

Statuspapier Luftqualitätsüberwachung mittels low-cost-Sensoren

Stand Februar 2021

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren sind kostengünstige Messsysteme auf dem Markt verfügbar, die auf Sensortechnologien basieren und Luftschadstoffmessungen versprechen. Solche low-cost-Sensoren beruhen auf Elektrochemischen bzw. Metalloxid-Halbleiter-Messverfahren. Verschiedene Studien haben den Einsatz von Sensoren untersucht. Derzeit treten bei den Sensoren für NO₂, O₃ und Feinstaub noch diverse Schwierigkeiten auf.

Die Hauptprobleme sind:

- Sensoren sind nicht kalibrierbar und zeigen diverse Querempfindlichkeiten
- Sensoren driften häufig mit der Zeit und sind nicht langzeitstabil
- Sensoren haben meist eine kurze Lebensdauer in der Grössenordnung von Monaten.
- Ein Vergleich mit Referenzmessgeräten ist nötig, um die Einsatzmöglichkeiten eines Sensors zu evaluieren.

Somit sind low-cost-Sensoren heute noch weit davon entfernt, klassische kontinuierliche Messgeräte abzulösen. Für jegliche Anwendungen muss ein hoher Aufwand für Referenzmessungen sowie Quervergleiche mit eingerechnet werden, der in den niedrigen Anschaffungskosten nicht berücksichtigt wird.

In Kombination mit einem klassischen Messnetz (welches eine nachträgliche Kalibrierung der Sensoren sicherstellt und die Messwerte kontrolliert) können low-cost-Sensoren zukünftig möglicherweise ergänzend für Projekte eingesetzt werden. Denkbar wären z.B. stationäre Messungen mit räumlicher Verdichtung oder mobile Messungen, zur Quellencharakterisierung oder um Aktivitätsmuster oder Hotspots aufzuzeigen. Mögliche Anwendungen von Sensoren könnten sich auch auf die räumliche Auflösung in der Umgebung einer Station beschränken, ähnlich wie NO₂-Passivsammler. Derzeit ist die Datenqualität von Passivsammlern noch lange nicht erreichbar. Parallelmessungen für NO₂ zwischen Passivsammlern und Sensoren wurden vom Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) und von der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Schwankung von bis zu 10 µg/m³ (Stundenwert).

Einleitung

OSTLUFT überwacht die Luftqualität gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) mittels Messungen nach Messkonzept MK2012B. Zusätzlich werden Projekte mit vertieften Analysen zur Immissionsbelastung durchgeführt. Das Messprogramm umfasst dabei nach Bedarf die folgenden Messparameter: NO₂, NO_x, Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}), Russ (EC) und O₃. Bei speziell schadstoffbezogenen Fragestellungen können weitere Messparameter relevant sein, z.B. SO₂, Stickstoffdeposition, VOCs. Der durchschnittliche Kostenaufwand einer Messstation ist entsprechend hoch und verteilt sich auf einen stationsspezifischen sowie einen allgemeinen Aufwand, rund die Hälfte der Kosten sind dabei Personalkosten.

Alle Messstationen im OSTLUFT-Gebiet liefern vollständige, zuverlässige und rückverfolgbare Messreihen über einen langen Zeitraum und unter hohen Qualitätsstandards. Dies wird erreicht durch den Einsatz von Referenzmethoden, die Verwendung von geprüften und zertifizierten Messgeräten sowie die Teilnahme an Schweizweiten Ringversuchen. Zudem werden regelmässige Kalibrationen durchgeführt. So werden z.B. alle Gasmessgeräte am Messort im Abstand von mindestens drei Tagen automatisiert mit Prüfgas kalibriert, dazu kommen regelmässige Prüfgas-Kalibrationen von Hand, so dass die hohe Genauigkeit der Messwerte gewährleistet ist. Anhand der Messwerte wird die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte gemäss LRV überprüft. Die Lebensdauer von klassischen Messgeräten kann Jahrzehnte betragen.

Neben den kontinuierlichen Messungen stehen für einige Messparameter (z.B. NO₂, VOCs) auch kostengünstige Passivsammler zur Verfügung. Diese werden in ergänzend eingesetzt, um die räumliche Verteilung der Schadstoffe zu bestimmen. Passivsammler haben eine hohe Genauigkeit, liefern aber nur eine geringe zeitliche Auflösung (Grössenordnung 2-4 Wochen).

Seit einigen Jahren sind kostengünstige Messsysteme auf dem Markt verfügbar, die auf Sensortechnologien basieren und Luftschadstoffmessungen der Aussenluft in hoher zeitlicher Auflösung für wenig Geld versprechen. Solche Sensoren beruhen auf Elektrochemischen bzw. Metalloxid-Halbleiter-Messverfahren. Diese Messsysteme sind deutlich günstiger als konventionelle Messgeräte. Zudem sind sie kleiner, haben einen geringeren Stromverbrauch und liefern ihre Daten meist direkt an eine Datenzentrale. Nachfolgend wird der derzeitige Stand der Anwendungsmöglichkeiten einiger gängiger Sensoren zusammengefasst.

Übersicht neuer Techniken und Hersteller

Grundsätzlich werden zwei Arten von Sensoren unterschieden, einerseits das preislich wirkliche low-cost Segment, welches sehr kleine und sehr billige Sensoreinheiten umfasst (< 100 USD). Andererseits gibt es auch eine Art "Mittelklasse" Segment von Luftschadstoffmessgeräten. Diese kosten zwar immer noch weniger als herkömmliche Messgeräte, sind aber deutlich teurer als das low-cost Segment. Solche Geräte sind teilweise portabel oder kleinformig, teilweise für einige Stunden mit Akku betreibbar, aber häufig benötigen sie auch einen Stromanschluss. Das "Mittelklasse" Segment knüpft preislich an den Trend der ohnehin günstiger werdenden Messgeräte an. So wurden bei Ostluft in den letzten Jahren z.B. die TEOM Geräte zur Erfassung von Feinstaub durch günstigere Fidas Messgeräte abgelöst.

Die Webseite www.snuffle.org beinhaltet Informationen über die derzeit verfügbaren sensorbasierten low-cost Geräte zur Messung von Luftschadstoffen. Aktuell sind gemäss Webseite sensorbasierte Geräte für die folgenden

Luftqualitätsparameter verfügbar: O₃, NO₂, NO, NO_x, SO₂, CO, NH₃, VOC, PM₁₀, PM_{2.5}, Ultrafeine Partikel, PNC und Russ. Die Auswahl der Geräte pro Schadstoff ist gross - allein für z.B. NO₂ sind gemäss Webseite bis zu 23 verschiedene Sensoren von diversen Herstellern verfügbar.

Messen mit low-cost Sensoren

Der Preisbereich der low-cost-Sensoren umfasst kleine Messgeräte, die für den direkten Einsatz gedacht sind: Kaufen, auspacken und losmessen. Es liegt nahe, dass auf diese Weise keine hohe Genauigkeit gewährleistet ist. Sensor-Messgeräte werden vom Hersteller nur einmalig kalibriert. Das bedeutet, die Skala des Sensorsignals wird in die Einheiten der Messgrösse umgerechnet. Dies geschieht unter Bedingungen (Höhe, Druck, Temperatur) die meist nicht denen am Einsatzort entsprechen. Zudem verändern Sensoren ihre Eigenschaften durch Lagerung, Transport, Temperaturschwankungen oder Luftfeuchtigkeit und haben deshalb häufig auch nur eine begrenzte Lebensdauer. Um Sensoren für reproduzierbare und genaue Luftschadstoffmessungen einsetzen zu können, ist schnell ersichtlich, dass auch für Sensoren immer ein Aufwand an Kalibrationen, sowie Vergleiche mit Referenzgeräten nötig sind.

Qualitätskontrollen und -untersuchungen

In den letzten Jahren wurden bereits viele Tests und Studien zu einzelnen Low-cost Sensoren durchgeführt. Die aktuellste Zusammenfassung der bisherigen internationalen Literatur liefert der Bericht der World Meteorological Organization (Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications, 2018), sowie die zugehörige Webseite www.aqmd.gov/aq-spec. In der Schweiz wurden unter anderem Studien zu Sensorvergleichen (NO₂ und O₃) von der Empa durchgeführt (Sensortechnologien für die Messung von Luftschadstoffen, Empa, 2015), sowie Sensoren (PM und NO₂) im Rahmen einer Masterarbeit der Fachhochschule Nordwestschweiz untersucht (M. Frey, in-LUFT 2.0 · IoT Innovation für ein Luft- & Umweltmessnetz, 2017). Aus dem deutschsprachigen Raum gibt es unter anderem einen Bericht zu Feinstaubmessungen von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011, LUBW, 2017). Weiterhin wurden in der Schweiz Aussenluftmessungen mit Feinstaubsensoren (durch Einzelpersonen und auf Tramlinien) durch den Kanton Basel-Stadt und Partner durchgeführt und in Berichten dokumentiert (Atmo-VISION-Projekt, Basel-Stadt 2020).

1. Stand O₃:

Für Ozon gibt es zwei Messverfahren auf denen Sensoren basieren können (Elektrochemisch bzw. Metalloxid-Halbleiter). Abb.1 zeigt exemplarisch Vergleiche zwischen zwei Sensoren und einem Referenzgerät. Es ist deutlich ersichtlich, dass Referenzmessungen zwingend nötig sind, um die Güte eines Sensors zu beurteilen und als Qualitätskontrolle. Gemäss dem Bericht der World Meteorological Organization treten bei O₃ Sensoren derzeit noch folgende Schwierigkeiten auf:

- O₃ Sensoren "Elektrochemisch": Reagieren auf rel. Feuchte und Temperatur, Querempfindlichkeit mit anderen Gasen, nicht langzeitstabil (alterungsempfindlich oder Drift)

- O₃ Sensoren "Metalloxid": Lange Resonanzzeit (> 5 min), Resonanz ist nicht linear, reagieren auf rel. Feuchte und Temperatur, nicht langzeitstabil (Drift), andere Nulllinie nach jedem Neustart

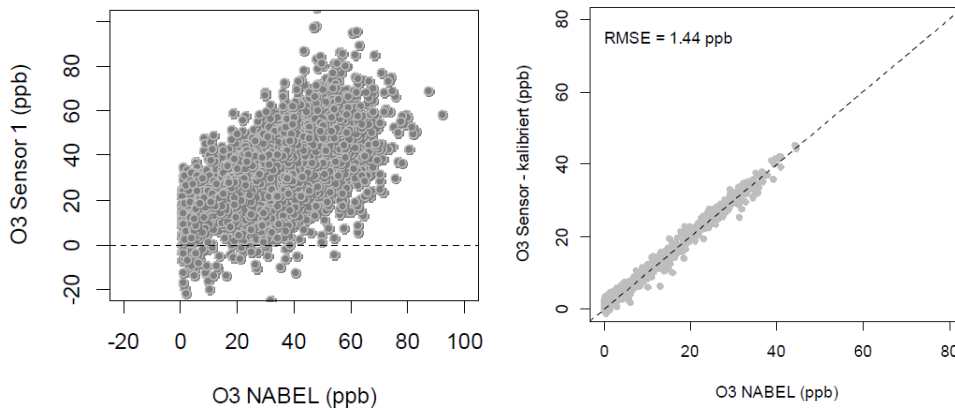


Abb. 1, Links: Streudiagramm eines elektrochemischen Sensors für O₃ gegen ein Referenzmessgerät (Daten 04-08 2014), mit starker Querempfindlichkeit. **Rechts:** Streudiagramm eines Metalloxid-Sensors für O₃ gegen ein Referenzmessgerät (Daten 09-11 2013), mit wenig Streuung nach Kalibration (unter Einbezug mehrtägiger Parallelmessung mit Referenzgerät). Beide Abbildungen entnommen aus: Sensortechnologien für die Messung von Luftschadstoffen, Empa, 2015.

2. Stand NO₂:

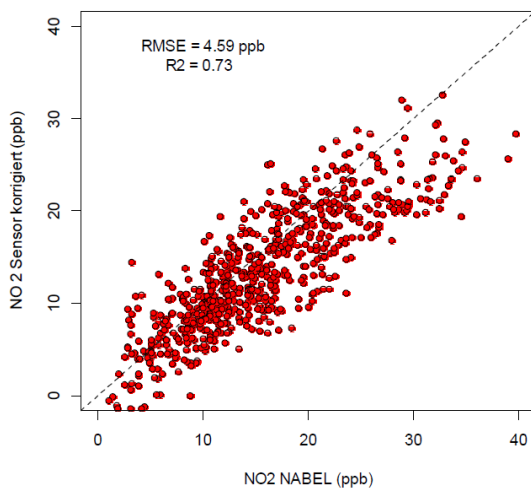


Abb. 2: Streudiagramm eines elektrochemischen Sensors für NO₂ gegen ein Referenzmessgerät (Daten 10-11 2014), nach Kalibration (unter Einbezug komplementärer O₃ Messungen). Entnommen aus: Sensortechnologien für die Messung von Luftschadstoffen, Empa, 2015.

Für NO₂ gibt es ebenfalls zwei Typen von Sensoren (Elektrochemisch bzw. Metalloxid-Halbleiter). Abb.2 zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen einem elektrochemischen Sensor und einem Referenzgerät. Der Sensor weist eine deutlich schlechtere Genauigkeit als das Referenzgerät auf. Gemäss dem Bericht der World Meteorological Organization treten bei NO₂ Sensoren derzeit noch folgende Schwierigkeiten auf:

- NO₂ Sensoren "Elektrochemisch": Reagieren auf rel. Feuchte und Temperatur, Querempfindlichkeit mit anderen oxidierenden Gasen, nicht langzeitstabil (alterungsempfindlich oder Drift), lange Anlaufzeit, bis sich ein Sensor stabilisiert hat
- NO₂ Sensoren "Metaloxid": Lange Resonanzzeit (> 5 min), Resonanz ist nicht linear, reagiert auf rel. Feuchte und Temperatur, nicht kurz- und langzeitstabil (Drift), andere Nulllinie nach Neustart

In der Schweiz wurden 2017 Vergleiche zwischen mehreren elektrochemischen NO/NO₂ Sensoren an vier kontinuierlichen Messstationen durchgeführt (Bigi et al., 2018). Anschliessend wurden die Sensordaten mit verschiedenen statistischen Methoden korrigiert. Dennoch lag die Unsicherheit der Sensordaten in diesen Feldmessungen bei etwa 10 µg/m³ (Stundenwerte), das ist bedeutend schlechter als die Unsicherheit bei den heute genutzten Passivsammlern.

3. Stand Feinstaub:

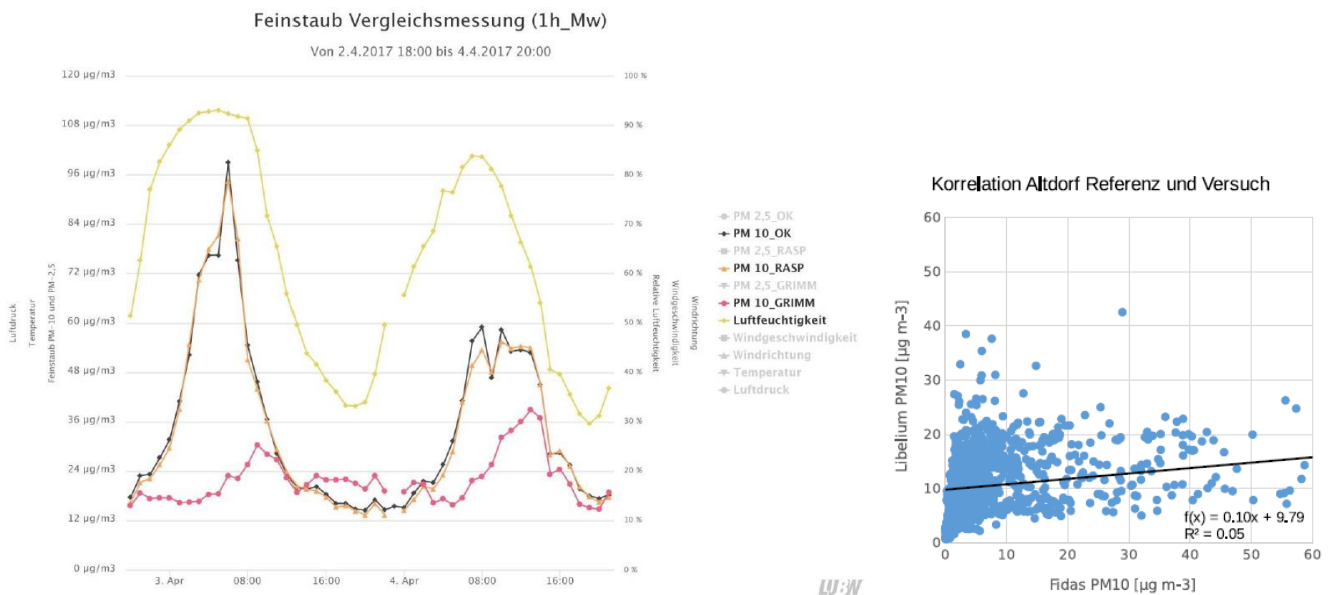


Abb. 3, links: Vergleich eines Sensors für PM10 gegen ein GRIMM-Referenzmessgerät. Entnommen aus: Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011, LUBW, 2017. **Rechts:** Vergleich eines PM10 Sensors mit Referenzmessgerät (Fidas), entnommen aus M. Frey, in-LUFT 2.0 · IoT Innovation für ein Luft- & Umweltmessnetz, 2017.

Zur Bestimmung von PM (10, 2.5 und 1) werden optische Sensoren verwendet (basierend auf Streulicht). Abb.3, links, zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen zwei Sensoren für PM10 und einem Referenzgerät. Die Sensoren reagieren deutlich auf die Luftfeuchte und weichen vom Referenzgerät ab. In Abb. 3, rechts, zeigt die lineare Abhängigkeit zwischen einem weiteren PM Sensor und einem Referenzgerät, die Korrelation ist schwach. Gemäss dem Bericht der World Meteorological Organization treten bei PM Sensoren derzeit noch folgende Schwierigkeiten auf:

- PM Sensoren: Reagieren auf rel. Feuchte, Temperatur und raues Klima. Variieren je nach Durchflussstabilität, Einfluss vom PM Eigenschaften sichtbar (Dichte, Farbe usw.)

Auch die kürzlich durchgeführte bereits erwähnte Studie mit Feinstaubsensoren in Basel-Stadt zeigte in Aussenmessungen grosse Messunterschiede zwischen preisgünstigen Mikrosensoren und offiziellen Messstationen. Aufgrund der Messunsicherheit konnten die Sensordaten nur für relative Vergleiche verwendet werden.

Anhang

Sonstige Sensor-Projekte in der Schweiz:

Opensense Projekt (SNF Number: 20NA21 128839), 2014-2015, Teilnehmer u.a. Empa und ETH Zürich.

Beinhaltet Luftschadstoffmessungen an zehn Zürcher Trams durch mobile Messstationen. Erstellung von Belastungskarten für die Stadt Zürich.

Stadtklima Projekt, AWEL Zürich, seit 2019. Beinhaltet Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen mittels Sensoren an ca. 50 Standorten im Kanton Zürich. Ergänzung modellierter Klimaanalysekarten um reale Messwerte.

CarboSense4D Projekt, von Empa, Swiss Data Science Center (SDSC) und Center for Climate Systems Modeling (C2SM), seit 2017. Sensornetzwerk zur Messung von CO₂, Schweizweit und mit verdichteten Messungen in der Stadt Zürich.

Literatur

Basel-Stadt und Atmo-VISION, Untersuchung der Luftqualität in der Region des Oberrheins, 2020. Webseite: <https://atmo-vision.eu/de/>

Bigi et al., Performance of NO, NO₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application, Atmos. Meas. Tech., 11, 3717–3735, 2018

Empa, Sensortechnologien für die Messung von Luftschadstoffen, 2015

Frey, M., in-LUFT 2.0, IoT Innovation für ein Luft- & Umweltmessnetz, 2017

LUBW, Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011, 2017

World Meteorological Organization, Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications, 2018, www.aqmd.gov/aq-spec.