Luftqualitätsdaten in der Luftqualitäts-App für die Messstation in Berlin-Wedding und die QR-Codes zum Herunterladen der App auf Android- und iOS-gestützte Smartphones**



Quelle: Eigene Bilder

### INFOKASTEN: Anforderungen an Messstationen der amtlichen Messnetze

Die Anforderungen an die Lage, die Anzahl der Messstationen des Messnetzes, die Messmethoden, die Grenz- und Richtwerte sowie die Datenqualitätsanforderungen werden durch die 39. BImSchV nach deutschem Recht geregelt.

<sup>2</sup>Es wird allerdings an diesen Luftmessstationen nicht immer das ganze Spektrum an Luftschadstoffen gemessen. Daher kann die Anzahl der Stationen, an denen ein spezieller Luftschadstoff gemessen wird, auch geringer sein.

<sup>3</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten/>

<sup>4</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftqualitaet/app-luftqualitaet>

## 2 Luftqualitätssensoren

### 2.1 Was sind Luftqualitätssensoren?

Aufgrund der Fortschritte in der Mikroelektronik begann der Begriff „Sensor“ seit den siebziger Jahren des 20. Jahrhundert sich im großen Ausmaß zu verbreiten. Die Sensoren sind „künstlichen Sinnesorganen“ nachempfunden (Gründler 2012) und sie gehören zur heutigen modernen Welt wie das Handy und die Digitalisierung.

Luftqualitätssensoren (LQS, aufgrund ihrer geringen Anschaffungskosten im Englischen auch als „low-cost sensors“, LCS, bezeichnet) sind Sensoren, die aufgrund der Fortschritte in der Mikrosensortechnologie kostengünstig hergestellt werden können, aber mittlerweile eine so große Empfindlichkeit und Selektivität gegenüber den Messgrößen an den Tag legen, dass sie auch für die Detektion von schädlichen Luftverunreinigungen in der Außenluft zum Einsatz kommen können. Im Gegensatz zu den Referenzmessgeräten sind die LQS sehr einfach aufgebaut, was zu deutlich geringeren Kosten führt und daher die Massenproduktion solcher Geräte ermöglicht.

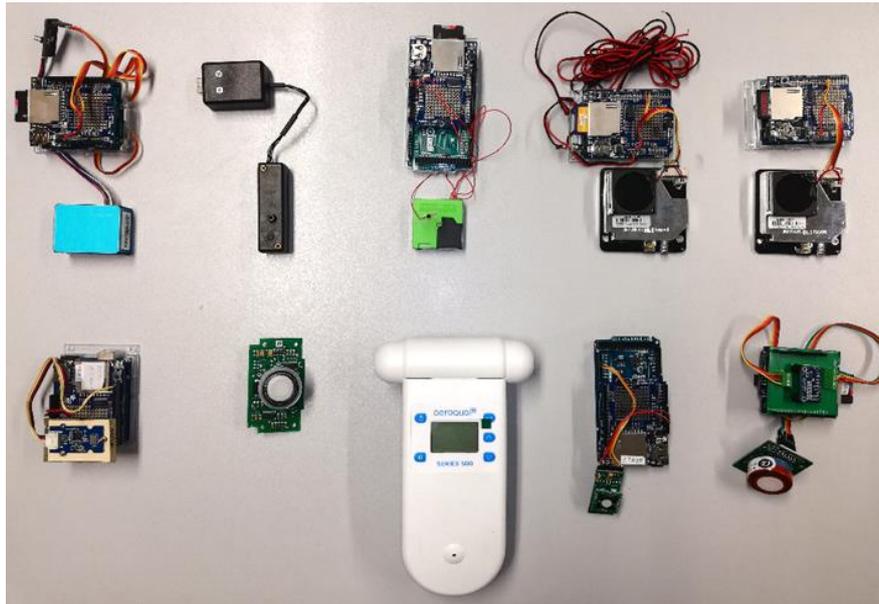
LQS bestehen in der Regel

- ▶ aus einer Messzelle oder allgemein aus einem Rezeptor, in der oder an dem der eigentliche Messvorgang stattfindet,
- ▶ einem Wandler, der die chemische Information in ein elektrisches Signal umwandelt (Transduktor) und
- ▶ einem Signalprozessor.

Weitere Bestandteile, wie Daten-Logger zur Speicherung der Messdaten, eine Kommunikationseinheit zur Übertragung und späteren Speicherung der Daten auf einem Server und eine Stromversorgung, gehören zu der so genannten Technik-Peripherie. Ein LQS in Kombination mit der dazugehörigen Technik-Peripherie wird oft als LQS-System bezeichnet. Diese Systeme können für weniger als 10 % der Kosten eines Referenzmessgerätes erworben werden.

In Abbildung 2 ist eine kleine Auswahl von auf dem Markt erhältlichen LQS-Systemen abgebildet.

**Abbildung 2: LQS-Systeme**



Von links nach rechts, obere Reihe (Feinstaubsensoren): PMS 5003 (Plantower), OPC-R1 (Alphasense), SPS30 (Sensirion), SDS011 (Nova Fitness), SDS198 (Nova Fitness); untere Reihe (NO<sub>2</sub>-Sensoren): MICS-6814 (SGX Sensortech), NO<sub>2</sub>/C-1 (Membrapor), Series 500 SH ENW1 (Aeroqual), DGS-NO<sub>2</sub> 968-043 (SPEC Sensors) und B43F (Alphasense)  
Quelle: Eigene Abbildung

## 2.2 Kosten von Sensoren für die Messung der Luftqualität

Die Sensoreinheit selbst, die für die Messung einer Luftverunreinigung benötigt wird, kann kostengünstig sein. Für aussagekräftige Messungen benötigt man jedoch ein komplettes Sensorsystem mit Gehäuse, Datenerfassung und Datenspeichereinheit bzw. Datenübertragung. Je nach Komplexität dieser einzelnen Teilsysteme und dem dabei entstehenden Aufwand können die Gesamtkosten sehr unterschiedlich sein.

Solche LQS-Systeme können als eigenständige Messgeräte verwendet werden und ihr Preis kann je nach Anzahl der LQS (d. h. der gemessenen Substanzen), welche im Sensorsystem verbaut sind, der Qualität der Elektronik und des Gehäuses, sowie erweiterter Dienste (z. B. Web-Visualisierung, Datenaufbereitung, Benutzerunterstützung) stark variieren. Tabelle 2 klassifiziert LQS-Systeme auf der Grundlage des Anschaffungspreises. Obwohl alle Geräte auf dem Markt zu deutlich niedrigeren Preisen im Vergleich zu Referenzmessgeräten, die in amtlichen Messstationen verbaut sind, verkauft werden, gibt es eine große Preisspanne innerhalb gängiger LQS-Systeme (Lukeville 2019).

**Tabelle 2: Klassifizierung von LQS-Systemen auf Grundlage des Anschaffungspreises**

| Preisklasse | Preisspanne (EUR) |
|-------------|-------------------|
| Niedrig     | < 500             |
| Mittel      | 500 – 2.000       |
| Hoch        | 2.000 – 5.000     |
| Sehr hoch   | > 5.000           |

Quelle: (Lukeville 2019)

## 2.3 Messprinzipien für Feinstaub

Gravimetrische Staubmessung,  $\beta$ -Absorption und optische Messmethoden wie die Streulicht-Photometrie (Nephelometrie) und die Streulicht-Spektrometrie sind die gebräuchlichsten Methoden, die zur Bestimmung der Konzentration von PM in der Außenluft verwendet werden. Darüber hinaus kommen noch sehr viele weitere Partikelmessmethoden zum Einsatz. Die Gravimetrie ist die Referenzmethode für Geräte, die bei behördlichen Messungen zum Einsatz kommen. Kommt in einem eignungsgeprüften Messgerät die Gravimetrie nicht direkt zum Einsatz, sondern eine andere Messmethode, dann muss die verwendete Messmethode durch regelmäßigen Vergleich und Abgleich mit der Gravimetrie auf diese zurückgeführt werden.

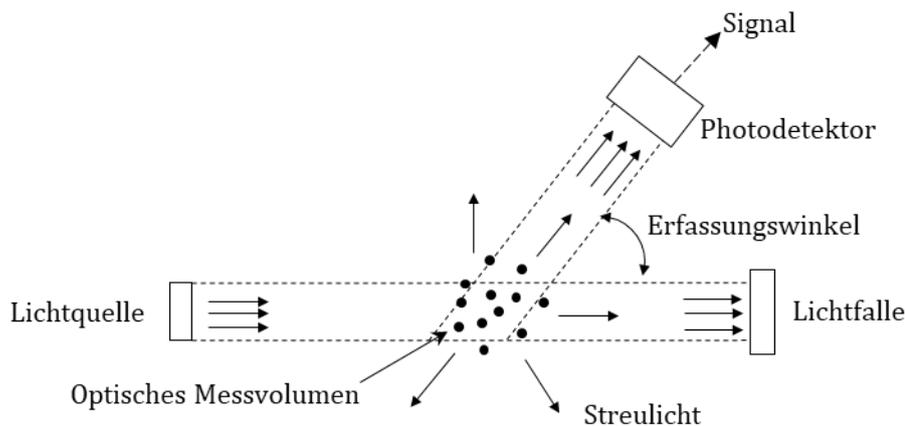
Zwei Typen von Messinstrumenten, Nephelometer und optischer Partikelzähler, kommen bei LQS aufgrund ihrer schnellen Reaktionszeit und ihres geringen Energiebedarfs zur Anwendung. Sie verwenden eine Lichtquelle mit geringer Leistung wie eine LED oder einen Laser, wobei das von den Partikeln gestreute Licht von einem Detektor gemessen wird.

**Nephelometer:** Nephelometer arbeiten nach der Methode der Streulicht-Photometrie. Bei der Streulicht-Photometrie (Abbildung 3) passieren die Partikel einen Laserstrahl und erzeugen ein Streulicht in unterschiedliche Richtungen. Je mehr Partikel sich im Messvolumen befinden, desto mehr Streulicht wird erzeugt und erfasst.

**Optische Partikelzähler** (engl.: Optical Particle Counter (OPC)): Bei OPC wird ebenfalls das Streulicht gemessen. Allerdings nicht als Summensignal wie beim Nephelometer, sondern als Streulicht eines jeden einzelnen Partikels, das als Lichtimpuls erfasst wird. Je stärker der Lichtimpuls, desto größer das Partikel (Alfano et al. 2020; Baumbach 1996; Grimm Aerosol Technik GmbH). Somit lässt sich bei OPC sowohl die Anzahl der Partikel in einem Messvolumen bestimmen, also die sogenannte Anzahlkonzentration, als auch die Verteilung der Anzahl der Partikel auf eine größere Anzahl von (Partikel-)Größenkanälen. OPC liefern also sehr viel mehr Informationen als Photometer. Gebräuchlich sind auch die Bezeichnungen Streulicht-Spektrometer und Aerosol-Spektrometer. Diese Begriffe und der Begriff Optischer Partikelzähler können synonym verwendet werden.

PM-LQS, welche auf dem Messprinzip eines OPC basieren, können grundsätzlich zwischen Partikel unterschiedlicher Größe unterscheiden. Je größer der Größenbereich in dem ein Sensor messen kann und je mehr Messkanäle zur Verfügung stehen, desto präziser und zuverlässiger sind die Messergebnisse.

### Abbildung 3: Messung von Feinstaub nach dem Streulicht-Photometrischen Messprinzip



Quelle: Eigene Darstellung nach DIN 32899-1:2014

#### INFOKASTEN: Gravimetrische Staubmessung

Die gravimetrische Messung ist die Referenzmethode für Messungen von Feinstaub entsprechend der EU-Richtlinie 2008/50/EG. Bei diesem Standardmessverfahren wird die Luft durch einen zuvor konditionierten, bei 45 – 50 % relative Feuchte und  $20 \pm 1$  °C gewogenen Filter geleitet, wobei sich der im Luftvolumen enthaltene Staub auf dem Filter ablagert. Nach Abschluss der Messung wird der Filter wieder konditioniert und gewogen. Die Masse des auf dem Filter abgelagerten Staubs dividiert durch das Luftvolumen, welches über das Filter geführt wurde, ergibt die durchschnittliche Staubkonzentration der Luft. Bei dieser Methode handelt es sich um eine manuelle und diskontinuierliche Methode. Sie wird ebenfalls bei Abnahmeprüfungen zur Kalibrierung von automatischen Partikelmesssystemen und zur Entnahme von Partikelproben, deren chemische Zusammensetzung später bestimmt werden soll, eingesetzt (Baumbach 1996).

Die gravimetrische Staubmessung kann sowohl für Emissions- (z. B. Messungen an Feuerungsanlagen) als auch für Immissionsmessungen (Messungen in der Außenluft) eingesetzt werden. Bei Immissionsmessungen ist im Vergleich zu Emissionsmessungen meist eine längere Zeitspanne erforderlich, bis sich eine ausreichend große Staubmenge auf der Filteroberfläche angesammelt hat, so dass diese mit Hilfe einer sehr genauen Waage messbar ist. In der Regel beträgt die Sammelzeit bei Immissionsmessungen 24 Stunden. Bei sehr niedrigen Konzentrationen in der Außenluft muss die Sammelzeit u. U. auf 48 oder 72 Stunden erhöht werden (VDI 2066 Blatt 1, 2021).

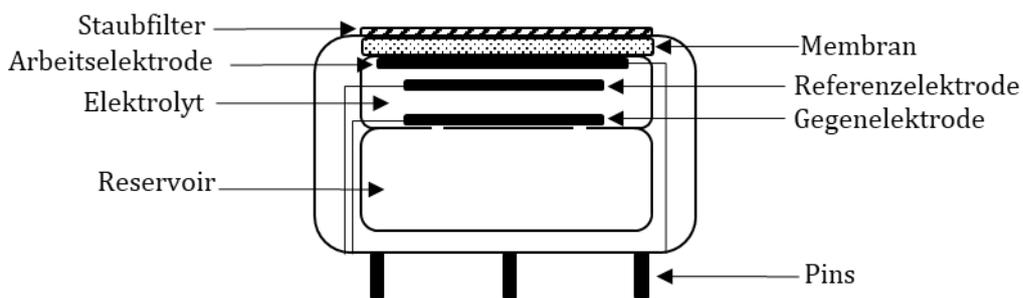
Die in den offiziellen Messnetzen der Landesumweltämter verwendeten Geräte arbeiten entweder nach dem gravimetrischen Prinzip oder werden durch regelmäßig durchzuführende Vergleichsmessungen mit dem gravimetrischen Prinzip auf dieses bezogen. Diese Geräte sind in der Regel sperrig, müssen klimatisiert werden und sind teuer in Anschaffung, Betrieb und Wartung.

## 2.4 Messprinzipien für gasförmige Luftverunreinigungen

Die Messprinzipien der LQS für gasförmige Verunreinigungen wie  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  und  $\text{O}_3$  basieren vor allem auf elektrochemischen Methoden oder der Verwendung von Metalloxid-Halbleitern.

**Elektrochemisches Messprinzip:** Elektrochemische LQS besitzen mindestens eine Arbeitselektrode und eine Gegenelektrode, die wie in Abbildung 4 gezeigt, in ein elektrisch leitendes Medium (Elektrolyt) eingetaucht sind. Bei den Elektrolytlösungen handelt es sich in der Regel um Mineralsäuren oder organische Lösungsmittel mit einem Salzzusatz (Baron and Saffell 2017). Wenn das zu messende Gas mit der Sensoroberfläche in Kontakt kommt, diffundieren die Moleküle durch eine poröse Membran. Dahinter ist die Arbeitselektrode, gewöhnlich ein kleiner Platinkörper, angeordnet. Dort wird eine chemische Reaktion ausgelöst und es findet ein Elektronentransfer zwischen Arbeits- und Gegenelektrode statt. Der dabei erzeugte elektrische Strom ist ein Maß für die Konzentration des zu messenden Schadstoffes im Messgas. LQS enthalten normalerweise eine dritte Elektrode, die sogenannte Referenzelektrode, teilweise auch eine vierte zur rechnerischen Messwertkorrektur. Die Referenzelektrode ist denselben Einflüssen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Druck) ausgesetzt wie die Arbeits- und Hilfselektroden, jedoch nicht dem Messgas. Durch die Differenzbildung zwischen Arbeits- und Referenzelektrode kann die Qualität der Messdaten und die Lebensdauer des Sensors erhöht werden (Gründler 2012). LQS für Gase sind in der Regel amperometrisch, d. h. an die Arbeitselektrode wird ein festes Potential angelegt (Thompson 2016).

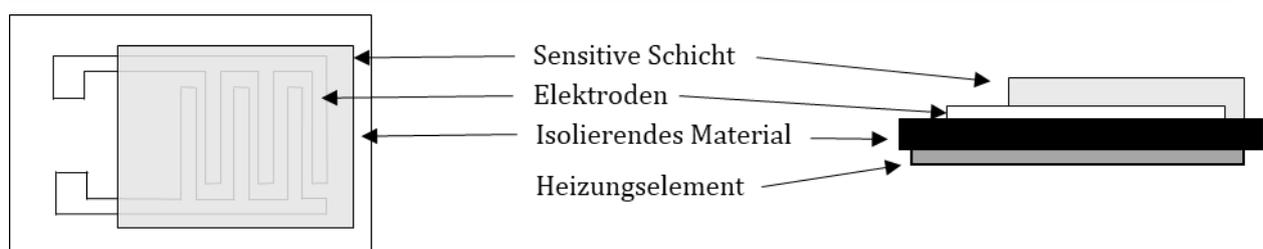
**Abbildung 4: Schematischer Sensoraufbau eines amperometrischen Gassensors mit drei Elektroden**



Quelle: Eigene Darstellung

**Messprinzip auf der Basis von Metalloxyd-Halbleitern:** Die auf Metalloxyd-Halbleitern basierenden LQS messen die Widerstandsänderung, verursacht durch die Leitfähigkeit einer gegenüber dem messenden Gas empfindlichen Sensorschicht. Durch ihre chemische Beschaffenheit können Metalloxyd-Gassensoren für unterschiedliche Gase wie Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und flüchtige organische Verbindungen (engl.: volatile organic compounds, VOC) verwendet werden. Abbildung 5 stellt schematische Ansichten eines Sensors auf der Basis von Metalloxyd-Halbleitern dar.

**Abbildung 5: Schematische Ansichten eines Sensors auf der Basis von Metalloxyd-Halbleitern**



Quelle: Eigene Darstellung nach (Mallires 2020)

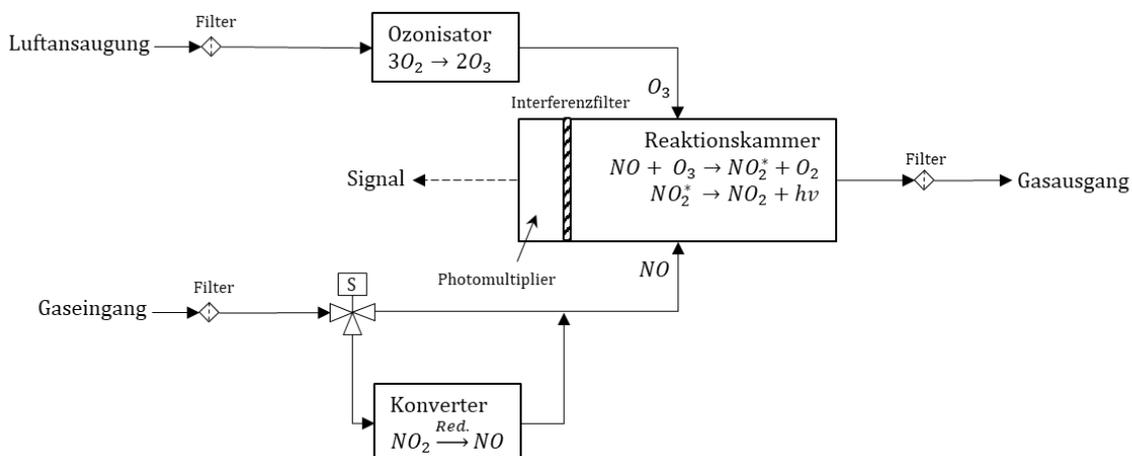
### INFOKASTEN: Chemilumineszenz

Nach der EU-Richtlinie 2008/50/EG gilt als Referenzmethode zur Messung von  $\text{NO}_2$  und  $\text{NO}_x$  die Chemilumineszenz und zur Messung der  $\text{O}_3$ -Konzentration die Ultraviolett-Photometrie.

**Chemilumineszenz:** Die Chemilumineszenz beruht auf der Reaktion von  $\text{NO}$  mit  $\text{O}_3$ . Im Chemilumineszenz-Messgerät wird Luft zunächst durch einen Filter gesaugt, um die Verunreinigung der gasführenden Teile mit Partikeln, besonders der optischen Komponenten, zu verhindern und anschließend bei konstantem Volumenstrom in die Reaktionskammer geleitet, in der sie zur Bestimmung von  $\text{NO}$  mit  $\text{O}_3$  im Überschuss gemischt wird. Aus der Reaktion von  $\text{NO}$  und  $\text{O}_3$  entsteht  $\text{NO}_2$ . Ein Teil davon im chemisch angeregten Zustand, d. h. in einem höheren Energieniveau. Dieses angeregte  $\text{NO}_2$  fällt in seinen Grundzustand zurück und emittiert dabei Licht im Wellenlängenbereich von 600 bis 3.200 nm. Die emittierte Strahlung (Chemilumineszenz) ist proportional zur Anzahl der  $\text{NO}$ -Moleküle im Detektionsvolumen und damit proportional zur  $\text{NO}$ -Konzentration. Die emittierte Strahlung wird mit einem selektiven optischen Filter gefiltert und mit einem Photomultiplier oder einer Photodiode in ein elektrisches Signal umgewandelt (DIN EN 14211:2012-11).

Zur Bestimmung des Gehaltes an  $\text{NO}_2$  wird die Probenluft durch einen Konverter geleitet, in dem das Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid reduziert und dieses auf die zuvor beschriebene Weise bestimmt wird. Das Signal des Photomultipliers oder der Photodiode ist proportional zur Summe der Konzentrationen von  $\text{NO}_2$  und  $\text{NO}$ , also von  $\text{NO}_x$ . Der Gehalt an  $\text{NO}_2$  ergibt sich aus der Differenz der  $\text{NO}_x$ -Konzentration und der  $\text{NO}$ -Konzentration allein, also wenn die Probenluft nicht zuvor durch den oben beschriebenen Konverter geleitet wurde (DIN EN 14211:2012-11). Eine schematische Darstellung des Prinzips eines Chemilumineszenz-Gerätes ist in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Prinzip eines Chemilumineszenz-Gerätes zur Bestimmung von  $\text{NO}$  bzw.  $\text{NO} + \text{NO}_2$



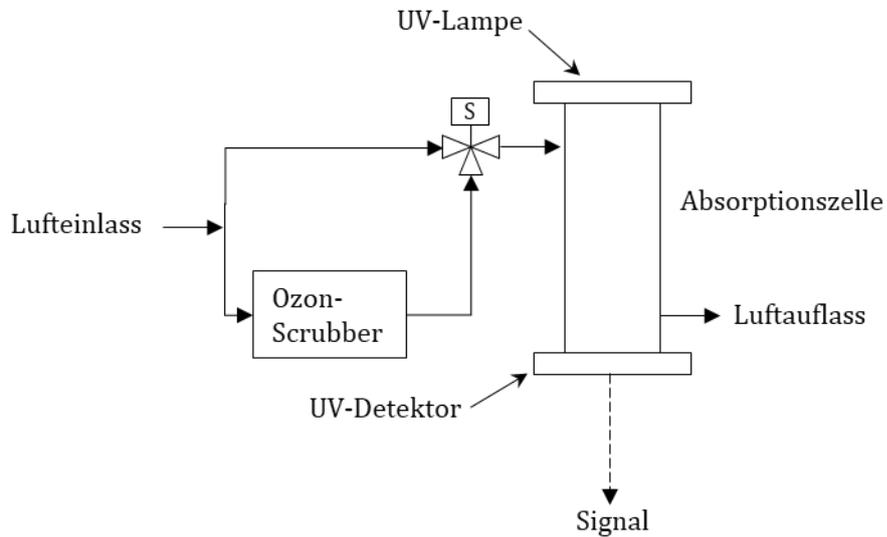
Quelle: Eigene Darstellung nach (Baumbach 1996)

### INFOKASTEN: Ultraviolett-Photometrie

Bei der **Ultraviolett-Photometrie** wird die Luft kontinuierlich durch eine optische Absorptionsküvette gesaugt, in der sie mit monochromatischer Strahlung mit der zentralen Wellenlänge 253,7 nm aus einer stabilisierten Quecksilber-Niederdruck-Entladungslampe durchstrahlt wird. Die UV-Strahlung, die die Absorptionsküvette passiert, wird von einer empfindlichen Photodiode oder einem Photomultiplier gemessen und in ein messbares elektrisches Signal umgewandelt. Ozon absorbiert UV-Strahlung in diesem Wellenlängenbereich. Je mehr Ozon sich in der Messküvette befindet, desto stärker wird die UV-Strahlung absorbiert und desto geringer

ist das an der Photodiode detektierte elektrische Signal. Die Absorption der UV-Strahlung durch das in der Probenluft in der Absorptionsküvette enthaltene Ozon ist, bei entsprechender Kalibrierung des Messgerätes, also ein Maß für die Ozonkonzentration der Luft (DIN EN 14625:2012-12). Abbildung 7 stellt das Prinzip eines UV-Gerätes zur Bestimmung von  $O_3$  dar.

**Abbildung 7: Prinzip eines UV-Gerätes zur Bestimmung von  $O_3$**



Quelle: Eigene Darstellung nach (Mallires 2020)

## 3 Anwendung und Probleme bei Sensoren

### 3.1 Anwendungsbereiche von Sensoren

Geräte der Referenzklasse liegen bei der Anschaffung in der Regel in einem Kostenbereich von über 15.000 Euro. Aufgrund der hohen Kosten sind diese Geräte auf die Verwendung durch die Behörden in den Landesmessnetzen und Forschungseinrichtungen beschränkt. Abgesehen von den Kosten für die Anschaffung eines solchen Geräts, machen die Größe und die zusätzlichen Kosten für die Wartung diese Geräte uninteressant und unwirtschaftlich für den Einsatz außerhalb der staatlichen Messnetze. Derzeit kommen sie zumeist als eignungsgeprüfte Messgeräte nur bei ortsfesten Messungen in Messcontainern, Messfahrzeugen oder Laboren zum Einsatz. Die zeitliche Auflösung kann, abhängig vom Messprinzip, von einigen Sekunden, z. B. bei Chemilumineszenz-Messgeräten für  $\text{NO}_x$ , bis zu 24 Stunden bei Anwendung der Referenzmethode für Feinstaubmessungen auf Basis der Sammlung von Feinstaub auf Filtern und deren gravimetrischen Analyse variieren. Allerdings werden nicht die zeitlich hochaufgelösten Sekunden- oder Minutenmittel-Werte veröffentlicht, sondern meist nur Stundenmittelwerte bzw. Tagesmittelwerte.

LQS hingegen sind im Allgemeinen günstig, klein und haben einen geringen Platz- und Energiebedarf, allerdings sind ihre Messwerte nicht so belastbar wie diejenigen aus den behördlichen Messstationen. Zudem besitzen manche der LQS eine sehr hohe zeitliche Auflösung, so dass auch Phänomene beobachtet werden können, welche einer großen zeitlichen Änderung unterworfen sind. Die genannten Eigenschaften eröffnen den LQS einen großen Einsatzbereich und somit können sie für ein breites Spektrum von nicht-regulatorischen, ergänzenden und informativen Anwendungen verwendet werden. Die Anwendungen von LQS sind vielfältig. Je nach Art der Anwendung und der damit verbundenen Anforderungen an die Qualität der Daten variiert die Wahl der LQS. Eine Zusammenfassung der möglichen Anwendungen von LQS, wie sie von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) (Peltier et al. 2020) festgelegt wurden, ist nachfolgend dargestellt:

- ▶ **Ergänzende Überwachung:** LQS können im Rahmen ergänzender Messungen zur Überwachung der Luftqualität im Hinblick auf die Einhaltung nationaler oder grenzüberschreitender Normen in behördliche Netze integriert werden. Dies bedeutet, dass die erzeugten Daten eine hohe Genauigkeit aufweisen und mit den Daten der Referenzmessgeräte vergleichbar sein müssen. Allerdings gibt es derzeit keine allgemein anerkannten Standards für die Anforderungen an die Datenqualität bei solchen Anwendungen.
- ▶ **Trendanalyse:** LQS können zur Analyse von Trends in der Luftqualität im Laufe der Zeit auf lokaler und kommunaler Ebene ergänzend zu den behördlichen Landesmessnetzen verwendet werden. Die meisten der derzeit verfügbaren LQS haben jedoch eine begrenzte Lebensdauer und sind durch Alterung und zeitliche Drift der Sensorempfindlichkeit beschränkt. Daher ist bei der Verwendung von LQS für Studien zu zeitlichen Trends Vorsicht geboten. Es müssen regelmäßige Qualitätskontrollen durchgeführt werden, um die ausreichende Zuverlässigkeit der Trendanalysen gewährleisten zu können.
- ▶ **Charakterisierung von Emissionsquellen und Überwachung der Auswirkungen auf Gebiete in der Nähe von Quellen:** Die meisten behördlichen Immissionsmessstationen

werden eingesetzt, um die Luftqualität in einem Gebiet zu überwachen, in dem sich regelmäßig Betroffene über viele Stunden am Tag aufhalten und zur Überprüfung der Einhaltung von gesetzlichen Grenz- und Zielwerten an diesen Orten. Ergänzend kommen oft kostengünstige Passivsammler zum Einsatz (DIN EN 13528-2:2002-12), um die Repräsentativität eines Messstandortes zu überprüfen, indem im Umfeld einer Messstation an mehreren Orten mit dieser einfachen Methode die Konzentrationen einer luftverunreinigenden Komponente ebenfalls bestimmt werden. Es existieren Passivsammler für verschiedene gasförmige Luftverunreinigungen, u. a. auch für NO<sub>2</sub>. Bei der Komponente Feinstaub existieren Passivsammler nur für Grobstaub > 2,5 µm. LQS, besonders diejenigen für Feinstaub aber auch für gasförmige Luftverunreinigungen, könnten künftig diese wichtige Rolle bei der Feststellung der räumlichen Verteilung von Luftverunreinigungen in nächster Umgebung von starken Emissionsquellen spielen. Dabei kann es sich zum Beispiel um Industrieanlagen, Bergwerke, Raffinerien, Baustellen, Steinbrüchen aber auch viel befahrene Straßen usw. handeln. Es muss dabei auf den Messbereich, die räumliche und zeitliche Präzision, die Datengenauigkeit und die Selektivität der erfassten Parameter geachtet werden. Ein Vorteil von LQS zu Passivsammlern ist die sehr viel höhere zeitliche Auflösung der Messergebnisse.

- ▶ **Citizen Science:** Durch die Beteiligung der Öffentlichkeit und die Zusammenarbeit zwischen Zivilgesellschaft und Wissenschaft kann der Umfang der zur Verfügung stehenden Luftqualitätsdaten erheblich gesteigert werden. Dies ist besonders für Gebiete abseits staatlicher Messstellen oder in Gebieten mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Heterogenität der Luftqualität wie zum Beispiel in Städten, Gewerbegebieten und in Gebieten mit großer topographischer Variabilität bedeutsam.
- ▶ **Identifizierung von lokalen Belastungsschwerpunkten:** Aufgrund ihrer geringen Kosten bieten LQS eine Möglichkeit zur Sammlung von Daten in großem räumlichem und zeitlichem Umfang. Die absolute Qualität der in solchen Studien erhobenen Daten ist kein entscheidender Faktor. Es sollen hier vielmehr relative Unterschiede zwischen verschiedenen Standorten zur Identifizierung von Belastungsschwerpunkten durch Luftschadstoffe ermittelt werden.
- ▶ **Persönliche Belastung von einzelnen Menschen (persönliche Exposition):** Diese Messungen werden durchgeführt, um die Auswirkungen der Luftqualität auf die menschliche Gesundheit zu beurteilen. Sie beinhalten ein LQS-System, das von einer Person mitgeführt wird und die Luftqualität während regelmäßiger Aktivitäten und während der Bewegung in einem Gebiet aufzeichnet. Die Messdaten für solche Anwendungen müssen eine hohe Qualität aufweisen, die mit der von Referenzmessgeräten vergleichbar ist. Da tägliche Aktivitäten mit Bewegung verbunden sind, sollten die für diese mobilen Messungen verwendeten LQS also tragbar, ergonomisch, bedienungsfreundlich, batteriebetrieben und mit einem GPS (global positioning system) ausgestattet sein, so dass eine spätere Zuordnung der gemessenen Konzentrationen zu den Messorten möglich ist.
- ▶ **Sensibilisierung für Fragen der Luftqualität:** Obwohl eng mit der persönlichen Exposition verbunden, erfordern Messungen der persönlichen Betroffenheit von Luftverunreinigung eher qualitative als quantitative Daten. Diese Messungen können genutzt werden, um das

Bewusstsein für Luftverschmutzung zu schärfen und Menschen vor potenziell schädlichen Umgebungsbedingungen zu warnen.

- ▶ **Luftqualität in Innenräumen:** Neben der Sensibilisierung für die Luftqualität in der Außenumgebung sind Messungen der Luftqualität in Innenräumen wichtige Instrumente, um potenzielle Verschmutzungsquellen innerhalb des Wohn- oder Arbeitsbereichs zu ermitteln und die Schwankungen der Belastung zu Tageszeiten und in verschiedenen Räumen auch in Abhängigkeit der Belüftung zu bewerten.
- ▶ **Mobile Messung:** Die mobile Überwachung der Luftverschmutzung umfasst alle Szenarien, in denen die Geräte zur Messung räumlich mobil eingesetzt werden. Dies kann zu Fuß, mit dem Fahrrad, im Auto oder im öffentlichen Personenverkehr geschehen. In letzter Zeit sind Messungen mit Drohnen hinzugekommen. LQS sind so nicht nur in der Lage eine große räumliche Variabilität abzudecken, sondern auch leicht genug, um sie an Drohnen anzubringen und so die vertikale Verteilung der Luftverunreinigungen in der Höhe zu untersuchen. Je nach Qualität der Daten können Systeme für den mobilen Einsatz für wissenschaftliche Fragestellungen in der Stadtklimatologie, zur Untersuchung der Luftqualität in Abhängigkeit der vertikalen Schichtung der Luft, zur Untersuchung der persönlichen Exposition, zur Sensibilisierung der Bevölkerung oder zur Ergänzung behördlicher Messnetze eingesetzt werden.
- ▶ **Notfallbezogene Überwachung der Luftqualität bei Unfällen oder bei Ausfall offizieller Messnetze:** In Fällen, in denen die Infrastruktur zur Durchführung herkömmlicher Messungen nicht verfügbar ist oder wenn im Zusammenhang mit Chemieunfällen, Bränden, Naturkatastrophen oder Explosionen rasch eine Überwachung der Luftqualität in einem betroffenen Gebiet benötigt wird, können LQS eingesetzt werden. Die verwendeten Sensorsysteme müssen für diese Anwendungen Daten mit hoher bzw. ausreichender Genauigkeit und meistens in Echtzeit liefern.

### 3.2 Grenzen und Probleme bei Messungen der Luftqualität mit Sensoren

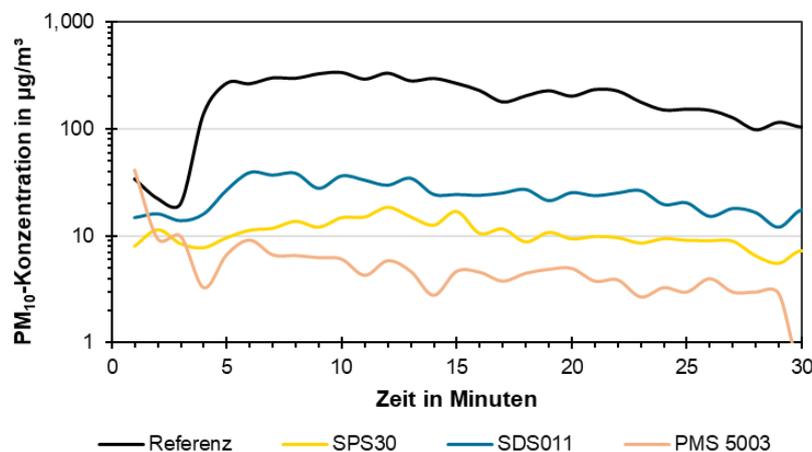
Bei allen Einsatzmöglichkeiten von LQS sind deren Grenzen und die Herausforderungen dabei zu beachten. Die häufigsten Probleme, die bei LQS auftreten können, sind die kurzfristigen Auswirkungen auf die Messungen aufgrund schneller Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur sowie die langfristigen Änderungen in Bezug auf die Drift in der Messempfindlichkeit der Sensoren und deren Empfindlichkeit ganz generell. Bei LQS für gasförmige Luftverunreinigungen können auch sogenannte Querempfindlichkeiten gegenüber anderen Luftverunreinigungen auftreten. Z. B. können LQS für  $O_3$  auch auf  $NO_2$  ansprechen.

LQS für PM führen aufgrund des hygroscopischen Wachstums der Partikel bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit tendenziell zu einer Überschätzung der PM-Konzentrationen. PM-LQS müssen auch sorgfältig auf die Gleichförmigkeit des Durchflusses des Luftvolumens eingestellt werden, um sicherzustellen, dass nicht durch Schwankungen des Luftvolumens der angesaugten Messluft die Menge der gemessenen Partikel verändert wird.

In Abbildung 8 sind Vergleichsmessungen der PM-LQS bezüglich der  $PM_{10}$ -Konzentration dargestellt. Die Ordinate ist logarithmisch aufgetragen. Das Vergleichsgerät wird bei den

Auswertungen als "Referenz" bezeichnet. Es wird ersichtlich, dass keiner der dargestellten LQS im Vergleich zur Referenz ohne weitere Kalibrierungen sinnvolle Werte liefert.

**Abbildung 8: PM<sub>10</sub>-Vergleichsmessungen der LQS unter Laborbedingungen**



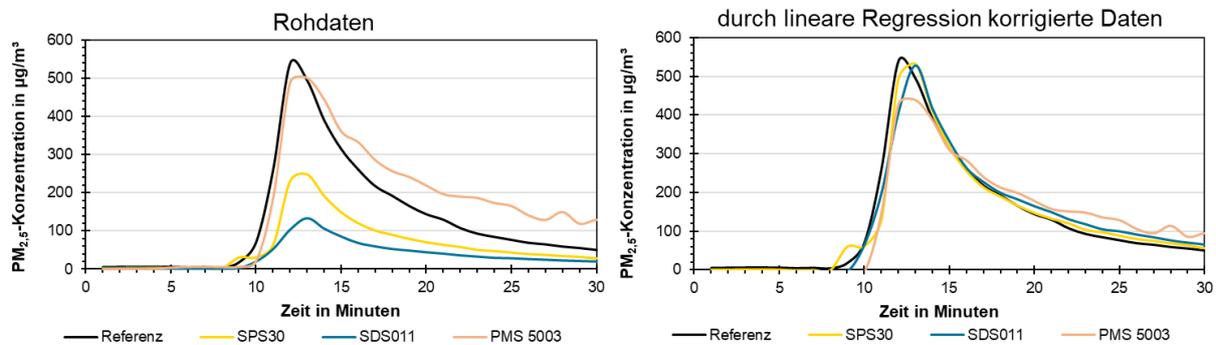
Y-Achse in logarithmischer Skalierung. Die Messungen wurden auf eine Minute gemittelt. Referenz: Model 1.108 (Grimm), Sensors: SPS30 (Senseirion), SDS011 (Nova Fitness), PMS5003 (Plantower). Feinstaubquelle: Mehl. Der mittlere Durchmesser des verwendeten Mehls entspricht 4 µm  
Quelle: Eigene Darstellung

Es ist möglich, dass einige der erzeugten großen Partikel nicht in den Messbereich der LQS fallen. Es gibt jedoch noch andere Ursachen, die erklären könnten, warum die getesteten LQS keine zuverlässigen Messwerte für PM<sub>10</sub> liefern können:

- ▶ **Partikeldichte, Brechungsindex und Partikelform:** Die LQS, wie alle anderen lichtstreuenden Instrumente, berechnen die Massenkonzentration mittels einer angenommenen Partikeldichte und eines angenommenen Brechungsindex. Die Annahme, dass alle Partikel die gleiche Dichte und den gleichen Brechungsindex aufweisen, ist eine Vereinfachung, die zu Messfehlern führen kann. Außerdem beschränkt man sich bei der Kalibrierung von Instrumenten, welche auf optischen Verfahren basieren, für die Partikelcharakterisierung üblicherweise auf kugelförmige Partikel, wogegen die luftgetragenen Partikel hauptsächlich aus Partikeln unregelmäßiger Form bestehen (DIN 33899-3:2014). Auch diese idealisierenden Annahmen können zu Messfehlern führen.
- ▶ **Interne Verluste durch physikalische Beschränkungen:** Partikelverluste können in den Probenahmerohren durch elektrostatische Aufladung und Abscheidung der Partikel in der Probenahme, durch Impaktion oder durch Absetzen aufgrund der Schwerkraft der Partikel, auftreten. Aufgrund ihres höheren Gewichts prallen vor allem große Partikel an den Umlenkungen der Probenahmeleitung an die Wandung und gelangen deshalb nicht bis zur Messkammer. Ein Minderbefund für gröbere Partikel ist die Folge. Die gröbere Fraktion PM<sub>10</sub> ist stärker von diesem Vorgang betroffen als die feinere Fraktion PM<sub>2,5</sub>.
- ▶ **Obergrenze des Partikelgrößenbereichs:** Die Definition der Norm DIN EN 481 für PM<sub>10</sub> erstreckt sich auf Partikelgrößen jenseits der oberen messbaren Partikelgröße der getesteten LQS. In einigen Fällen kann dies zu einer Unterschätzung der gemessenen PM<sub>10</sub>-Konzentrationen führen.

In Abbildung 9 sind die Vergleichsmessungen der PM-LQS bezüglich der Konzentration von  $PM_{2,5}$  dargestellt. Im Gegensatz zum Test der Messung der Konzentration von  $PM_{10}$  reagieren alle LQS proportional zur Referenzmessung. Das bedeutet, dass unter Laborbedingungen ( $20\text{ °C}$ , circa  $35\%$  Luftfeuchtigkeit) eine einfache lineare Kalibrierung der LQS ausreicht, um Ergebnisse zu erzielen, die mit einer Referenz vergleichbar sind.

**Abbildung 9:  $PM_{2,5}$ -Vergleichsmessungen der Sensoren unter Laborbedingungen**



Links: Rohdaten. Rechts: durch lineare Regression korrigierte Daten. Die Messungen wurden auf eine Minute gemittelt. Referenz: Model 1.108 (Grimm), Sensoren: SPS30 (Sensirion), SDS011 (Nova Fitness), PMS5003 (Plantower). Feinstaubquelle: Dampfdessillat. Der mittlere Durchmesser des Dampfdessillats entspricht  $0,5\ \mu\text{m}$   
Quelle: Eigene Darstellung

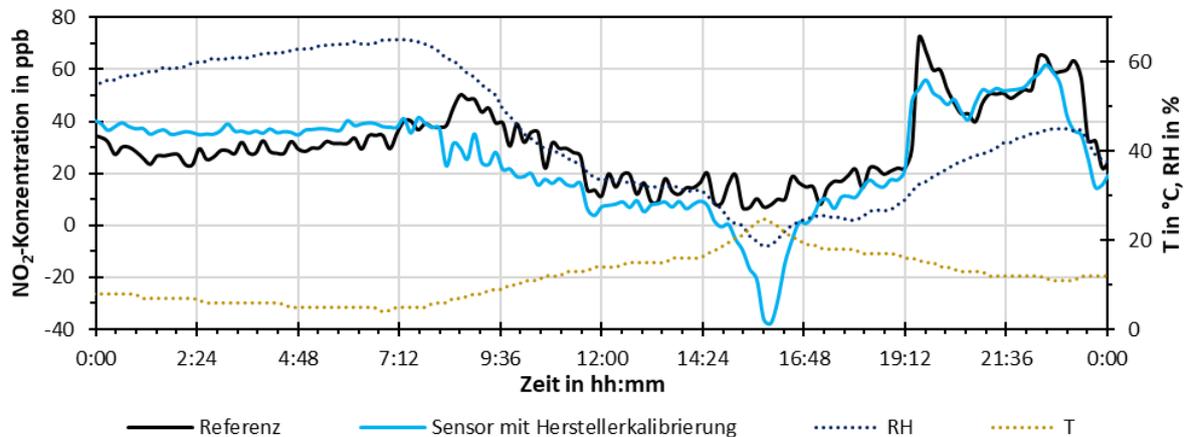
Außerdem werden die Messungen von Gassensoren durch Veränderungen der atmosphärischen Bedingungen wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und in geringerem Maße durch Wind beeinflusst.

In Abbildung 10 wird der zeitliche Verlauf der  $NO_2$ -Konzentration einer Referenzmessung und einer Messung mit LQS mit Herstellerkalibrierung über 24 Stunden dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Tagesverlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte einen Einfluss auf das Sensorsignal haben. Dies führt sogar dazu, dass der LQS negative Konzentrationen ausgibt, die physikalisch nicht möglich sind.

Außerdem können elektrochemische Sensoren eine lange Aufwärmzeit haben, die von Minuten bis zu Tagen dauern kann. Die Bewertung von Messwerten aus der Aufwärmzeit führt zu Fehlinterpretationen. Das Signal dieser Sensoren kann außerdem aufgrund der elektronischen Komponenten stark "verrauscht" sein, so dass es wichtig ist, Mittelwerte<sup>5</sup> (z. B. 10 Minuten oder 1 Stunde) zu bilden und nicht die zeitlich hochaufgelösten Rohdaten zu analysieren. Es ist auch wichtig, dass man nicht versucht, Daten zu vergleichen, bei denen nicht derselbe Mittelungszeitraum verwendet wurde. Durchschnittswerte auf Stundenbasis sind in der Datenbank der Referenz-Messstationen zu finden.

<sup>5</sup> Mittelwerte werden gebildet, indem alle validen Rohdaten innerhalb eines Messzeitraumes aufsummiert werden und anschließend durch die Anzahl der verwendeten Rohdaten dividiert wird.

**Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der NO<sub>2</sub>-Konzentration eines Referenzmessgerätes und eines LQS mit Herstellerkalibrierung**



Die Temperatur (T) und die relative Luftfeuchtigkeit (RH) sind in der Sekundärachse dargestellt. Referenz: Model 405 (2B Technologies), Sensor: B43F (Alphasense)

Quelle: Eigene Darstellung

#### INFOKASTEN: Grenzen der Anwendung von LQS

- Schnelle Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur können sich negativ auf die Qualität der Messungen mit elektrochemischen und Metalloxid-LQS auswirken.
- LQS können wegen der begrenzten Lebensdauer der Sensoren und wegen des Strombedarfs nicht über einen längeren Zeitraum unbeaufsichtigt betrieben werden. Außerdem weichen LQS zumeist im Laufe der Zeit von ihrer Grundlinie ab (Sensordrift).
- LQS, die für die Verwendung in Innenräumen konzipiert sind, liefern im Freien möglicherweise keine guten Ergebnisse.
- Beim Einsatz von LQS ist es wichtig sich darüber im Klaren zu sein, wofür sie verwendet werden sollen. Die erforderliche Qualität der Daten ist von Anwendung zu Anwendung unterschiedlich. Die meisten LQS eignen sich gut für Studien mit Bezug zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit und zur relativen Luftqualität (geringe Verschmutzung, hohe Verschmutzung).
- Welchen Umfang die Kalibrierungen während einer Messkampagne einnehmen müssen, wird unterschiedlich gehandhabt. Die meisten Forschungsgruppen führen die Kalibrierungen im Rahmen von Vergleichsmessungen mit Referenzmessgeräten bei kurzen Messkampagnen zu Beginn und bei langen Messkampagnen zusätzlich während und am Ende der Messungen durch.
- Die meisten LQS sind für den mobilen Einsatz geeignet, allerdings nicht für Personen ohne Fachkenntnisse.

### 3.3 Vorteile und Nachteile von Sensoren gegenüber Referenzmessgeräten

Die Verwendung von LQS hat im letzten Jahrzehnt stark zugenommen und ihre Entwicklung schreitet weiter rasant voran. Allerdings sind diese Geräte nicht geeignet, Referenzmessgeräte zu

ersetzen. Die Vor- und Nachteile von LQS im Vergleich zu Referenzmessgeräten werden im Folgenden zusammengefasst.

#### **Vorteile:**

- ▶ Kostengünstig und relativ einfach zu beschaffen;
- ▶ Leicht, klein, einfache Konfiguration und Installation;
- ▶ Geringer Stromverbrauch; oftmals Batteriebetrieb möglich;
- ▶ Je nach Konfiguration können LQS als eigenständige Geräte oder als Teil eines internetbasierten Netzwerks eingesetzt werden;
- ▶ Für unterschiedliche Anwendungen und je nach geforderter Datenqualität sind unterschiedliche LQS kommerziell verfügbar;
- ▶ Meteorologische Informationen wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit können bei einigen der LQS direkt mitgemessen werden.

#### **Nachteile:**

- ▶ Sensormessungen können durch ein breites Spektrum verschiedener chemischer und physikalischer Störungen beeinflusst werden. Alle Korrekturen, die vorgenommen werden, um diese Störungen zu berücksichtigen, müssen anhand von Referenzmessungen überprüft und bestätigt werden;
- ▶ Regelmäßige Kalibrierungen sind erforderlich, um Probleme aufgrund von Alterung und Drift der Sensorempfindlichkeit zu beheben;
- ▶ Kollokationsversuche, also Messungen unter realen Bedingungen in unmittelbarer Nachbarschaft zu einer Referenzmessung<sup>6</sup>, müssen in der Nähe von Referenzmessstationen durchgeführt werden, deren Umweltbedingungen ungefähr denjenigen entsprechen, in denen die LQS eingesetzt werden sollen;
- ▶ Bei Anwendungen, die eine hohe Datenqualität erfordern, sollten zusätzlich zu den Kollokationsversuchen Labortests durchgeführt werden, um die Leistung der LQS bewerten zu können.

### **3.4 Empfehlungen für die Platzierung und den Außeneinsatz von Sensoren und Sensor-Systemen zur Messung der Luftqualität**

Die Qualität der Außenluft soll europaweit nach einheitlichen Vorgaben überwacht und bewertet werden. Daher legt die 39. BImSchV nicht nur Anforderungen an die Art der Messgeräte des Messnetzes fest, sondern schreibt auch Standortkriterien für die Platzierung der Messgeräte vor.

---

<sup>6</sup> Kollokation kann als „Zusammen-Platzierung“ übersetzt werden

Sensornetzwerke hingegen folgen noch keiner solchen Norm, was die Interpretation der Ergebnisse erschwert. Die folgenden Abschnitte stellen Informationen zusammen, welche Aspekte bei Konstruktion und Installation von LQS bzw. LQS-Systemen zu beachten sind.

Um repräsentative Messergebnisse zu erhalten, sollten LQS-Systeme so platziert werden, dass ihr Messeinlass möglichst ungehindert mit der Umgebungsluft in Kontakt kommt und nicht durch umliegende Hindernisse wie beispielsweise durch einen dichten Pflanzenbewuchs abgeschirmt wird. Sie sollten also nicht direkt am Boden, sondern nach Möglichkeit in einer Höhe von mindestens 1,5 m angebracht werden. Es ist außerdem darauf zu achten, dass sie sich nicht in unmittelbarer Nähe von Emissionsquellen befinden. Das ist z. B. dann der Fall, wenn der LQS direkt neben dem Austritt eines Lüftungsschachtes angebracht wird. Dann erhält man keine repräsentativen Daten für die Umgebungsluft, sondern misst eher das Emissionsverhalten der Lüftungsanlage. Gleiches gilt in Bezug auf Schornsteine und andere lokale Emissionsquellen.

Für den Einsatz in der Außenluft müssen LQS in ein Gehäuse eingebaut werden. Das Gehäuse soll die LQS sowie die Elektronik vor Wind, Regen, Feuchtigkeit und Sonne schützen. Die Gehäusematerialien sind normalerweise aus Kunststoff (Polypropylen, Polyester, glasfaserverstärkter Kunststoff, Polycarbonat, Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)) oder Metall (Stahlblech, Aluminium). Metallgehäuse werden aufgrund des höheren Gewichts nur selten in Citizen Science eingesetzt. Aktuell werden häufig 3D-gedruckte Gehäuse verwendet. Hierbei ist jedoch Vorsicht geboten, da die gemessene Schadstoffkonzentration aufgrund elektrostatischer Aufladung und der Wechselwirkung zwischen dem Schadstoff und dem Gehäuse möglicherweise verfälscht wird, indem sich elektrisch geladene Partikel am Gehäuse niederschlagen können, anstatt zum Einlass des Sensors zu gelangen. Dies kann zu einem Minderbefund der gemessenen Konzentrationen führen. Kalibrierungstests müssen mit den LQS im Gehäuse durchgeführt werden, um die Qualität der Daten zu gewährleisten.

Bei der Konstruktion eines Gehäuses ist es wichtig, die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- ▶ **Messeinlass für PM-LQS:** Die Probenahme muss gegen Regen, Wind und Insekten geschützt sein. Dafür ist die Nutzung eines Probenahmekopfes möglichst ähnlich eines Sigma-2-Probenahmekopfes nach VDI 2119-4 (siehe Abbildung 11) zu empfehlen. Die Einzelteile können aus Kunststoff gefertigt werden. Eine statische Aufladung kann entweder durch eine ausreichend leitende Beschichtung, z. B. Chrom, durch Verwendung eines elektrisch leitenden Kunststoffs oder durch das Aufbringen eines entsprechenden leitfähigen Lacks verhindert werden. Als Insektenschutz kann ein Gitter aus Edelstahl oder Kupfer benutzt werden. Diese Art von Probenahmesystem muss so konzipiert sein, dass große Partikel nicht direkt durch die Schwerkraft auf den LQS fallen können und der Einfluss von Wind auf die Probenahme vermieden wird. Wenn LQS direkt der Außenluft ausgesetzt sind, können die Messungen verfälscht werden und die LQS können aufgrund der Ablagerung von Partikeln in oder an den LQS schneller altern. Außerdem sollte der Weg vom Einlass bis zur Messkammer für PM-LQS sowie für PM-Referenzmessgeräte stets so kurz wie möglich und immer direkt ohne irgendwelche Umlenkungen sein. Kunststoffschläuche als Ansaugung sollten für PM-LQS möglichst vermieden werden. Wenn sie benötigt werden, dann sollten sie aus Materialien bestehen, welche sich nicht elektrostatisch aufladen, z. B. aus kohlenstoffhaltigen Materialien. Abbildung 11 zeigt den Sigma-2 Probenahmekopf nach VDI 2119-4 für passive Probenahme und den Prototyp eines ähnlichen Probenahmekopfes für LQS.

Zusätzlich können PM-LQS mit einer Trockenstrecke ausgestattet werden, die eine Überschätzung der Messergebnisse bei hoher Luftfeuchtigkeit verhindert. In Anhang A ist eine Bauanleitung für eine kostengünstige Trockenstrecke zu finden.

**Abbildung 11: Messeinlass für PM-LQS**

---



Links Passivsammler Sigma-2; rechts: Prototypen des Probenahmekopfes für PM-LQS  
Quelle: Eigene Abbildung

- **Messeinlass für Gassensoren:** Der Transport des Messgases zum Sensor kann entweder passiv per Diffusion oder aktiv mittels einer Pumpe durchgeführt werden. Im ersten Fall müssen sich die Gassensoren direkt in der Außenluft befinden, aber gleichzeitig abgedeckt sein, um direkte Sonneneinstrahlung, Regen und den Einfluss von Wind auf den Diffusionsprozess zu vermeiden. Im zweiten Fall können die LQS innerhalb des Gehäuses geschützt werden, benötigen aber einen Probenahmekopf, der dem für PM-LQS ähnlich ist. Außerdem müssen die Gassensoren dann in einem gasdichten Block eingebaut werden, damit sie tatsächlich nur der angesaugten Luft ausgesetzt sind (siehe Abbildung 12).

**Abbildung 12: Gassensoren, eingebaut in einen Sensorblock**

---

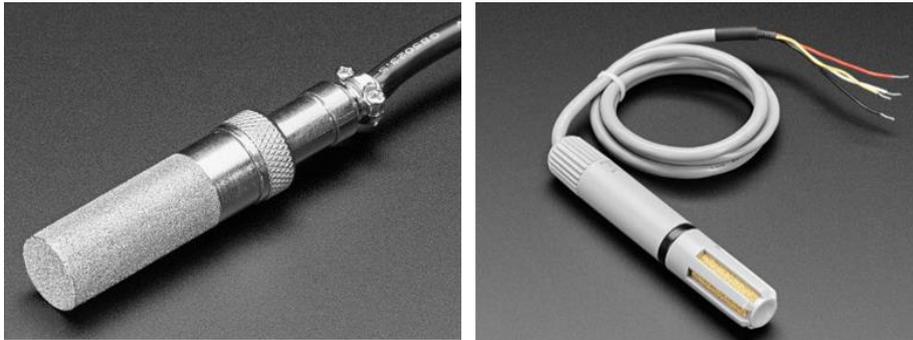


Quelle: Eigene Abbildung

- **Ergänzende Temperatur- und Feuchtesensoren:** Bei der Beschaffung der die Messeinheit ergänzenden Temperatur- und Feuchtesensoren ist zu beachten, dass der Sensor für Anwendungen in der Außenluft geeignet ist. Diese Sensoren zeichnen sich durch ein Sintermetallgitter-Gehäuse gegen Regen und Wind aus. In Abbildung 13 sind zwei Beispiele von Sensoren in Sintermetallgitter-Gehäusen dargestellt.

**Abbildung 13: Wetterfestes Sintermetallgitter-Gehäuse für Temperatur-/Feuchtesensoren auf SHT-30-Basis der Firma Sensirion**

---



Quelle: <https://www.adafruit.com>

- ▶ **Lüftung:** Im Gehäuse muss für eine gute Belüftung gesorgt werden, damit die LQS nur dem normalen atmosphärischen Druck ausgesetzt sind und die von den elektronischen Bauteilen erzeugte Wärme abgeführt werden kann. Zu diesem Zweck können Löcher ins Gehäuse gebohrt werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Bohrungen so vorgenommen werden oder mit Gittern versehen sind, dass der Eintritt von Wasser oder das Eindringen von Insekten verhindert wird.
- ▶ **Stromanschluss:** Bei der Ausführung der elektrischen Anschlüsse für die LQS-Systeme ist mit großer Vorsicht vorzugehen, da es zu Kurzschlüssen kommen kann, wenn die Leitungen mit Wasser in Kontakt kommen. Es wird daher empfohlen, Stecker mit Schutzart IP68 zu verwenden. Bei Verwendung von aufladbaren Akkus müssen diese ebenfalls vor Sonne und Regen geschützt werden.
- ▶ **Befestigung:** Es sollte sichergestellt werden, dass das LQS-System korrekt und stabil am Messort befestigt wird. Je nach Gewicht des LQS-Systems gibt es verschiedene Lösungen. Beispielsweise können bei kleinen, leichten Gehäusen Kabelbinder und bei größeren Gehäusen Klick-Rohrschellen oder Verschraubungen verwendet werden. Es ist jedoch wichtig, die Stabilität der Sensorbox und ihrer Befestigung zu überprüfen, nachdem sie montiert ist, um Unfälle, besonders bei starkem Wind, zu vermeiden.

### 3.5 Darstellung und Kommunikation von Messungen mit Luftqualitäts-sensoren

Aufgrund der unterschiedlichen Qualität der von LQS gewonnenen Messwerte, der Einflüsse der Umgebung und der meteorologischen Situation auf die Messungen, ist es wichtig, die Daten so zu kommunizieren, z. B. an Community-Projekte, die die Daten über Webseiten verfügbar machen, dass Missverständnisse vermieden werden. Eine Übermittlung von Daten, deren Qualität unbekannt ist und die möglicherweise fehlerbehaftet sind, kann zu falschen Entscheidungen führen und ist dadurch schlimmer zu bewerten als das Fehlen von Daten (Snyder et al. 2013). Eine korrekte Kommunikation von mit LQS gemessenen Daten kann vor allem dann nützlich sein, wenn es um den Vergleich von Daten zwischen verschiedenen Standorten geht.

Die folgenden Faktoren helfen bei der effektiven Kommunikation von mit LQS gemessenen Daten:

1. **Metadaten:** Metadaten sind eine Sammlung von Informationen über die Daten. Sie enthalten Informationen darüber, wie die Daten erfasst werden (z. B. Geräteinformationen zu Modell und Seriennummer, Kalibrierungszertifikate) und wie die erfassten Daten verarbeitet wurden. Auf dieser Basis kann die Datenqualität eingeschätzt werden. Darüber hinaus werden Berechtigungen und Lizenzen für die Nutzung der Daten, das Urheberrecht, sowie Informationen darüber, wie und wann sie erstellt wurden, erfasst.
2. **Umwelteinflüsse und meteorologische Daten:** Diese Daten umfassen Informationen über den Standort der Messung und mögliche Emissionsquellen in der Umgebung, wie zum Beispiel temporäre Baustellen, land- oder forstwirtschaftliche Aktivitäten oder industrielle Emittenten. Meteorologische Daten umfassen außerdem Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsereignisse, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.
3. **Messprotokoll:** Das Messprotokoll ist das wichtigste Element der Datenerfassung. Alle wichtigen Ereignisse, das Ein- und Ausschalten der Messgeräte, Unterbrechungen, Wartungsarbeiten wie z. B. Reinigungen, Kalibrierungen, Qualitätskontrollen usw. müssen im Protokoll dokumentiert werden. Für den Fall, dass eine andere Person die Messungen übernehmen muss, dient dieses Protokoll der bisherigen Messpraxis und der Messmethodik als Handbuch für die Übergabe. Zwei Beispiele einer Vorlage für ein Messprotokoll sind in Anhang B dargestellt.

## 4 Qualitätssicherung beim Einsatz von Sensoren zur Messung der Luftqualität

### 4.1 Was versteht man unter Kalibrierung?

Unter den Maßnahmen zur Qualitätssicherung beim Einsatz von Sensoren zur Messung der Luftqualität nimmt die regelmäßige Kalibrierung während des Betriebes eines LQS eine besonders wichtige Stellung ein. Unter Kalibrierung versteht man dabei den Prozess der Überprüfung und Anpassung der Messungen eines Instruments an eine Referenz, um sicherzustellen, dass es genaue Daten liefert. Bei den LQS wird die Kalibrierung sowohl in der Entwicklungsphase (Grundkalibrierung), also auch im Anschluss in der Serienproduktion (Herstellerekalibrierung) und während des Einsatzes (Labor- und Feldkalibrierung) durchgeführt (Pichlmaier 1990).

Die Grundkalibrierung der LQS, bei der der Messparameter (z. B. Spannung bei elektrochemischen Sensoren und Lichtstreuung bei Partikelsensoren) in Konzentrationswerte (in ppb<sup>7</sup> bzw.  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) umgerechnet wird, erfolgt durch den Hersteller (Peltier et al. 2020) (siehe Abbildung 14). Bei der Serienproduktion werden alle Sensoren anschließend individuell kalibriert. Damit werden sowohl die Exemplarstreuungen, also die Abweichungen einzelner LQS oder einzelner Chargen von einer Referenz, als auch sensorspezifische Abweichungen erfasst. Mit den individuellen Kalibrierungsdaten der Hersteller lassen sich die LQS schließlich in ein einsatzfähiges LQS-System integrieren (Pichlmaier 1990). Aufgrund der in Kapitel 3 genannten Probleme, wie Alterung, Drift und standortspezifische Zusammensetzung der Feinstaubkonzentrationen, sind zusätzliche, regelmäßige Kalibrierungen während des Messeinsatzes erforderlich, um die zeitliche Stabilität der LQS sicherzustellen. Die Kalibrierungsintervalle hängen stark vom Sensortyp, den Einsatzbedingungen und der geforderten Messtoleranz ab.

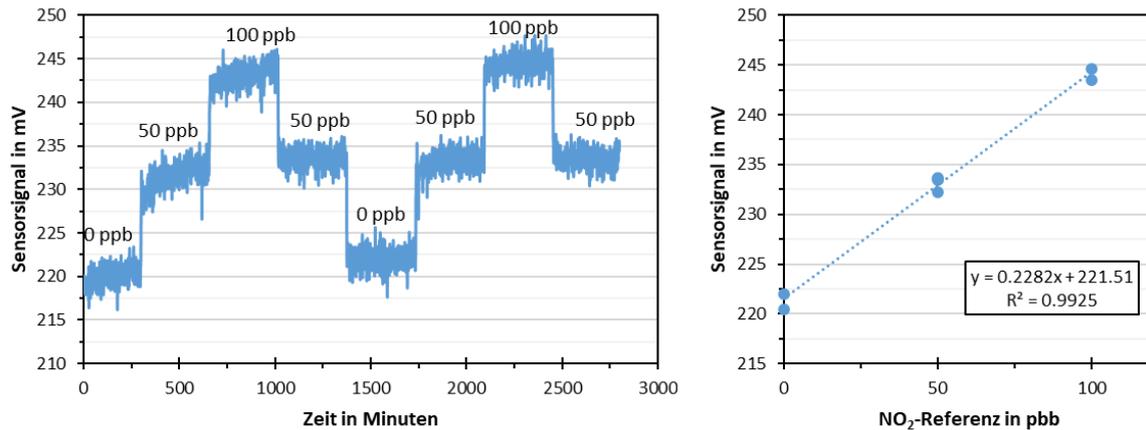
#### **INFOKASTEN: Kalibrierung, Justierung und Eichung**

Kalibrierung, Justierung und Eichung sind wichtige Begriffe der Messtechnik. Unter Kalibrierung versteht man die Bestimmung und Korrektur von Messabweichungen gegenüber einer Referenzmessung. Die Korrektur der Messabweichung findet im Nachhinein rechnerisch durch Angleichung an die Messergebnisse der Referenz statt. Wird dahingegen das zu kalibrierende Messgerät so verändert, dass es künftig dieselben Messwerte wie die Referenz liefert, dann spricht man von einer Justierung. Die Eichung eines Gerätes hingegen darf nur von einem offiziellen Eichamt vorgenommen werden. Das zu eichende Instrument wird mit einer Referenz verglichen.

---

<sup>7</sup> parts per billion: eine Einheit zur Angabe der Konzentration eines Gases in der Luft (Volumenteile des Gases pro Milliarde Luftvolumenteile)

Abbildung 14: Grundkalibrierung eines NO<sub>2</sub>-Sensors



Quelle: Eigene Darstellung

## 4.2 Wie können Messungen mit Sensoren für die Luftqualität qualitätsgesichert durchgeführt werden?

Dieses Kapitel befasst sich mit der Qualitätssicherung von LQS-Messungen und insbesondere mit der Kalibrierung vor, während und nach der Messung, um interne Veränderungen (Drift) und externe Einflüsse zu korrigieren. In vielen Fällen ist es nicht möglich, eine genaue Kalibrierung von LQS durchzuführen, da dies sehr spezielle Materialien und Qualifikationen erfordert, die im Allgemeinen den Nutzenden nicht zur Verfügung stehen. In diesem Zusammenhang wird oft auch von Messwertvalidierung anstelle von Kalibrierung gesprochen.

### INFOKASTEN: Qualitätssicherung von LQS-Messungen

LQS müssen, wie jedes andere Messgerät, das im Bereich der Luftreinhaltung zum Einsatz kommt, behandelt werden und regelmäßigen Kalibrierungen vor Ort unterzogen werden.

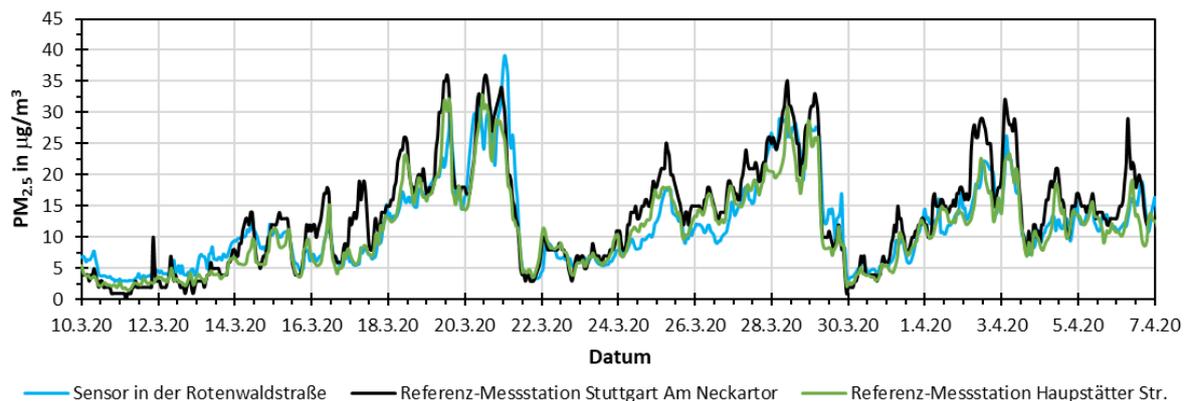
Die WMO unterscheidet zwischen **drei Stufen** der Qualitätssicherung für LQS. Je höher das Niveau, um so zuverlässiger sind deren Messergebnisse.

**Stufe I: Vergleichsmessungen.** Die Sensordaten werden mit Daten von nahe gelegenen Messstationen, Modell- oder Satellitendaten verglichen, um Trends in den Konzentrationsverläufen der Referenzdaten und der Sensordaten zu erkennen. Bei dieser Methode handelt es sich nicht um eine Kalibrierung, sondern um eine Validierung der Daten. So können beispielsweise LQS, die mit einer Niveau-II-Methode (s. u.) kalibriert wurden, anschließend mit der Niveau-I-Methode validiert werden.

Bei der Auswahl von Referenz-Messstationen muss der Standort des Sensors berücksichtigt werden. Generell sollten die Randbedingungen beider Messorte ähnlich sein. So sollte ein Sensor, der in einem verkehrsreichen Gebiet betrieben wird, mit Daten einer verkehrsnahen Messstation verglichen werden. Ein entsprechendes Beispiel ist in Abbildung 15 gezeigt, in der PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationsverläufe einander gegenübergestellt sind, die über einen Zeitraum von ca. einem Monat an drei unterschiedlichen Messstandorten aufgenommen wurden. An der verkehrsreichen Rotenwaldstraße wurde mit einem PM-LQS gemessen. Diese Messergebnisse wurden den Konzentrationsverläufen zweier Referenz-Messstationen, die in der Hauptstätter Straße und dem

Neckartor in Stuttgart betrieben werden, gegenübergestellt. Die Referenz-Messstation "Stuttgart Am Neckartor" ist Teil des Landesmessnetzes in Baden-Württemberg und wird von der LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) betrieben. Die Stundenmittelwerte der Referenz-Messstationen wurden von der Online-Datenbank UDO<sup>8</sup> heruntergeladen. Durch die räumliche Distanz der Standorte werden an den Messstationen und dem Sensor-Messstandort Unterschiede in den Messergebnissen erwartet, jedoch ist deutlich ersichtlich, dass die zeitliche Variation der Konzentrationen an den einzelnen Messstandorten sehr gut übereinstimmt.

**Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen an drei verkehrsreichen Messstandorten: an einem Sensor- und zwei Referenz-Messstandorten**



Sensor: OPC-R1 (Alphasense GmbH). Die Messungen wurden auf eine Stunde gemittelt

Quelle: Eigene Darstellung

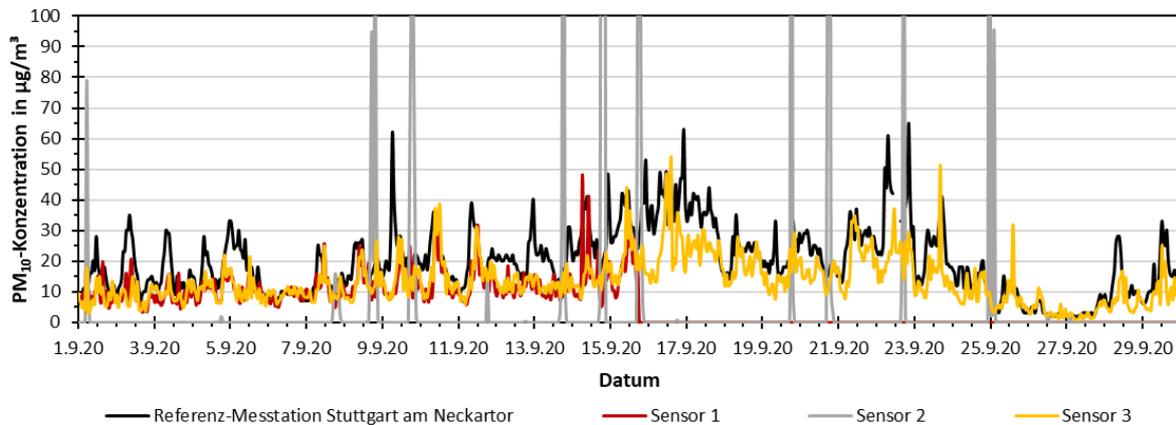
Protokolle, wie sie in Kapitel 3.5 und Anhang B erläutert sind, können in diesen Fällen hilfreich sein, wenn z. B. der Sensor ein Signal in den Daten aufweist, das von der oder den Referenz-Messstationen nicht registriert wurde. Dann kann evtl. ein im Protokoll festgehaltenes Ereignis dafür verantwortlich gemacht werden. So können Phänomene wie Nebel, hohe relative Luftfeuchtigkeit, Rauchentwicklung oder der benzinbetriebene Rasenmäher eines Nachbarn oder einer Nachbarin leicht als Grund für Einzelereignisse identifiziert werden.

Auch wenn die Sensoren bei solchen Vergleichen kleine Abweichungen in den Absolutwerten zeigen, so lassen sich die Sensoren aufgrund der sehr guten Übereinstimmung mit den Referenz-Messstationen für qualitative Analysen einsetzen.

Abbildung 16 zeigt ein weiteres Beispiel einer Vergleichsmessung mit drei PM-LQS, die an der Hauptstätter Straße in Stuttgart über einen Zeitraum von einem Monat am selben Messort betrieben wurden. Die Sensormessergebnisse werden parallel mit den Messergebnissen der Referenz-Messstation Stuttgart Am Neckartor (LUBW), die sich 3 km entfernt befindet, dargestellt. Für Sensor-1 wurden nur bis zum 15.09.2020 Daten aufgezeichnet, da er danach ausgefallen war. Sensor-2 hingegen zeigt durchweg einen anderen Trend als die Referenz-Messstation, mit unrealistisch hohen Konzentrationsspitzen, aber auch sehr niedrigen Werten. Sensor-3 zeigt über den gesamten Zeitraum hinweg einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Referenz-Messstation.

<sup>8</sup> <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/>

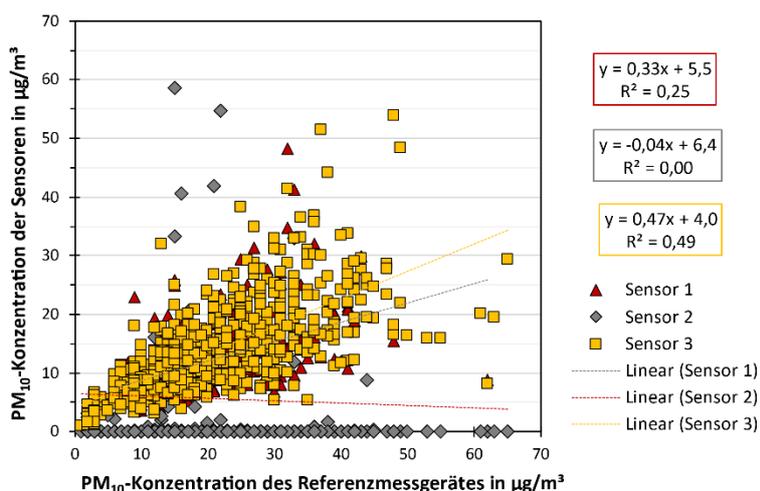
**Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen mit drei PM-LQS an einem Messtandort in der Hauptstätter Str. und der PM<sub>10</sub>-Konzentration an der Referenz-Messtation Stuttgart Am Neckartor**



Sensoren: OPC-R1 (Alphasense). Die Messungen wurden auf eine Stunde gemittelt  
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 17 liegt derselbe Datensatz wie Abbildung 16 zugrunde. Sie zeigt den direkten Vergleich der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen zwischen den LQS (Ordinate) und der Referenz-Messtation (Abszisse). Die Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) aus den linearen Regressionen geben eine Auskunft darüber, wie nahe die LQS-Messungen an den Referenzmessungen liegen. Ein Wert von  $R^2 \sim 1$  deutet auf einen starken Zusammenhang hin. Ein nur geringer Zusammenhang besteht, wenn das Bestimmtheitsmaß nur sehr kleine Werte ( $R^2 \sim 0$ ) annimmt. Ein  $R^2$  von 1 ist nicht zu erwarten da die LQS an anderen Orten als das Referenzmessgerät aufgestellt sind. Jedoch nimmt das Bestimmtheitsmaß normalerweise zu, je näher die Sensor-Messtandorte an der Referenz-Messtation liegen.

**Abbildung 17: Anpassung der Sensordaten an das Referenzmessgerät**



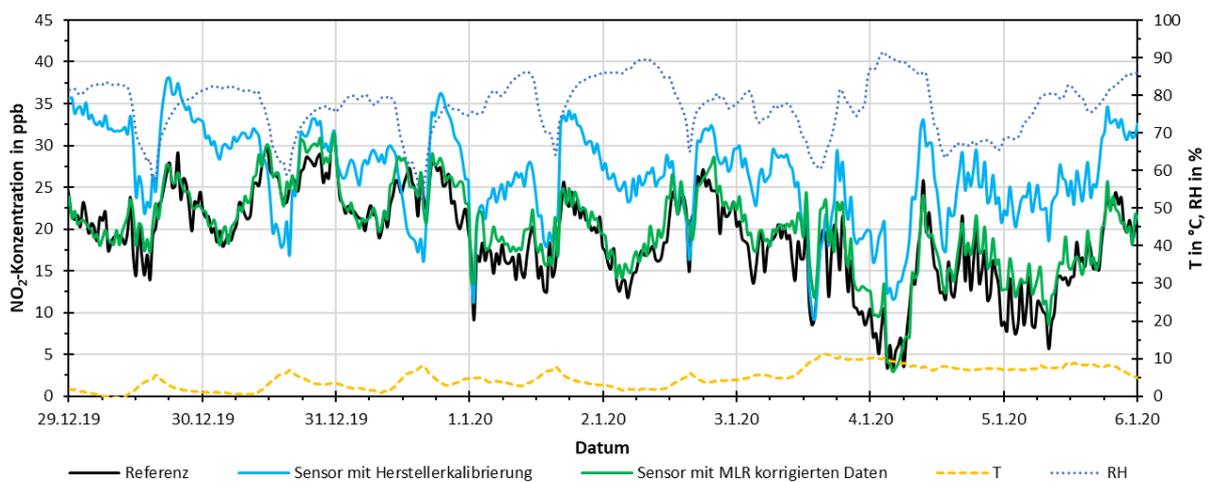
Sensoren: OPC-R1 (Alphasense)  
Quelle: Eigene Darstellung

**Stufe II: Kollokation.** Die LQS befinden sich hierbei in der Nähe einer Referenz-Messtation (< 10 m) und zwar in der gleichen Höhe wie der Messeinlass des Referenzmessgeräts. Die

Parallelmessungen sollten für einen Zeitraum von mindestens zwei Wochen durchgeführt werden. Durch die Kollokation der LQS mit dem Referenzmessgerät können die Sensordaten mit Hilfe von Daten, die mit verschiedenen Methoden gewonnen werden, korrigiert werden.

Somit können Einflüsse, die sich auf meteorologische Parameter und auf Querempfindlichkeiten gegenüber anderen Gasen zurückführen lassen, berücksichtigt werden. Eine der am häufigsten verwendeten Methoden ist dabei die multilineare Regression (MLR). In Kapitel 4.5 werden mehrere Methoden zur Korrektur der Daten der LQS im Detail erklärt. Abbildung 18 zeigt ein Beispiel dafür, wie eine Korrektur der Daten durch Kollokation dazu beitragen kann, bessere Messergebnisse zu erhalten. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich durch Anwendung der MLR-Methode die Sensor-Messdaten (grüne Kurve) sehr gut an die Kurve der Referenz-Messdaten (schwarze Kurve) angleichen lassen. Die Daten, welche ausschließlich über die Herstellerkalibrierung gewonnen wurden (blaue Kurve), weisen zwar größtenteils eine ähnliche Struktur im zeitlichen Verlauf auf, sie sind aber im Mittel um den Faktor 1,5 höher als die über die MLR-Methode korrigierten Sensordaten.

**Abbildung 18: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der NO<sub>2</sub>-Konzentration eines Sensors mit Herstellerkalibrierung im Vergleich zum Referenzmessgerät und korrigierten Sensordaten auf Basis einer multilinearen Regressionsanalyse sowie Temperatur und Luftfeuchtigkeit**

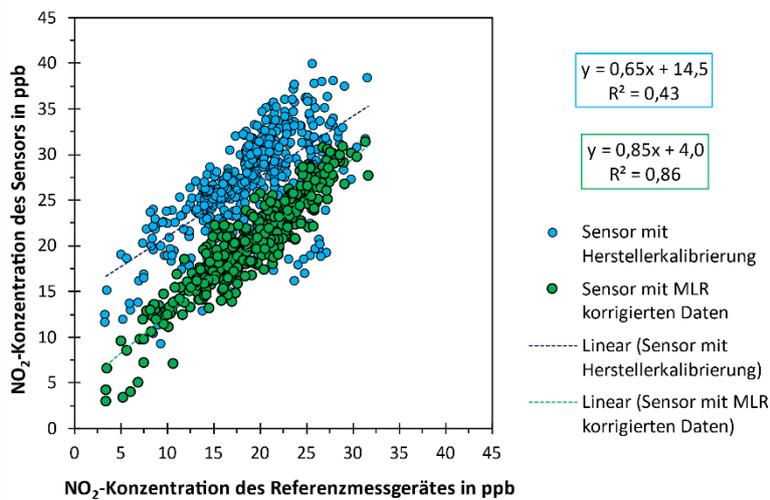


Sensor: B43F (Alphasense). Referenz: Model 405 (2B Technologies). Die Temperatur (T) und die relative Luftfeuchtigkeit (RH) sind auf der Sekundärachse dargestellt. Die Messungen wurden auf 30-Minuten gemittelt

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19 zeigt die linearen Regressionen eines Sensors mit MLR-Korrektur und mit Herstellerkalibrierung. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Steigung, die Achsenabschnitte und die Bestimmtheitsmaße bei dem Datensatz, der mit der MLR-Methode korrigiert wurde, besser sind als die Daten, die nur auf der Herstellerkalibrierung basieren.

**Abbildung 19: Lineare Regression der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Sensordaten bei unterschiedlichen Kalibrierungen gegenüber einem Referenz-Datensatz**



Sensor: B43F (Alphasense). Referenz: Model 405 (2B Technologies)

Quelle: Eigene Darstellung

Solche Korrekturen sind nur für einen kurzen Zeitraum und nur in dem Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich gültig, in dem die Messungen vorgenommen wurden.

Neue Ansätze versuchen LQS-Messungen mit maschinellem Lernen zu korrigieren. Allerdings haben auch diese Methoden ihre Grenzen, denn wie die MLR hängen auch diese Algorithmen von der Qualität der Messdaten ab, mit denen das Modell trainiert wurde, und schneiden tendenziell schlechter ab, wenn sie Daten von Ereignissen vorhersagen müssen, auf denen das Modell nicht trainiert wurde (z. B. eine Saharastaub-Episode oder deutlich höhere oder niedrigere Temperatur- oder Luftfeuchtigkeitswerte während der Messperiode im Vergleich zur Trainingsperiode).

**Stufe III: Kalibrierung.** Die LQS werden mit bekannten Konzentrationen unter Labor- oder Feldbedingungen beaufschlagt und die Messwerte mit den Resultaten von Referenzmessgeräten verglichen. Hierfür werden zertifizierte Referenzmaterialien benutzt. Das sind Substanzen (Feststoffe, Gase oder Flüssigkeiten) mit bekannten und eindeutigen Konzentrationen und Eigenschaften. Für die Kalibrierung von NO<sub>x</sub>-Messgeräten kommen beispielsweise zertifizierte Kalibriergase als Referenzmaterial zum Einsatz. Jeder Hersteller von Prüfgasen und Prüfaerosolen garantiert die Sollkonzentrationen mit einer bestimmten Genauigkeit, z. B.  $\pm 5\%$ .

Die LQS werden in kontrollierten Atmosphären, die eine definierte Konzentration der Messkomponente enthalten, in einer Expositionskammer (siehe Abbildung 20) den Kalibriergasen oder Prüfaerosolen ausgesetzt. In diesen Experimenten werden die Nachweisgrenzen, Ansprechzeit, Querempfindlichkeiten, Hysterese<sup>9</sup> usw. nach einem Prüfprotokoll bestimmt. Nach den Labortests werden die LQS nochmals unter realen Bedingungen getestet.

Eine technische Spezifikation für die Leistungsbewertung von LQS für gasförmige Komponenten wurde bereits ausgearbeitet (CEN/TC 264 (17660-1:2021)). Eine ähnliche technische Spezifikation für PM-Sensoren wird momentan erarbeitet.

<sup>9</sup> Bei einer Hysterese wird das Messsignal nicht nur durch die aktuelle Konzentration eines Luftschadstoffes bestimmt, sondern auch durch die Konzentrationen, denen der LQS zuvor ausgesetzt war.

#### Abbildung 20: Beispiel eine Expositions-kammern für LQS

---



Quelle: (L. Spinelle, M. Aleixandre and M. Gerboles 2013)

### 4.3 Wie wird die Qualitätssicherung der Referenzmessgeräte durchgeführt?

Auch die Referenzmessgeräte müssen aus Qualitätssicherungsgründen regelmäßigen Kalibrierungen unterzogen werden. Die geschulten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter kümmern sich um den Betrieb der Messstation. Dies beinhaltet wichtige Maßnahmen zur Qualitätskontrolle wie Gerätezulassung, Kalibrierung, Funktionskontrolle, Wartung, Austausch sowie die regelmäßige Entnahme und den Versand von Proben, die Vor- und Nachbereitung der Probenahmemedien oder die Aufbereitung von Messwerten. Die Arbeiten im Rahmen der Qualitätssicherung werden nach ISO/IEC 17025:2017 durchgeführt und die Resultate entsprechend dokumentiert.

### INFOKASTEN: Qualitätskontrolle von Referenzmessgeräten

Die wichtigsten Maßnahmen zur Qualitätskontrolle sind (Schleyer et al. 2013):

- **Gerätezulassung:** Bevor ein Messgerät in Betrieb genommen werden kann, ist es auf seine Funktionstauglichkeit zu prüfen. Nur Messgeräte, die mit standardisierten Referenzmessverfahren bzw. gleichwertige Messverfahren geprüft wurden, dürfen eingesetzt werden.
- **Kalibrierung:** Die Referenzmessgeräte werden regelmäßig mit zertifizierten Referenzmaterialien kalibriert. So können die Messwerte auf Primärstandards<sup>10</sup> zurückgeführt werden, welche die höchsten messtechnischen Ansprüche an die Genauigkeit erfüllen.
- **Funktionskontrolle:** Sämtliche Mess- und Sammelsysteme werden regelmäßig auf korrekte Funktion geprüft. Wichtige Elemente der Funktionskontrollen sind: Linearität, Wiederholpräzision, Rauschverhalten, Einfluss von Störkomponenten (Querempfindlichkeiten) und Vergleichsmessungen.
- **Wartung:** Geräteinstandsetzung und Revisionen (u. a. Reinigung und Austausch von Verschleißteilen) nach Vorgaben der Hersteller.
- **Austausch/Neubeschaffung:** Geräte, die die Funktionskontrolle nicht bestehen, werden vor Ort von qualifiziertem Personal überprüft und ggf. durch neue Geräte ersetzt. Nach einer Laufzeit von etwa zehn Jahren findet ein Austausch der Geräte statt.

## 4.4 Einsatzmöglichkeiten von Luftqualitätssensoren mit Bezug zu den Datenqualitätszielen

Wie in den vorangegangenen Unterkapiteln erläutert wurde, kann nicht jeder LQS, der z. B. in einem Citizen-Science-Sensornetzwerk integriert ist, stets den hohen Ansprüchen der Qualitätssicherung genügen, wie sie für ein Referenzmessgerät gefordert sind. Dies kann z. B. durch einen Mangel an zertifiziertem Kalibriermaterial oder einen Mangel an geschultem Personal und entsprechender Laborausstattung begründet sein. Dies führt häufig dazu, dass die Qualität der LQS-Messungen kaum oder gar nicht berücksichtigt wird und keine Kalibrierung zur Anwendung kommt. Messungen ohne entsprechende Qualitätskontrolle sollten aber niemals zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

Andererseits können Daten, die mit sorgfältig kalibrierten LQS erhoben wurden, zu einer der Daten-Kategorien gehören, die im Hinblick auf die Datenqualitätsziele für die Luftqualitätsbeurteilung (DQO) definiert wurden. Die DQO wurden in der EU-Richtlinie 2008/50/EC festgelegt. Die entsprechenden maximal zulässigen erweiterten Messunsicherheiten nach dieser Richtlinie sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

---

<sup>10</sup> Standards eines nationalen Referenzlabors

**Tabelle 3: Datenqualitätsziele (DQO) zur Luftqualitätsbeurteilung**

Die Prozentsätze entsprechen der maximal zulässigen erweiterten Messunsicherheit

| Schadstoff        | Ortsfeste Messungen | Orientierende Messungen | Objektive Schätzung |
|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| PM <sub>10</sub>  | 25 %                | 50 %                    | 100 %               |
| PM <sub>2,5</sub> | 25 %                | 50 %                    | 100 %               |
| NO <sub>2</sub>   | 15 %                | 25 %                    | 75 %                |
| NO <sub>x</sub>   | 15 %                | 25 %                    | 75 %                |
| O <sub>3</sub>    | 15 %                | 30 %                    | 75 %                |

Quelle: (39. BImSchV, Anlage 1)

Eine Klassifizierung der Sensorsysteme mit Bezug zur Einhaltung der Datenqualitätsziele wird in der technischen Spezifikation, vorgelegt vom Technischen Ausschuss CEN/TC 264 17660-1:2021 *Luftbeschaffenheit – Leistungsbewertung von Luftqualitätssensorsysteme – Teil 1: Gasförmige Schadstoffe in der Außenluft*, definiert.

Klasse 1 bezieht sich auf LQS-Systeme, die Daten liefern, die mindestens den DQO für orientierende Messungen entsprechen. Klasse 2 bezieht sich auf LQS-Systeme, die Daten liefern, die mindestens mit den DQO für objektive Schätzungen übereinstimmen. LQS, die in diese Kategorien fallen, können dazu verwendet werden, ergänzende Informationen zu ortsfesten Messungen zu übermitteln, vorausgesetzt, dass die Methode der Kalibrierung vor, während und/oder am Ende der Messungen eindeutig dokumentiert ist. Zusätzlich zu den beiden vorgenannten Klassen gibt es eine Klasse 3, die Messgeräte umfasst, die Daten liefern, die eine gewissen Ziel-Messunsicherheit erfüllen, aber nicht formell mit einem verbindlichen DQO verbunden sind. Im Gegensatz dazu müssen Referenzmessgeräte die erweiterte Unsicherheit der DQO für ortsfeste Messungen erfüllen, d. h. sie dürfen eine maximale erweiterten Messunsicherheit von  $\pm 15$  bzw. 25 % aufweisen, die strenger ist als alle oben genannten (siehe Tabelle 3). Eine weitere Anforderung der DQO ist, dass mindestens 90 % der Messwerte eines Jahres gültig sein müssen. Das bedeutet auch im Umkehrschluss, dass aus kurzfristigen Messungen nicht auf ein Jahresmittel hochgerechnet werden darf.

#### INFOKASTEN: Messergebnis und Messunsicherheit

Ein Messergebnis ohne Angabe einer Messunsicherheit ist nicht aussagekräftig.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse von LQS-Messungen mit Vorsicht zu interpretieren sind. Werden LQS nur mit der Herstellerkalibrierung ohne regelmäßige zusätzliche Kalibrierungen verwendet, können die Ergebnisse nur qualitativ verwendet werden. Wenn jedoch eine Kalibrierungsmethode verwendet und dokumentiert wird, können die LQS in vielen Anwendungen eingesetzt werden, in denen ihre Ergebnisse von zusätzlichem Wert sind.

## 4.5 Möglichkeiten zur Verbesserung der Messqualität beim Einsatz von Sensoren

Unabhängig von der Qualität einer LQS-Messung gibt es Unsicherheiten, die bei den Daten berücksichtigt werden müssen. Elektronisches Rauschen, Vibrationen oder einfach ein loses

Kabel können zu falschen Datenpunkten führen. Daher ist es wichtig die Messdaten nachzubearbeiten und sie auf Ausreißer<sup>11</sup> zu überprüfen. Zur Verbesserung der Qualität von Messdaten können physikalische Prinzipien eingesetzt werden, die auf den Mechanismen des Messprinzips basieren. Daneben existieren rein statistische Verfahren. Dazu gehören parametrisierte Modelle wie Regressionsmodelle zur Erfassung linearer oder nichtlinearer Wechselwirkungen und nichtparametrische Ansätze, einschließlich fortgeschrittener Algorithmen und Maschinelles Lernen (ML) (Liang 2021).

**Tabelle 4: Mögliche Verbesserungsmethoden für Daten von Messungen mit LQS**

|              | Physikalische Modelle (RH) | Parametrische Modelle | Maschinelles Lernen |
|--------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| PM-LQS       | ✓                          | ✓                     | ✓                   |
| LQS für Gase |                            | ✓                     | ✓                   |

### Auf Messung der relativen Luftfeuchte (RH) basierende physikalische Modelle

Ein  $\kappa$ -Faktor auf der Grundlage der Köhler-Theorie (Khvorostyanov and Curry 2007; Köhler 1936) beschreibt die Beziehung zwischen dem Trockenpartikeldurchmesser und den Wolkenkondensationskernen (kleine Partikel von typischerweise weniger als 2  $\mu\text{m}$  Durchmesser, an denen Wasserdampf kondensiert). Dieser Faktor kann zur Korrektur der verzerrten Umrechnung von Lichtstreuung in Partikelmassenkonzentration aufgrund der relativen Luftfeuchtigkeit verwendet werden. Ein genauer Wert von  $\kappa$  ist daher für die Durchführung dieser Korrektur unerlässlich. Dies lässt sich am besten durch die Korrektur der Messdaten von LQS mit Messdaten von Referenzgeräten erreichen, da der  $\kappa$ -Faktor je nach Zusammensetzung des Aerosols variieren kann (Di Antonio et al. 2018). Bei Messungen im städtischen Hintergrund und wenn kein Referenzinstrument verfügbar ist, kann jedoch ein auf der Literatur basierender Wert des  $\kappa$ -Faktors von 0,33 verwendet werden (Crilley et al. 2020). Unter Verwendung des  $\kappa$ -Faktors kann ein Korrekturfaktor  $C$  gemäß der Studie von Crilley et al. 2018 abgeleitet werden, der zur Korrektur der gemessenen Rohdaten von PM verwendet werden kann (Gleichung (1) und (2)).

$$C = 1 + \frac{\frac{\kappa}{\rho_p}}{-1 + \frac{1}{a_w}}, \quad (1)$$

$$PM_{\text{korr}} = \frac{PM_{\text{mess}}}{C} \quad (2)$$

mit  $a_w$  – gemessene relative Luftfeuchtigkeit RH/100;  $\kappa = 0,33$ ; Partikeldichte ( $\rho_p$ ) = 1,65 g/ml;  $PM_{\text{korr}}$  – korrigierter Messwert unter Anwendung des C-Faktors.

<sup>11</sup> Extremwerte, die u. a. durch Messfehler entstehen können und für eine Messreihe nicht repräsentativ sind

### INFOKASTEN: Anwendung der Köhler-Theorie

- Bestimmung des  $\kappa$ -Faktors oder Verwendung eines Wertes aus der Literatur (z. B.  $\kappa = 0,33$ )
- Aus der gemessenen relativen Luftfeuchte und dem  $\kappa$ -Faktor wird mit Gleichung (1) der Korrekturfaktor C ermittelt.
- Mit dem Korrekturfaktor C wird mittels Gleichung (2) aus der gemessenen PM-Konzentration die korrigierte PM-Konzentration berechnet.

### Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse umfasst eine Reihe von statistischen Methoden, die zur Schätzung der Beziehungen zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehrerer unabhängiger Variablen dienen. Sie kann verwendet werden, um die Stärke der Beziehungen (bei einer linearen Regression z. B. die Stärke des linearen Zusammenhangs) zwischen den Variablen zu bewerten und um Werte für die abhängige Variable auf Grundlage der unabhängigen Variablen zu berechnen.

Die einfache lineare Regression<sup>12</sup> ist eine Form der Regressionsanalyse, bei der eine lineare Beziehung zwischen den abhängigen (Referenzgerät) und den unabhängigen (LQS) Messwerten angenommen wird. Bei der einfachen linearen Regression wird davon ausgegangen, dass die Daten der LQS keine Fehler enthalten. Dies ist jedoch in den meisten Fällen nicht der Fall. Daher berücksichtigt das orthogonale Regressionsmodell, dass sowohl die abhängigen als auch die unabhängigen Variablen Fehler aufweisen können. Es wird häufig verwendet, um zu prüfen, ob zwei Instrumente dieselbe Größe messen und um die Auswirkungen von Messfehlern in den unabhängigen Variablen, in diesem Fall den Messdaten der LQS, zu berücksichtigen.

Die multilinare Regression ist ebenfalls eine Art der linearen Regression, berücksichtigt aber zusätzliche Prädiktoren oder unabhängige Variablen zur Erklärung der abhängigen Variablen. Bei LQS sind die am häufigsten berücksichtigten Prädiktoren die relative Luftfeuchte RH und die Temperatur T (Gleichung (3)). Die Koeffizienten  $a_0$  bis  $a_i$  sowie die *Konstante* werden aus Datensätzen berechnet, für die Werte sowohl für die Referenz als auch für die LQS sowie die Prädiktoren vorliegen (Venkatraman Jagatha et al. 2021; Hong et al. 2021).

$$\text{Referenz} = a_0 \cdot ELQS + a_1 \cdot \text{Präd}_1 + a_2 \cdot \text{Präd}_2 + \dots a_i \cdot \text{Präd}_i + \text{Konstante} \quad (3)$$

Aufgrund unterschiedlicher meteorologischer und umweltbezogener Bedingungen ist die Beziehung zwischen dem Referenzgerät und den LQS nicht immer ein lineares Signal. Die polynomische Regression ist eine Art der Regression, bei der eine nichtlineare Beziehung zwischen der abhängigen und der unabhängigen Variablen besteht. Für diese Analyse müssen unbedingt alle Ausreißer entfernt und ein breites Spektrum an Konzentrationen während der Labor- oder Kollokationsversuche erfasst werden. Andernfalls neigt das Modell dazu, eine verzerrte Schätzung zu liefern.

Regressionsanalysen können in der Regel nur von Nutzerinnen und Nutzern von LQS angewendet werden, die Erfahrungen in der Anwendung von statistischen Verfahren haben. Während eine

<sup>12</sup> genauer: univariate lineare Regression

einfache lineare Regression mit gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen durchgeführt werden kann, sind für komplexere Regressionsanalysen Programme notwendig, die z. B. in Programmpaketen für die frei zugängliche Programmiersprache R zu finden sind.

## Maschinelles Lernen

Einige Autoren haben Modelle des maschinellen Lernens implementiert, um Sensordaten gegen nichtlineare Reaktionen zu korrigieren. Diese neue Perspektive zur Berücksichtigung von Querempfindlichkeiten und der Abhängigkeit von meteorologischen Effekten hat in vielen Studien zu gut Ergebnissen geführt (Spinelle et al. 2015; Topalović et al. 2019; Wang et al. 2020; Wei et al. 2018; Zimmerman et al. 2018). Die am häufigsten angewandten Algorithmen im Bereich der Luftqualität sind Random Forest (RF), Gradient Boosting Decision Tree und Künstliche Neuronale Netze (ANN). In den folgenden Ausführungen wird eine Einführung in diese Modelle gegeben:

- ▶ **Random Forest (RF)** kombiniert die Ergebnisse vieler verschiedener Entscheidungsbäume, um bestmögliche Entscheidungen zu treffen. Jeder Baum hängt von den Werten zufälliger Vektoren ab, die unabhängig voneinander und mit der gleichen Verteilung für alle Entscheidungspfade simuliert werden. Das kombinierte Ergebnis der Entscheidungsbäume hilft, eine genauere und stabilere Vorhersage zu erhalten. Bei der Angabe der Gewichtung (impact score) für jedes Merkmal ist jedoch Vorsicht geboten, um eine Überanpassung des Modells zu vermeiden.

Ähnlich wie RF ist auch **Gradient Boosting Decision Tree** eine Ensemble-Lernmethode. Anstatt jedoch viele Ergebnisse verschiedener Entscheidungsbäume am Ende zu kombinieren, werden die Ergebnisse bereits während des Optimierungsprozesses kombiniert. Der iterative Prozess hilft dabei, das in jedem Schritt eingeführte Merkmal zu verbessern, um aus den Fehlern des im vorherigen Schritt eingeführten Merkmals zu lernen (Müller u. Guido 2017).

- ▶ **Künstliche neuronale Netze (ANN)** sind eine architektonische Struktur, die aus einer großen Anzahl paralleler, stark miteinander verbundener Verarbeitungseinheiten oder Knoten besteht, die als künstliche Neuronen bezeichnet werden, die Eingaben empfangen und auf der Grundlage ihrer vordefinierten Aktivierungsfunktionen Ausgaben liefern. Alle Neuronen sind in Schichten oder Vektoren organisiert. Die Gewichtung der Neuronen wird durch den überwachten Lernprozess abgestimmt, um die optimalen Parameter zu erreichen. ANN haben im Vergleich zu herkömmlichen Regressionsmodellen und statistischen Modellen vielversprechende Ergebnisse geliefert. Ihr Blackbox-Charakter schränkt ihre Anwendung jedoch aufgrund von oftmals nicht gegebener Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ein (Bishop 2016).

Trotz verschiedener Modellierungsansätze gibt es keine einheitliche Lösung für die Kalibrierung von LQS. Daher kann ein **Ensemble-Modellierungsansatz** verwendet werden, bei dem die Vorhersagen mehrerer Modelle, die mit Hilfe verschiedener Algorithmen oder unterschiedlicher Trainingsdatensätze erstellt wurden, zusammengefasst werden, um ein optimales Ergebnis der Kalibrierung zu ermöglichen.

### **INFOKASTEN: mögliche zukünftige Entwicklungen**

Forschungsgruppen entwickeln derzeit Modelle zur Fernkalibrierung von LQS unter Verwendung von Daten aus entfernten offiziellen Stationen bzw. mobilen Messungen und mittels der Nutzung künstlicher Intelligenz (Chu et al. 2020; Miskell et al. 2018). Dies könnte in Zukunft die Kalibrierung von Sensornetzwerken und die Erkennung fehlerhafter Sensoren vereinfachen.

## 5 Projekte und Nutzergruppen mit Bezug zu Sensoren zur Messung von Luftqualität

### 5.1 Laufende Citizen Science Projekte im Bereich der Luftqualität

Die aktuell deutschlandweit agierenden Citizen-Science-Initiativen im Bereich der Messung der Luftqualität mit Sensoren finden Interessierte auf der Website „Bürger schaffen Wissen“<sup>13</sup>. Dort kann z. B. nach dem Stichwort „Luft“ gesucht werden.

Sensornetzwerke für Messungen der Luftqualität und deren Internetauftritte sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5: Information über Sensornetzwerke für Messungen der Außenluftqualität**

| Name   | Website   | Sprache            |
|--|---|--------------------|
| <a href="#">SenseBox</a>                                     | <a href="https://sensebox.de">https://sensebox.de</a>                     | Deutsch & Englisch |
| <a href="#">Sensor.Community</a><br>(ehemals Luftdaten.info) | <a href="https://sensor.community/de">https://sensor.community/de</a>     | Deutsch & Englisch |
| <a href="#">PurpleAir</a>                                    | <a href="https://www2.purpleair.com">https://www2.purpleair.com</a>       | Englisch           |
| <a href="#">Smart Citizen</a>                                | <a href="https://smartcitizen.me">https://smartcitizen.me</a>             | Englisch           |
| <a href="#">HabitatMap</a>                                   | <a href="https://www.habitatmap.org">https://www.habitatmap.org</a>       | Englisch           |
| <a href="#">Breathe London</a>                               | <a href="https://www.breathelondon.org">https://www.breathelondon.org</a> | Englisch           |

### 5.2 Wo kann man sich über Sensoren informieren?

In Deutschland ist der VDI-Statusreport - Sensorsysteme zur Messung der Luftqualität - Konkurrenz zu behördlichen Messungen oder sinnvolle Ergänzung?<sup>14</sup> verfügbar.

Die Umweltschutzbehörde der USA (EPA) bietet Informationen über LQS sowie Berichte über die Leistung verschiedener LQS an. Den direkten Link finden Sie hier: [Air Sensor Toolbox | US EPA](#)<sup>15</sup>. Der US-amerikanische South Coast Air Quality Management Distrikt stellt ebenfalls nützliche Sensorauswertungen auf seiner Webseite „[Sensors](#)“<sup>16</sup> zur Verfügung.

Die Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (engl. Joint Research Centre, JRC)) führt eigene LQS-Bewertungen durch. Die Ergebnisse sind öffentlich und können im JRC-

<sup>13</sup> <https://www.buergerschaffewissen.de/>

<sup>14</sup> <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/sensorsysteme-zur-messung-der-luftqualitaet-konkurrenz-zu-behoerdlichen-messungen-oder-sinnvolle-ergaenzung>

<sup>15</sup> <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox>

<sup>16</sup> <http://www.aqmd.gov/aq-spec/sensors>

Repository eingesehen werden: [JRC Publications Repository - Review of sensors for air quality monitoring<sup>17</sup>](#)

Einen Bericht der Europäischen Umweltagentur über die Bewertung der Luftqualität durch Citizen Science finden Sie hier: [Assessing air quality through citizen science<sup>18</sup>](#)

Der Bericht der WMO über den Stand der Technik in Bezug auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit verschiedener LQS für die Messung der Zusammensetzung der Atmosphäre unter Verwendung von Informationen aus Labor- und Feldversuchen ist hier verlinkt: [An Update on Low-cost Sensors for the Measurement<sup>19</sup>](#)

Airparif (eine regionale französische Umweltbehörde) organisiert einen Wettbewerb für kommerzielle Luftqualitätssensorsysteme. Die Ergebnisse werden in [Microsensor challenge edition 2021 | AIRLAB<sup>20</sup>](#) publiziert.

[Low-Cost Sensors - Aerosol and Air Quality Research<sup>21</sup>](#) ist eine Sammlung der neuesten frei zugänglichen Literatur (open access literature) zu LQS.

Das JRC arbeitet am Projekt [AirSensEUR<sup>22</sup>](#), das auf die Entwicklung einer günstigen (unter 1.000 Euro) offenen Software-/Hardware-Multisensorplattform abzielt, die auch in der Lage ist, die Luftverschmutzung bei niedrigen Konzentrationen zu überwachen. AirSensEUR ist ein offenes Netzwerk, das auf möglichst genaue mobile Messungen mit LQS spezialisiert ist. Das Netzwerk stellt eine Reihe von elektronischen Platinen, Firmware und mehrere Softwareanwendungen zur Verfügung.

---

<sup>17</sup> <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116534>

<sup>18</sup> <https://www.eea.europa.eu/publications/assessing-air-quality-through-citizen-science>

<sup>19</sup> [https://library.wmo.int/index.php?id=21508&lvl=notice\\_display](https://library.wmo.int/index.php?id=21508&lvl=notice_display)

<sup>20</sup> <http://www.airlab.solutions/en/projects/microsensor-challenge>

<sup>21</sup> <https://aaqr.org/categories/low-cost-sensors>

<sup>22</sup> <https://airsenseur.org/website/>

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Interesse und die Sensibilität der Menschen in Deutschland für das Thema Luftqualität und die damit verbundenen Gesundheitsrisiken sind im Laufe der Zeit deutlich gestiegen. Das verstärkte Bewusstsein für Fragen der Luftqualität, gepaart mit der Entwicklung von Mikrosensortechnologien in jüngster Zeit, hat zu neuen Möglichkeiten der Messung mit Luftqualitätssensoren (LQS) geführt. LQS haben den Vorteil, dass sie kostengünstig und einfach zu handhaben sind und daher sowohl für die Wissenschaft, für Verbände, Vereinigungen und Akteure der Zivilgesellschaft und auch einzelne Bürgerinnen und Bürger attraktiv sind. LQS nehmen heute eine hilfreiche Rolle bei der Messung und Untersuchung von Luftqualität ein. Sie sind jedoch aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und Datenqualität noch immer nur begrenzt einsetzbar. Mit LQS ist es hinsichtlich ihrer Leistung und der Rechtsicherheit in der Regel nicht möglich, die Einhaltung von Grenz- oder Zielwerten zu überwachen. Die zeitliche Auflösung von LQS wird durch eine angemessene Mittelungszeit bestimmt, in der aussagekräftige Daten generiert werden können, da Einzelwerte weder zweckmäßig noch verlässlich sind. Messergebnisse sind nur vergleichbar, wenn die erfassten Zeiträume und die Messmethoden vergleichbar sind. Dafür sind umfangreiche Testprogramme qualifizierter Labore notwendig.

Die Qualitätssicherung, also die Anwendung von Methoden zur Sicherstellung einer ausreichenden Qualität der Daten, ist ein wesentlicher Aspekt der Messungen mit LQS. Leider wird diese oftmals vernachlässigt. Dass die Herstellerkalibrierung nicht ausreicht, um gute Ergebnisse zu erzielen, ist gut dokumentiert. Aufgrund von Faktoren wie der Alterung, der Drift und standortspezifischer Besonderheiten ist eine regelmäßige Kalibrierung der LQS vor, während und nach Messungen erforderlich, um die zeitliche Stabilität der LQS sicherzustellen. Zudem sind die Datenvalidierung und die Datendokumentation essentiell um aussagekräftige Messwerte zu erhalten. Ohne Qualitätssicherung besteht die Gefahr von Fehlinterpretationen. Es gibt zahlreiche Methoden, um die Zuverlässigkeit von LQS-Messungen bis zu einem gewissen Grad zu verbessern: von Mittelwertbildung und linearen Regressionen über physikalische Theorien bis hin zum maschinellen Lernen.

LQS sind für qualitative Messungen prinzipiell geeignet. Mit guter Messpraxis und Qualitätssicherungsmaßnahmen ist es möglich, LQS zudem als ergänzende Messinstrumente zu behördlichen Messungen einzusetzen. LQS bieten interessante Möglichkeiten (z. B. die Identifizierung von lokalen Belastungsschwerpunkten und die Bestimmung der persönlichen Belastung von einzelnen Menschen) für Citizen-Science-Netzwerke, die dazu beitragen können, das Bewusstsein und die wissenschaftliche Aufmerksamkeit für Luftverschmutzung zu erhöhen und gleichzeitig das Wissen zur Variabilität der Luftqualität in Zeit und Raum sowie in Bezug zu Schadstoffquellen voranzubringen.

Dennoch können LQS den hohen Ansprüchen der Qualitätssicherung, wie sie für ein Referenzmessgerät gefordert sind, derzeit nicht genügen. Dies führt häufig dazu, dass die Qualität der LQS-Messungen kaum oder gar nicht berücksichtigt wird und keine Kalibrierung zur Anwendung kommt. Die Ergebnisse von LQS-Messungen sind daher mit Vorsicht zu interpretieren und sollten ohne entsprechende Qualitätskontrolle niemals zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

Die Welt der LQS und ihrer Datenverarbeitung entwickelt sich in rasantem Tempo weiter. Die Zukunft der LQS ist daher sehr vielversprechend, denn die Hersteller bringen Modelle mit immer fortschrittlicheren Technologien auf den Markt, welche immer empfindlicher werden und auch

schon auf sehr geringe Konzentrationen ansprechen. In Kombination u. a. mit automatisierten Methoden zur Kalibrierung der Sensoren kann dadurch die Qualität der Messergebnisse erheblich gesteigert werden. Der Prozess der Miniaturisierung, die Digitalisierung und die Vernetzung über das Internet werden weiter zunehmen, was die breite Anwendung von LQS weiter befördern wird. Umso wichtiger ist es, dass alle, die mit solchen Sensoren umgehen, zu deren Funktionsprinzipien, den Einschränkungen, den notwendigen Maßnahmen bei der Messung und der Interpretation der Daten, aber auch über die Möglichkeiten und Potentiale der Luftqualitätssensoren informiert sind.

## Definitionen

**Tabelle 6: Definition von häufig gebrauchten Begriffen zur Beschreibung von Luftqualitätsmessgeräten**

| Parameter                       | Parameter auf Englisch           | Definition  |
|---------------------------------|----------------------------------|---|
| Ansprechzeit ( $t_{90}$ )       | Response time ( $t_{90}$ )       | Zeitintervall, das vergeht, bis nach einem schlagartigen Konzentrationsprung 90 % des Endwertes erreicht wird (Gründler 2012)   |
| Auflösung                       | Resolution                       | Die kleinste Konzentrationsdifferenz, die bei kontinuierlicher Änderung der Zusammensetzung unterschieden werden kann (Gründler 2012)   |
| Aufwärmzeit                     | Warm-up time                     | Zeitbedarf vom Einschalten des Sensors bis zum Erreichen seiner optimalen Messbedingungen   |
| Bestimmungsgrenze               | Quantification limit             | Kleinste Konzentration, die mit einer (vereinbarten) Sicherheit von 95 % von der Nachweisgrenze unterschieden werden kann (VDI 2449 Blatt 1)  |
| Driftverhalten                  | Drift                            | Kontinuierliche oder inkrementelle Veränderung der Messung im Laufe der Zeit aufgrund von Änderungen der Eigenschaften eines Sensorsystems (JCGM 200, 2012)   |
| Empfindlichkeit                 | Sensitivity                      | Die Änderung des Messwertes pro Konzentrationseinheit des Analyten. Dies entspricht dem Anstieg einer Kalibrierkurve (Gründler 2012)  |
| Erweiterte Messunsicherheit     | Expanded measurement uncertainty | Produkt aus einer kombinierten Standardmessunsicherheit und einem Faktor größer als die Zahl eins (JCGM 200, 2012)  |
| Genauigkeit                     | Accuracy                         | Grad der Übereinstimmung zwischen einem Ermittlungsergebnis oder einem Messergebnis und dem wahren Wert; Genauigkeit bezieht sich auf eine Kombination aus Richtigkeit und Präzision (DIN ISO 3534-2:2013-12). Ein Messgerät ist genau, wenn es sowohl eine hohe Präzision als auch eine hohe Richtigkeit aufweist (Williams et al. 2014) |
| Kalibrierung                    | Calibration                      | Vorgehensweise, die unter festgelegten Bedingungen den Zusammenhang zwischen dem Messsignal der automatischen Messeinrichtung und dem entsprechenden Wert der anzuwendenden Referenz liefert (DIN EN ISO 9169:2006)   |
| Lebensdauer                     | Lifetime                         | Zeit, über die der Sensor funktionstüchtig bleibt. Die hängt stark vom Driftverhalten eines Sensors ab (Gründler 2012)  |
| Linearität                      | Linearity                        | Die prozentuale Abweichung der experimentell ermittelten Kalibrierkurve von einer idealen Geraden. Diese Größe wird meist auf einen bestimmten Konzentrationsbereich bezogen (Gründler 2012)  |
| Messbereich oder Arbeitsbereich | Dynamic range                    | Der Konzentrationsbereich zwischen Nachweisgrenze und oberer Grenzkonzentration, die noch signifikante Werte liefert (Gründler 2012)  |

| Parameter                       | Parameter auf Englisch        | Definition   |
|---------------------------------|-------------------------------|--|
| Nachweisgrenze                  | Detection limit               | Kleinste Konzentration, die mit einer (vereinbarten) Sicherheit von 95 % von einem Zustand Null unterschieden werden kann (VDI 2449 Blatt 1)   |
| Querempfindlichkeit             | Cross-sensitivity             | Reaktion eines Sensors auf einen Analyten, der nicht die Messgröße darstellt.  |
| Selektivität                    | Selectivity                   | Ein Ausdruck für die Frage, ob ein Sensor selektiv auf eine Gruppe von Substanzen oder gar spezifisch für eine einzelne Substanz anspricht (Gründler 2012)   |
| Stabilität                      | Stability                     | Die Fähigkeit des Sensors, seine Leistungsfähigkeit für ein bestimmtes Zeitintervall beizubehalten. Als Maß für die Stabilität wird oft das Driftverhalten benutzt (Gründler 2012)   |
| Unsicherheit                    | Uncertainty                   | Parameter, der die Streuung der Messergebnisse beschreibt. Angepasst von DIN ISO 3534-2:2013-12  |
| Wasserdampf-Querempfindlichkeit | Water vapor cross-sensitivity | Unerwünschte Reaktion eines Sensors auf Wasserdampf  |
| Wiederholpräzision              | Repeatability                 | Präzision unter Beobachtungsbedingungen, bei denen voneinander unabhängige Ergebnisse nach demselben Verfahren an identischen Untersuchungseinheiten in demselben Laboratorium von demselben Bearbeiter mit derselben Geräteausrüstung innerhalb einer kurzen Zeitspanne ermittelt werden (DIN ISO 3534-2:2013-12) |
| Zeitliche Auflösung             | Time resolution               | Kleinste Zeiteinheit, die ein LQS- oder ein anderes Messsystem anzeigen kann   |

## Literaturverzeichnis

- Alfano, Brigida; Barretta, Luigi; Del Giudice, Antonio; Vito, Saverio de; Di Francia, Girolamo; Esposito, Elena et al. (2020): A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. In: *Sensors* (Basel, Switzerland) 20 (23). DOI: 10.3390/s20236819.
- Baron, Ronan; Saffell, John (2017): Amperometric Gas Sensors as a Low Cost Emerging Technology Platform for Air Quality Monitoring Applications: A Review. In: *ACS sensors* 2 (11), S. 1553–1566. DOI: 10.1021/acssensors.7b00620.
- Baumbach, Günter (1996): *Air quality control*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bishop, Christopher M. (2016): *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, NY: Springer New York (Information Science and Statistics). Online unter <http://www.springer.com/>
- Bundesministerium für Justiz, Deutschland (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen—39. BImSchV). Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_39/BJNR106510010.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/BJNR106510010.html), zuletzt geprüft am 01.02.2022.
- Chu, Hone-Jay; Ali, Muhammad Zeeshan; He, Yu-Chen (2020): Spatial calibration and PM2.5 mapping of low-cost air quality sensors. In: *Scientific reports* 10 (1), S. 22079. DOI: 10.1038/s41598-020-79064-w.
- Crilley, Leigh R.; Shaw, Marvin; Pound, Ryan; Kramer, Louisa J.; Price, Robin; Young, Stuart et al. (2018): Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. In: *Atmos. Meas. Tech.* 11 (2), S. 709–720. DOI: 10.5194/amt-11-709-2018.
- Crilley, Leigh R.; Singh, Ajit; Kramer, Louisa J.; Shaw, Marvin D.; Alam, Mohammed S.; Apte, Joshua S. et al. (2020): Effect of aerosol composition on the performance of low-cost optical particle counter correction factors. In: *Atmos. Meas. Tech.* 13 (3), S. 1181–1193. DOI: 10.5194/amt-13-1181-2020.
- DIN 33899-1:2014-02: Exposition am Arbeitsplatz – Leitfaden für die Anwendung direkt anzeigender Geräte zur Überwachung von Aerosolen – Teil 1: Auswahl des Monitors für besondere Anwendungsfälle
- DIN 33899-3:2014-09: Exposition am Arbeitsplatz – Leitfaden für die Anwendung direkt anzeigender Geräte zur Überwachung von Aerosolen – Teil 3: Ermittlung der Konzentration luftgetragener Partikel mit Photometern.
- DIN CEN/TS 17660-1:2021: Luftbeschaffenheit - Leistungsbewertung von Luftqualitäts-sensorsystemen - Teil 1: Gasförmige Schadstoffe in der Außenluft.
- DIN EN 14625:2012-12: Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie; Deutsche Fassung EN 14625:2012.
- DIN EN 14211:2012-11: Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz; Deutsche Fassung EN 14211:2012.
- DIN EN 13528-2:2002-12: Außenluftqualität - Passivsammler zur Bestimmung der Konzentrationen von Gasen und Dämpfen; Anforderungen und Prüfverfahren - Teil 2: Spezifische Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13528-2:2002.
- DIN ISO 3534-2:2013-12: Statistik – Begriffe und Formelzeichen – Statistik –Begriffe und Formelzeichen – Teil 2: Angewandte Statistik (ISO 3534-2:2006); Text Deutsch und Englisch.
- DIN EN ISO 9169:2006: Luftbeschaffenheit –Definition und Ermittlung von Verfahrenskenngrößen einer automatischen Messeinrichtung.
- Di Antonio, Andrea; Popoola, Olalekan A. M.; Ouyang, Bin; Saffell, John; Jones, Roderic L. (2018): Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter. In: *Sensors* 18 (9). DOI: 10.3390/s18092790.

European Commission (2019): EU Commission Staff Working Document Fitness Check of the Ambient Air Quality Directives Directive 2004/107/EC relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air and Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. Brussels: European Commission.

Grimm Aerosol Technik GmbH: Portable Laser Aerosol Spectrometer and Dust Monitor\_Model\_1108-1109.

Gründler, Peter (2012): Chemische Sensoren. Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Life Science & basic disciplines).

Gryparis, Alexandros; Forsberg, Bertil; Katsouyanni, Klea; Analitis, Antonis; Touloumi, Giota; Schwartz, Joel et al. (2004): Acute effects of ozone on mortality from the "air pollution and health: a European approach" project. In: American journal of respiratory and critical care medicine 170 (10), S. 1080–1087. DOI: 10.1164/rccm.200403-333OC.

Hemmingsen, Jette G.; Rissler, Jenny; Lykkesfeldt, Jens; Sallsten, Gerd; Kristiansen, Jesper; Møller P, Peter; Loft, Steffen (2015): Controlled exposure to particulate matter from urban street air is associated with decreased vasodilation and heart rate variability in overweight and older adults. In: Particle and Fibre Toxicology 12, S. 6. DOI: 10.1186/s12989-015-0081-9.

Hong, Gung-Hwa; Le, Thi-Cuc; Tu, Jing-Wei; Wang, Chieh; Chang, Shuenn-Chin; Yu, Jih-Yuan; Lin, Guan-Yu; Aggarwal, Shankar G.; Tsai, Chuen-Jinn (2021): Long-term evaluation and calibration of three types of low-cost PM<sub>2.5</sub> sensors at different air quality monitoring stations. In: Journal of Aerosol Science, Jg. 157, S. 105829. Online unter <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105829>

JCGM 200 (2012): international vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). Online verfügbar unter [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_200\\_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1), zuletzt geprüft am 03.02.2022.

Khvorostyanov, Vitaly I.; Curry, Judith A. (2007): Refinements to the Köhler's theory of aerosol equilibrium radii, size spectra, and droplet activation: Effects of humidity and insoluble fraction. In: J. Geophys. Res. 112 (D5). DOI: 10.1029/2006JD007672.

Köhler, Hilding (1936): The nucleus in and the growth of Hygroscopic droplets. In: Transactions of the Faraday Society 32, S. 1152–1161. DOI: 10.1039/TF9363201152.

L. Spinelle, M. Aleixandre and M. Gerboles (2013): Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution. JRC. Online verfügbar unter <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC83791/eur%20report%20protocol%20evaluation.pdf>, zuletzt geprüft am 26.08.2019.

Laquai, Bernd; Kroseberg, Bianca (2021): Comparison of a Computational Method for Correcting the Humidity Influence with the Use of a Low-Cost Aerosol Dryer on a SDS011 Low-Cost PM-Sensor.

Liang, Lu (2021): Calibrating low-cost sensors for ambient air monitoring: Techniques, trends, and challenges. In: Environmental research 197, S. 111163. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111163.

Lukeville, Anke (2019): Assessing air quality through citizen science. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Mallires, Kyle (2020): Novel Gas Sensor Solutions for Air Quality Monitoring. Online verfügbar unter <https://keep.lib.asu.edu/items/158761>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Mehta, A. J.; Zanobetti, A.; Koutrakis, P.; Mittleman, M. A.; Sparrow, D.; Vokonas, P.; Schwartz, J. (2013): Associations Between Short-term Changes in Air Pollution and Correlates of Arterial Stiffness: The Veterans Affairs Normative Aging Study, 2007–2011. In: American Journal of Epidemiology 179 (2), S. 192–199. DOI: 10.1093/aje/kwt271.

Miskell, Georgia; Salmond, Jennifer A.; Williams, David E. (2018): Solution to the Problem of Calibration of Low-Cost Air Quality Measurement Sensors in Networks. In: ACS sensors 3 (4), S. 832–843. DOI: 10.1021/acssensors.8b00074.

Münzel, Thomas; Gori, Tommaso; Al-Kindi, Sadeer; Deanfield, John; Lelieveld, Jos; Daiber, Andreas; Rajagopalan, Sanjay (2018): Effects of gaseous and solid constituents of air pollution on endothelial function. In: European heart journal. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy481.

Müller, Andreas Christian; Guido, Sarah (2017): Introduction to Machine Learning with Python. A guide for data scientists. Beijing, Boston, Farnham, Sebastopol, Tokyo: O'Reilly. Online unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4698164>

Peltier, Richard E.; Castell, Nuria; Clements, Andrea L.; Dye, Tim; Hüglin, Christoph; Kroll, Jesse H. et al. (2020): An Update on Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition. Geneva (WMO).

Pichlmaier, J. (1990): Kalibriertechnik für Gassensoren / Calibration techniques for gas sensors. In Technisches Messen 57 (JG). DOI: 10.1524/teme.1990.57.jg.419.

Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates: vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (L152/1), S. 1–44. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050>, zuletzt geprüft am 03.02.2022.

Schleyer, Ruprecht; Bieber, Elke; Wallasch, Markus (2013): Das Luftmessnetz des Umweltbundesamtes. Langzeitmessungen, Prozessverständnis und Wirkungen ferntransportierter Luftverunreinigungen. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/das\\_luftmessnetz\\_des\\_umweltbundesamtes\\_bf\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/das_luftmessnetz_des_umweltbundesamtes_bf_0.pdf), zuletzt geprüft am 02.01.2022.

Schulz, H.; Karrasch, S.; Bölke, G.; Cyrys, J.; Hornberg, C.; Pickford, R. et al. (2019): Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit – Teil I. In: Pneumologie (Stuttgart, Germany) 73 (5), S. 288–305. DOI: 10.1055/a-0882-9366.

Snyder, Emily G.; Watkins, Timothy H.; Solomon, Paul A.; Thoma, Eben D.; Williams, Ronald W.; Hagler, Gayle S. W.; Shelow, David; Hindin, David A.; Kilaru, Vasu J.; Preuss, Peter W (2013): The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. Environmental Science & Technology 47 (20), 11369-11377. DOI: 10.1021/es4022602

Spinelle, Laurent; Gerboles, Michel; Villani, Maria Gabriella; Aleixandre, Manuel; Bonavitacola, Fausto (2015): Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. In: Sensors and Actuators B: Chemical 215 (June (1–3)), S. 249–257. DOI: 10.1016/j.snb.2015.03.031.

Thompson, Jonathan E. (2016): Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors. In: Trends in Environmental Analytical Chemistry 11, S. 23–34. DOI: 10.1016/j.teac.2016.06.001.

Topalović, Dušan B.; Davidović, Miloš D.; Jovanović, Maja; Bartonova, Alena; Ristovski, Zoran; Jovašević-Stojanović, Milena (2019): In search of an optimal in-field calibration method of low-cost gas sensors for ambient air pollutants: Comparison of linear, multilinear and artificial neural network approaches. In: Atmospheric Environment 213 (2017), S. 640–658. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.06.028.

United Nations Environment Programme (2017): The right to breathe clean air. In: United Nations Environment Programme, 01.12.2017. Online verfügbar unter <https://www.unep.org/news-and-stories/story/right-breathe-clean-air>, zuletzt geprüft am 03.02.2022.

VDI 2066 Blatt 1, 05-2021: Messen von Partikeln; Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung.

VDI 2449 Blatt 1: Ermittlung von Verfahrenskenngrößen Ermittlung von Verfahrenskenngrößen für die Messung gasförmiger Schadstoffe (Immission).

Venkatraman Jagatha, Janani; Klausnitzer, André; Chacón-Mateos, Miriam; Laquai, Bernd; Nieuwkoop, Evert; van der Mark, Peter; Vogt, Ulrich; Schneider, Christoph (2021): Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air Quality Monitoring and Research. In: *Sensors* (Basel, Switzerland), Jg. 21, H. 12. DOI: 10.3390/s21123960

Wang, Wen-Cheng Vincent; Lung, Shih-Chun Candice; Liu, Chun-Hu (2020): Application of Machine Learning for the in-Field Correction of a PM<sub>2.5</sub> Low-Cost Sensor Network. In: *Sensors* (Basel, Switzerland) 20 (17). DOI: 10.3390/s20175002.

Wei, Peng; Ning, Zhi; Ye, Sheng; Li Sun; Yang, Fenhuan; Wong, Ka Chun et al. (2018): Impact Analysis of Temperature and Humidity Conditions on Electrochemical Sensor Response in Ambient Air Quality Monitoring. In: *Sensors* (Basel, Switzerland) 18 (2). DOI: 10.3390/s18020059.

WHO (2021): WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva.

Williams, R.; Vasu Kilaru; Snyder, E.; Kaufman, A.; Dye, T.; Rutter, A. et al. (2014): Air Sensor Guidebook. Hg. v. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC (EPA/600/R-14/159 (NTIS PB2015-100610)). Online verfügbar unter [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_Report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=277996](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=277996), zuletzt geprüft am 04.02.2022.

Zimmerman, Naomi; Presto, Albert A.; Kumar, Srinivasa P. N.; Gu, Jason; Hauryliuk, Aliaksei; Robinson, Ellis S.; Robinson, Allen L. (2018): A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. In: *Atmos. Meas. Tech.* 11 (1), S. 291–313. DOI: 10.5194/amt-11-291-2018.

## A Bauanleitung für Trockenstrecken beim Einsatz einfacher Luftqualitätssensoren



**Die Konstruktion eines Trockners erfordert Kenntnisse in Elektrotechnik!**

Ein Programm, um mit einem Arduino den Trockner für einen OPC-R1-Sensor zu steuern, kann man unter folgendem Link finden: <https://github.com/MiriamChacon/OPC-R1-with-air-dryer>

Eine ausführliche Bewertung eines kostengünstigen Trockners findet sich in dem folgenden wissenschaftlichen Artikel: <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2022-119/>

Für einen SDS011-Sensor der Fa. Nova Fitness gibt es auch hier eine Studie mit Trockenstrecke: [\(Laquai und Kroseberg 2021\)](#)

### Materialliste

- ▶ Messingrohr, Länge: 500 mm Innendurchmesser auf die Sensor-Ansaugung anpassen (SDS011: 7 mm, OPC-R1: 9 mm, OPC-N3: 8 mm) Wandstärke:  $\leq 1$  mm
- ▶ Wärmeleitfähiges Klebeband
- ▶ Widerstandsdraht 1,73  $\Omega$ /m
- ▶ Wärmebeständige Silikon-Zwillingsadern
- ▶ Schrumpfschlauch
- ▶ Isolierungsmaterial (z. B. Thermolarm 272 oder Silicawool). Wichtig! Es sollte hohe Temperaturbeständigkeit ( $>150$  °C) besitzen
- ▶ Aluminiumfolie
- ▶ PVC-Rohr. Länge: 500 mm, Durchmesser: auf den Durchmesser des Rohres mit Isolierung anpassen.
- ▶ Steckernetzteil, Festspannung von 12 V, 3 A, 36 W

### Liste der benötigten Werkzeuge/Hilfsmittel:

- ▶ Maßband
- ▶ Marker
- ▶ Schleifpapier
- ▶ Lötstation
- ▶ Seitenschneider
- ▶ Heißluftpistole
- ▶ Schere
- ▶ Labornetzteil

### Aufbau:

- |   |  |
|---|--|
| <p>1 Messen Sie die Gesamtlänge des Rohres und markieren Sie die Entfernung von 2,5 cm an beiden Enden des Rohres.</p>  |    |
| <p>2 Nehmen Sie das wärmeleitfähige Klebeband und entfernen Sie die Plastikfolie auf der Innenseite des Keramikrohrs, um es um das Rohr zu kleben. Danach entfernen Sie die Kunststoffolie auf der Außenseite des Bandes.</p> |   |
| <p>3 Nun wird mit einem Marker jeder Zentimeter auf dem Keramikband über die nutzbare Länge markiert.</p>   |  |

- 4 Man lässt den Widerstandsdraht 4 – 5 cm am oberen Ende des Rohres überstehen und beginnt mit dem Aufwickeln des Rohres. Der Abstand der einzelnen Windungen soll so gewählt werden, dass man fünf Windungen pro Zentimeter erhält. Am unteren Ende des Rohres lässt man ebenfalls 4 – 5 cm Widerstandsdraht überstehen, bevor man den Widerstandsdraht mit dem Seitenschneider abschneidet.



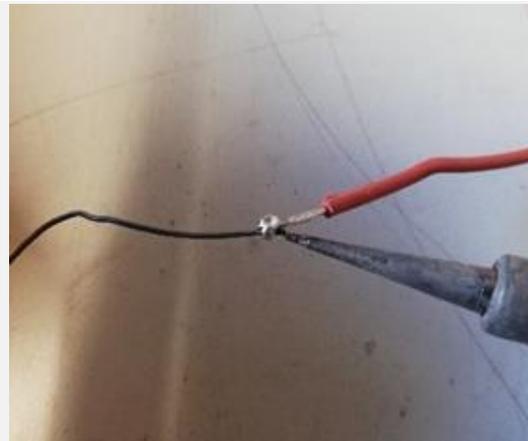
- 5 Anschließend werden die Enden (2-3 cm) des Widerstandsdrahts mit Schleifpapier abgeschliffen. Die graue Farbe der Patina des Drahtes muss komplett entfernt werden. Dies ist wichtig, um die richtige Spannung und den richtigen Strom zu messen und die erforderliche Heizleistung zu erreichen.



- 6 Benutzen Sie den Schrumpfschlauch an beiden Enden des Rohres, um den Draht am Rohr zu fixieren.



- 7 Löten Sie die wärmebeständigen Silikon-Zwillingsadern an die Enden des Drahtes und überprüfen Sie mit Hilfe eines Labornetzgerätes, dass der Strom ca. 0,97 A beträgt.



- 8 Optional für Sensor OPC-R1: Bei diesem Sensor ist es nicht möglich, ein Rohr zu verwenden, das dem Durchmesser seines Einlasses entspricht, da es aufgrund seines geringen Durchmessers zu viel Luftwiderstand bieten und der Lüfter stehen bleiben würde. Daher kann man eine Kupferplatte an das Ende des Trockners löten, damit der Sensor mit Hilfe der Schrauben befestigt werden kann.



- 8 Das Isoliermaterial soll dreifach über die Trockenstrecke gerollt werden. Schneiden Sie mit der Schere den Rest ab und kleben Sie es fest.



- 9 Dann rollen Sie eine doppelte Schicht Aluminiumfolie über das isolierte Rohr und kleben es fest.



- 10 Das isolierte Rohr sollte in das PVC-Rohr mit den berechneten Abmessungen eingeführt werden.



12 Der Trockenstrecke ist fertig!



## B Vorlage für ein Messprotokoll

### B.1 Vorlage für ein Messprotokoll – Beispiel 1

|   |                          |                      |                   |
|---|--------------------------|----------------------|-------------------|
| <b>Messprotokoll</b>                            |                          | <b>Nr.:</b>          |                   |
| <b>Name des Projekts:</b>                       |                          |                      |                   |
| <b>Messkampagne:</b>                            |                          |                      |                   |
| <b>Datum</b>                                    | <b>Anfang:</b>           | <b>Ende:</b>         |                   |
| <b>Zeit (UTC)</b>                               | <b>Anfang:</b>           | <b>Ende:</b>         |                   |
| <b>Geräte-Zeitversatz</b>                       |                          |                      |                   |
| <b>Ort und/oder Koordinaten:</b>                |                          |                      |                   |
| <b>Art der Messung</b>                          |                          |                      |                   |
| <b>Gemessene Parameter:</b>                     |                          |                      |                   |
| <b>Beschreibung (z. B. Stationsumfelds)</b>     | <b>Verwendetes Gerät</b> | <b>Zeitauflösung</b> | <b>Kommentare</b> |
|   |                          |                      |                   |
| <b>Kartenskizze</b>                             |                          |                      |                   |
| <b>Bemerkungen zum Verlauf der Messkampagne</b> |                          |                      |                   |
| <b>Durchgeführt von:</b>                        |                          |                      |                   |

