

Berlin, 25. Mai 2022
29. WaBoLu-Innenraumtage

Konstruktion, Validierung und Pilotstudie eines Multiparametersystems zur Messung der Innenraumlufthqualität in Schulen

*Stefan Schumacher¹, Arantxa Banda Sanchez¹, Ute Schneiderwind¹, Christof Asbach¹
Stefan Bieder², Thorsten Schultze²*

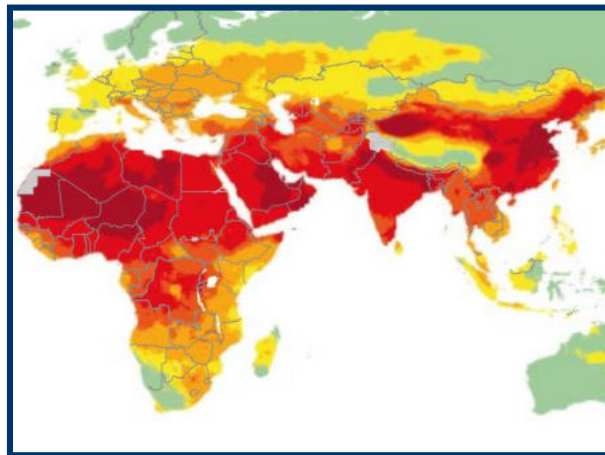
¹ Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) e. V., Filtration & Aerosolforschung, Duisburg

² Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Nachrichtentechnische Systeme, Duisburg

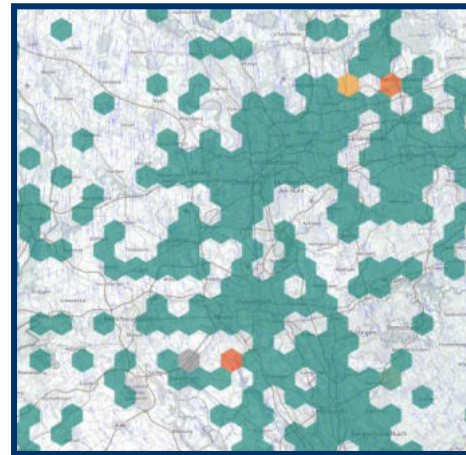
- Luftverschmutzung rückt zunehmend in den Fokus der Öffentlichkeit
- besonders relevant in Schulen, da hohe Verweilzeit der Schüler:innen
- bekannte Defizite im Rahmen der Pandemie deutlich zutage getreten
- bisher hauptsächlich Studien mit wissenschaftlicher Messtechnik
 - meist Einzeluntersuchungen, kurze Zeiträume, hohe Kosten
- kostengünstige Sensoren für räumlich und zeitlich dichtere Netzwerke

Ventilation quality	Pilot study of 35 schools: deficiencies in <u>80%</u> of schools
Air conditioning systems	Pilot study of 50 schools: deficiencies in <u>64%</u> of schools
Room acoustics	Assessment based on 241 measurements: <u>53%</u> of measured values exceeded recommended level
Lighting	Deficiencies in <u>28%</u> of buildings

aus WHO-Bericht *School Environment - Policies and Current Status* (2015)



<http://maps.who.int/airpollution/>



<https://lufdaten.info>



Env. Sci. Technol. **51** 6999 (2017)

Labormesstechnik



www.palas.de



www.environmental-expert.com

- sehr genaue Messungen möglich
- hohe Kosten, nicht mobil, laut

Haushaltssensoren



<https://shop.air-q.com>



<https://myproduct.at/luftzirberl-bergristall-herz-gross-luftzirberl>



www.breeze-technologies.de/de/luftqualitaetssensoren

- kostengünstig, mobil, leise
- wenig über Genauigkeit bekannt

Validierte Low-Cost-Messsysteme



www.aqmesh.com

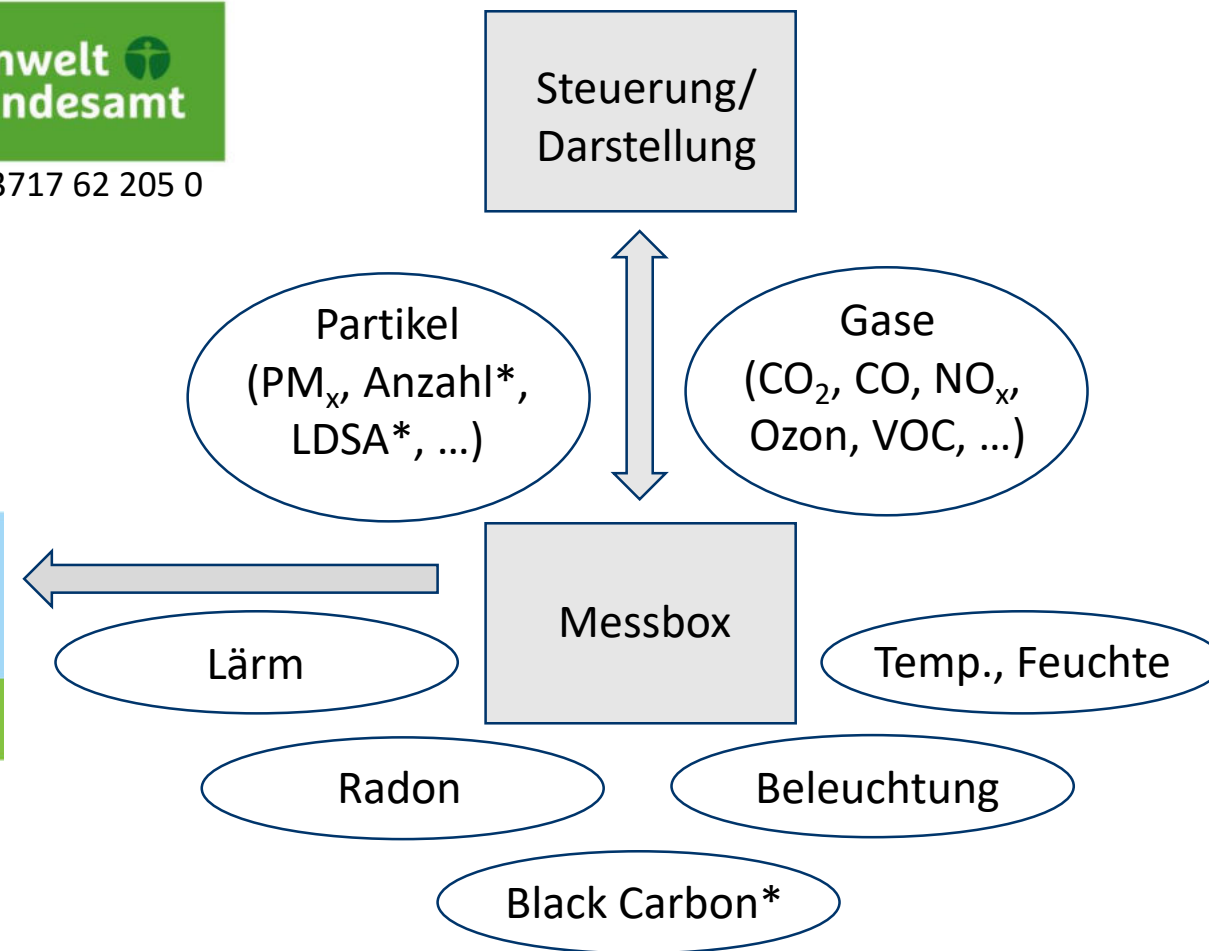
Version	Production date	NO2 sensor	Characterisation	Online processing	Typical $\pm\%$	Typical MAE**	
V3.0	Jan 2013 – Dec 2014	Significant O3 cross-gas effect	Manufacturer's data	Corrected for cross-gas effects and environmental factors	corrected	0-0.03	Requires scaling
V3.5	Jan 2015 – Oct 2015	O3-filtered	As V3.0	Correction for cross-gas effects and environmental factors		0.1-0.7	Requires scaling
V4.0	Jan 2015 – Oct 2016	As V3.5	Manufacturer's data and characterisation at factory	Correction for cross-gas effects and environmental factors		0.5-0.8	Requires scaling
V4.1	Limited release	As V4.0	Factory characterisation and quality check	More sophisticated corrected for cross-gas effects and environmental factors		0.7-0.95	Dependent on variance between sensors
V4.2	Oct 2016 – Dec 2018	O3-filtered and improved response at higher ambient temperatures	Factory characterisation, quality check, accuracy and precision tests	As V4.1, but with optimised electronic setup and improved algorithms (below the limit of detection)	enhanced	>0.8	<5ppb
V5.0	Jan 2019 – Jul 2019	O3-filtered with new design and improved response to a wider range of conditions	As V4.2	As V4.2, but with improved algorithms (below a wide range of conditions)	optimized	>0.8	<5ppb
V5.1	Jul 2019 - Feb 2021	As V5.0	As V5.0	As V5.0, but optimised further below the limit of confidence		>0.85	<5ppb
V5.3	Feb 2021 - current	As V5.0	As V5.0	As V5.3, but further improvement for seasonal terms and accuracy (below the limit of confidence) over the year	improved	>0.85	<5ppb

- Vergleichsstudien mit Referenzmesstechnik
- Problem: Korrekturalgorithmen unbekannt
→ nur bedingt einsetzbar für Studienzwecke

- Projekt im Auftrag des Umweltbundesamts
- gemeinsam mit der Universität Duisburg-Essen
 - Auswahl und Validierung der Sensoren
 - Aufbau einer Multiparameter-Messbox
 - Entwicklung eines Front-Backend-Systems
 - Pilotstudie an einer Grundschule

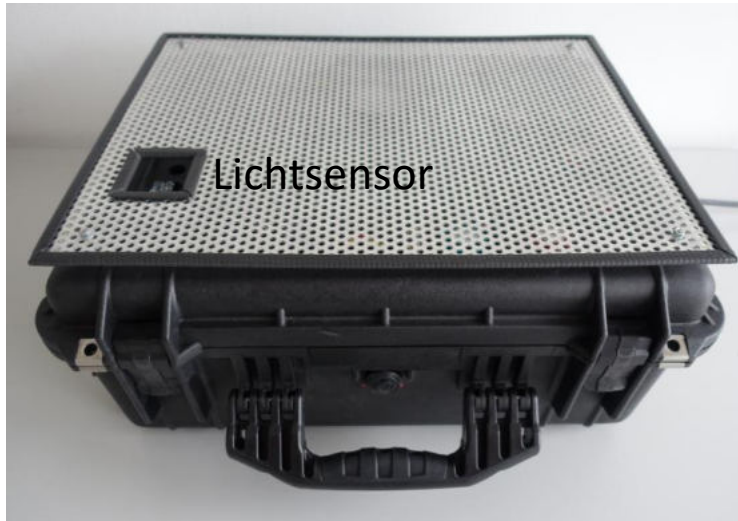


FKZ 3717 62 205 0

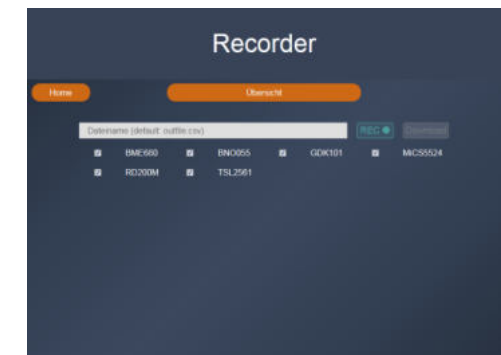
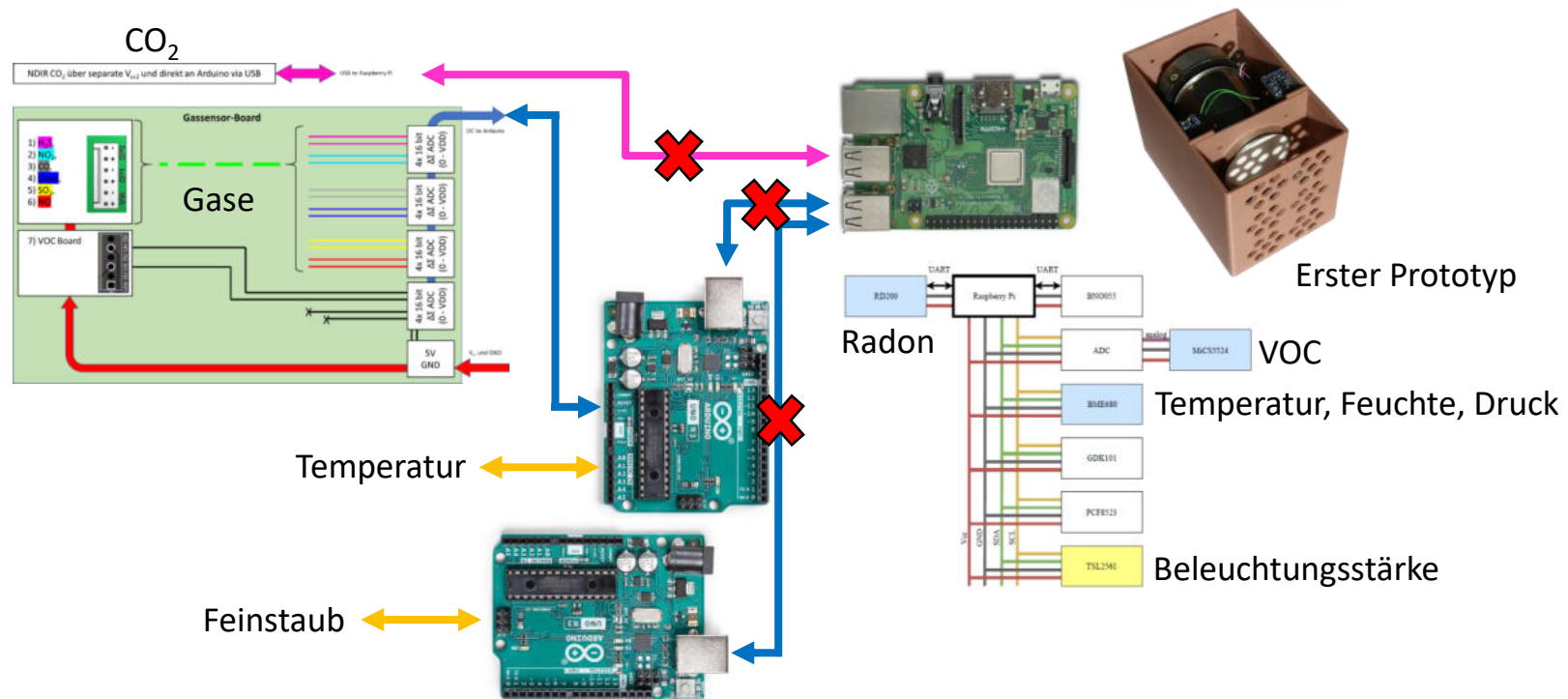


* bisher keine kostengünstige Lösung verfügbar

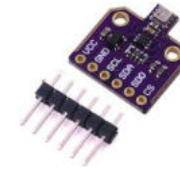
- Integration in einen tragbaren Koffer
- Schutz der Sensoroberflächen durch Lochblech
- lediglich Stromanschluss in der Nähe benötigt
- Einsatz in Schule seit Februar 2022 (durch Pandemie mehrfach verschoben)



- Vernetzung komplex durch Vielzahl der Schnittstellen
- teils gegenseitige Beeinflussung bei der Kommunikation
- Messdaten werden auf SD-Karte gespeichert
- teilweise bereits über Webinterface zugänglich



- ursprünglicher Sensor zeigt starken Temperaturoffset
→ Wechsel auf an der Außenseite montierten Sensor
- Sonne scheint nachmittags auf den Messkoffer

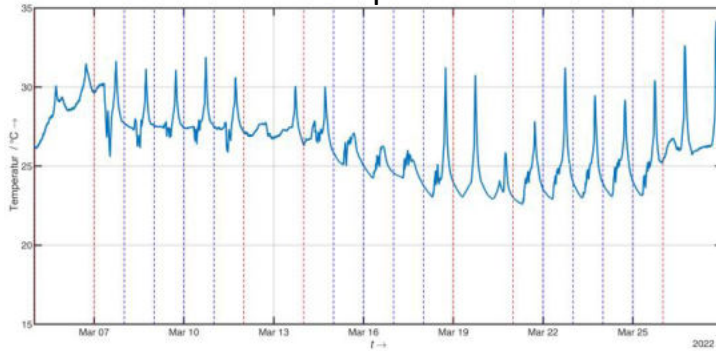


Bosch BME680

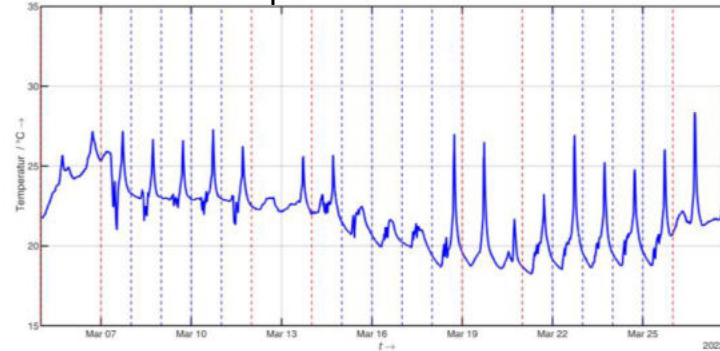


Maxim Integrated DS18B20

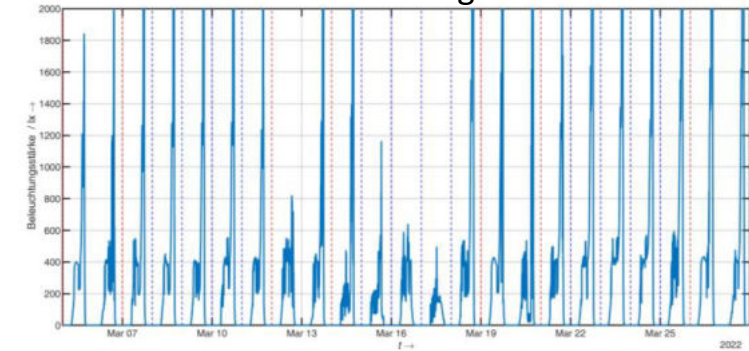
Temperatur



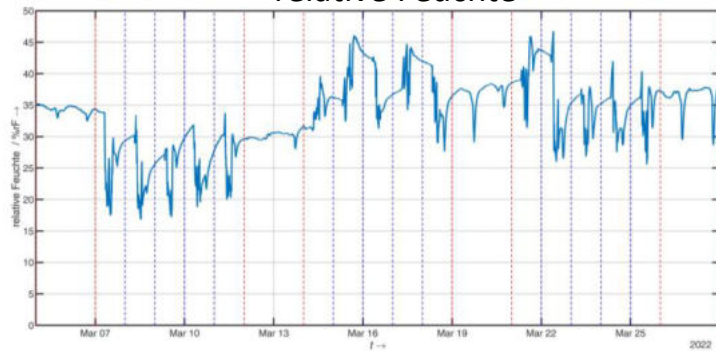
Temperatur neuer Sensor



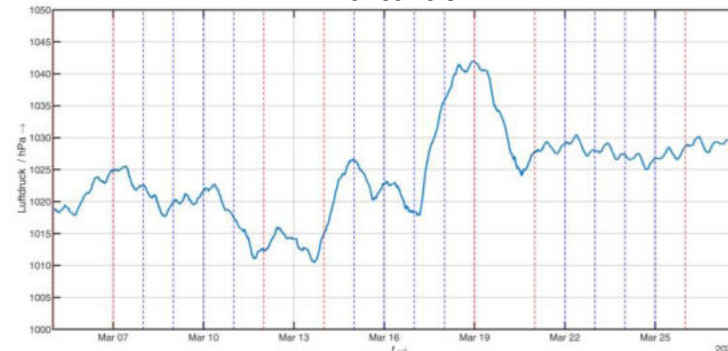
Beleuchtungsstärke



relative Feuchte



Luftdruck

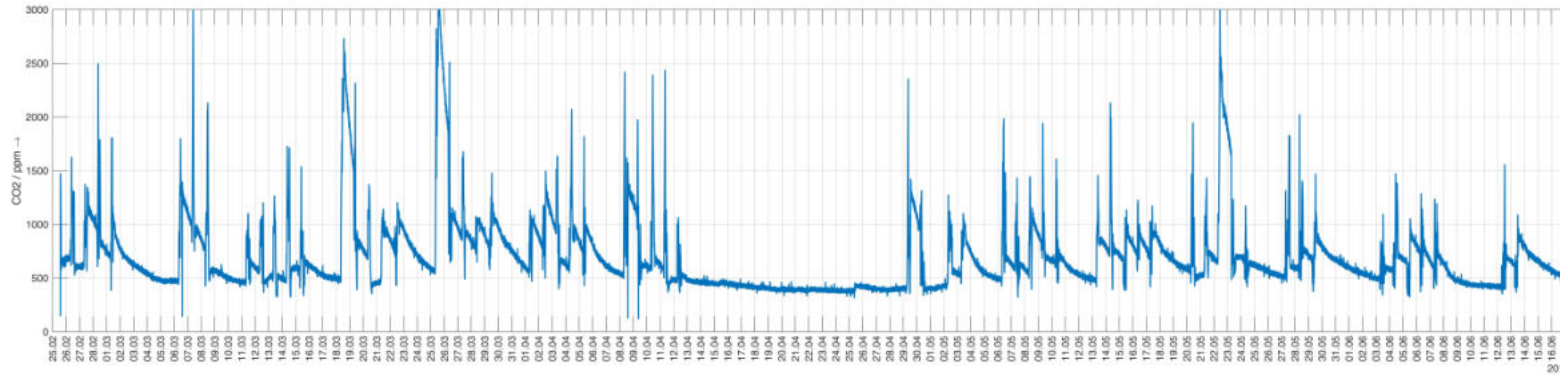


Adafruit TSL2561

- weit verbreiteter Indikator für Luftqualität
- mehrwöchige Vorstudie mit CO₂-Ampeln an Grundschule



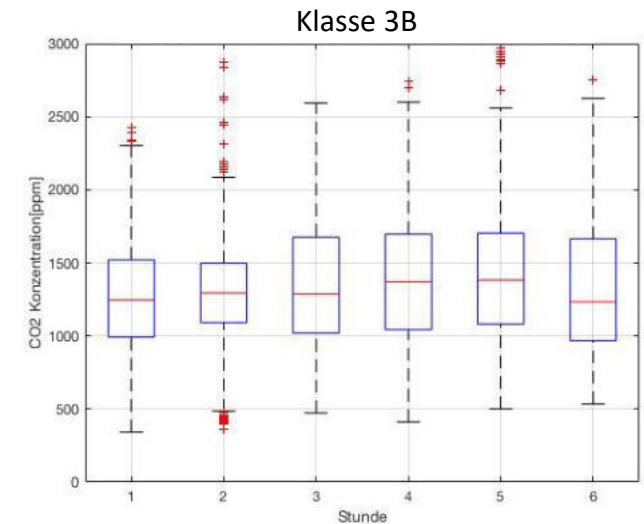
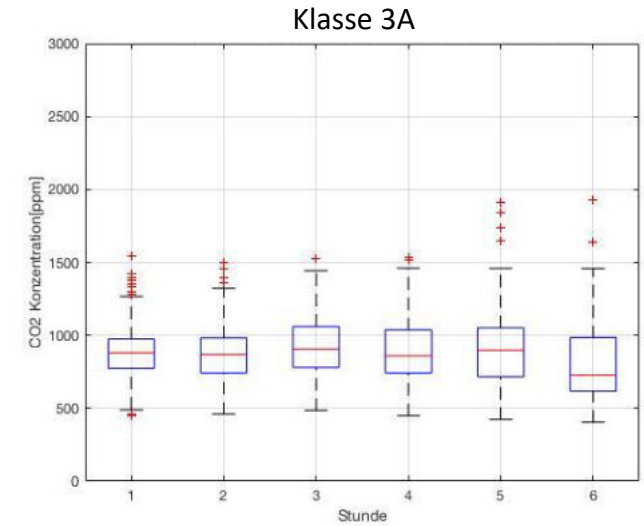
Electro-Mation
EMAQ-25



- teils erhebliche Unterschiede trotz ähnlicher Belegung und Raumgröße
- in vielen Klassen hohe Konzentrationen trotz Lüftungskonzept
- für Messbox Alphasense-Sensor geplant
→ derzeit noch Probleme mit Vernetzung
- Messkampagne derzeit über CO₂-Ampel begleitet



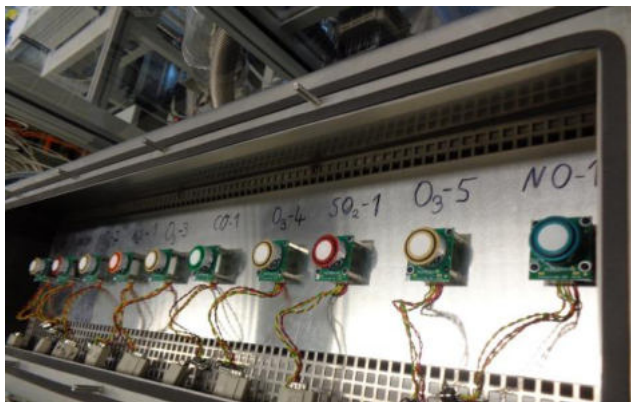
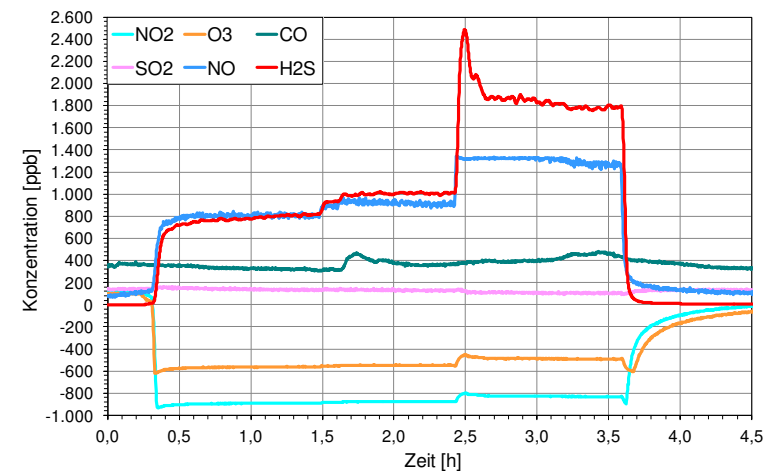
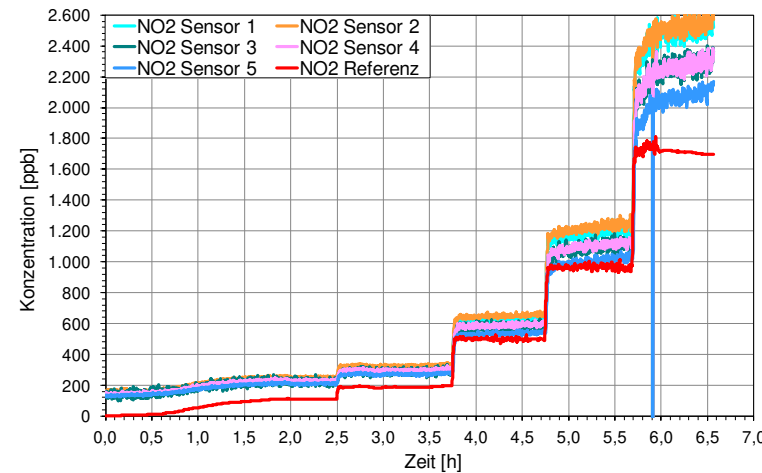
Alphasense
IRC-A1



- Schadgase aus der Außenluft (z. B. NO_x , O_3)
- Schadgase aus Innenraumquellen (z. B. VOC, Formaldehyd)
- Alphasense Sensoren für CO , CO_2 , H_2S , NO , NO_2 , O_3 , SO_2 , VOC

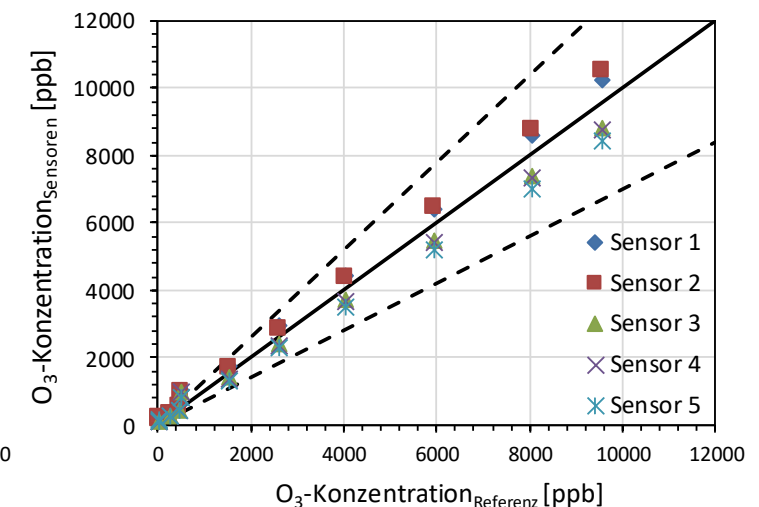
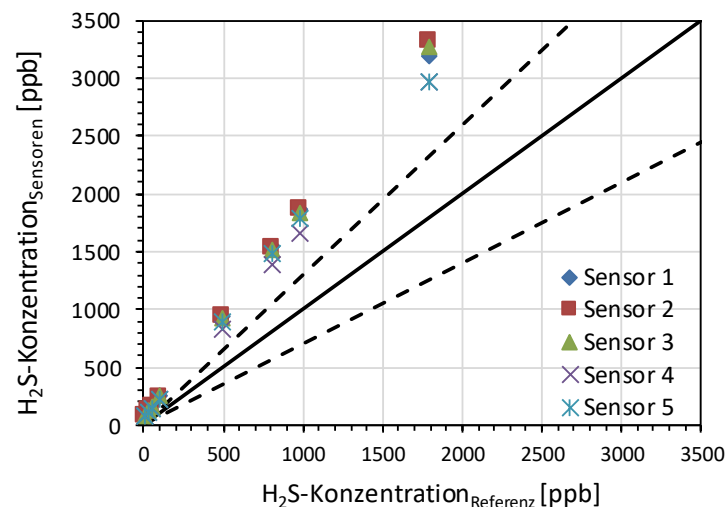
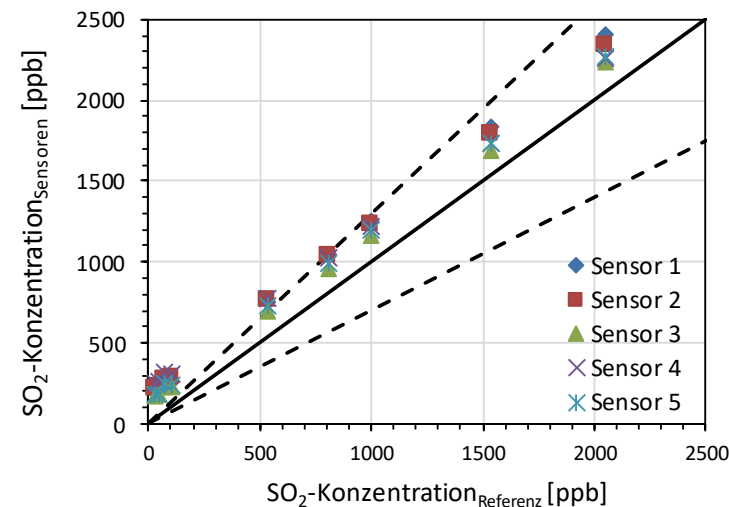
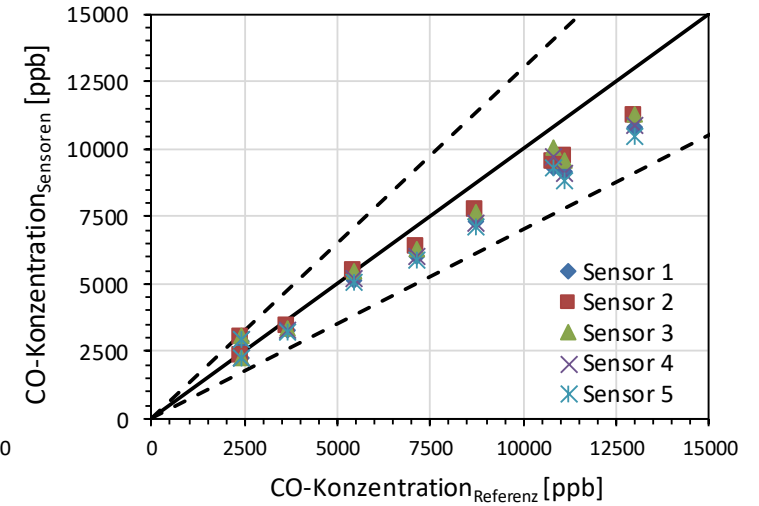
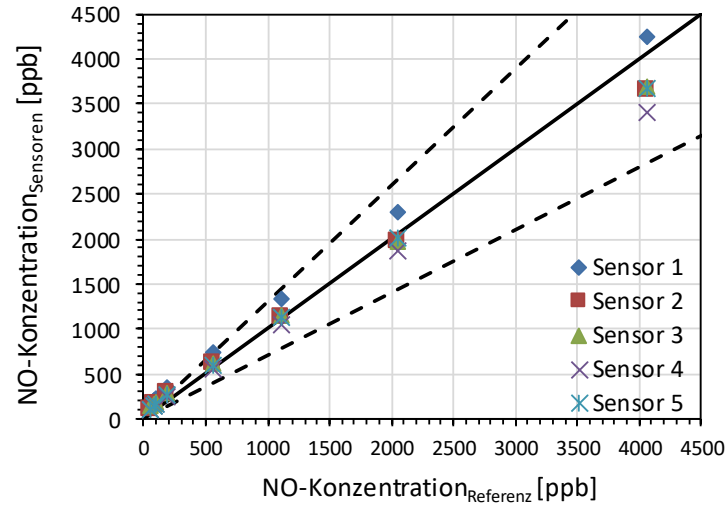
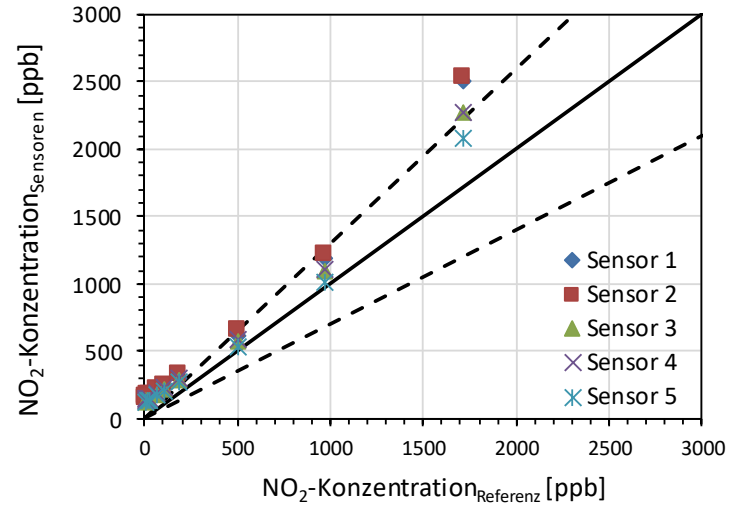


www.alphasense.com

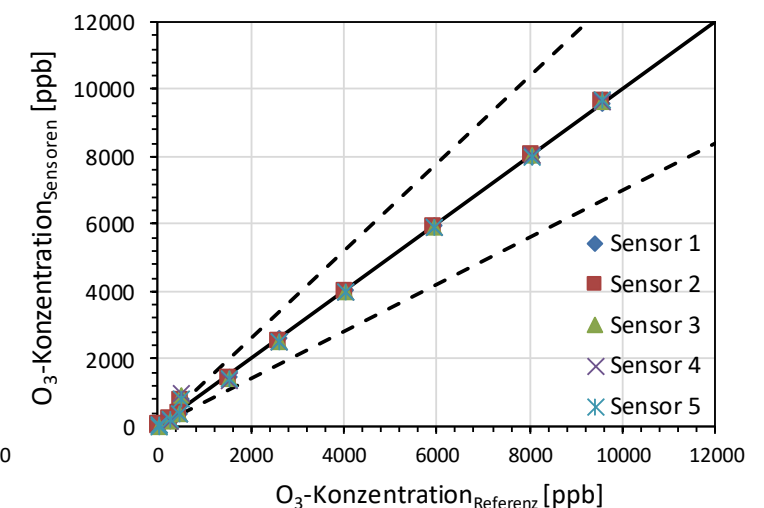
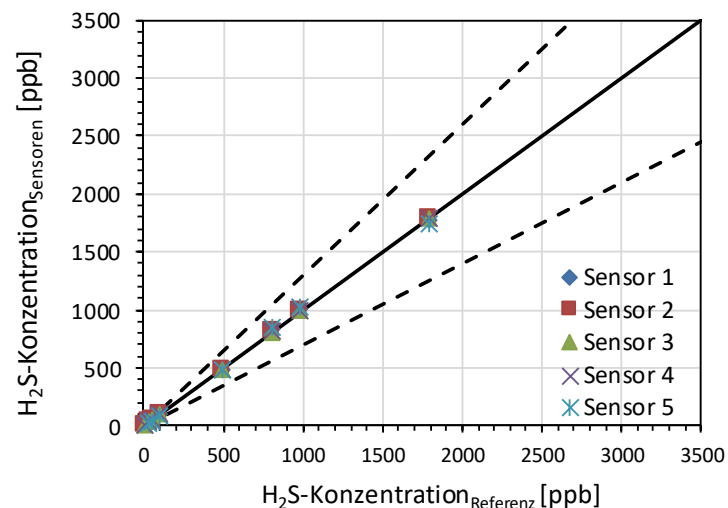
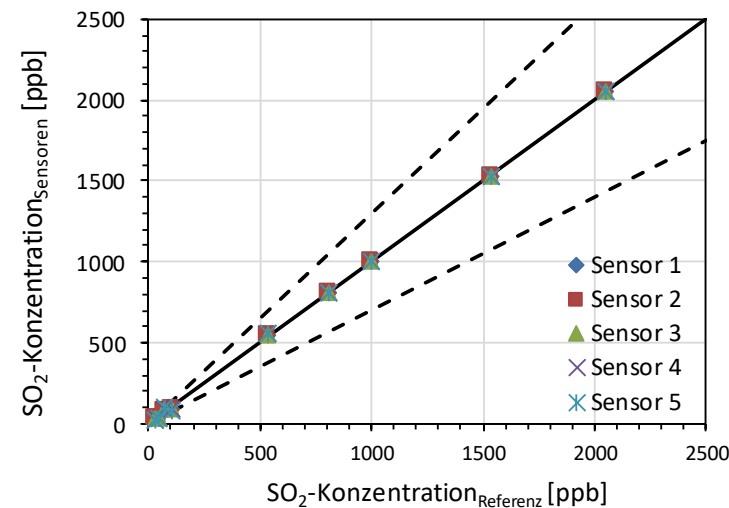
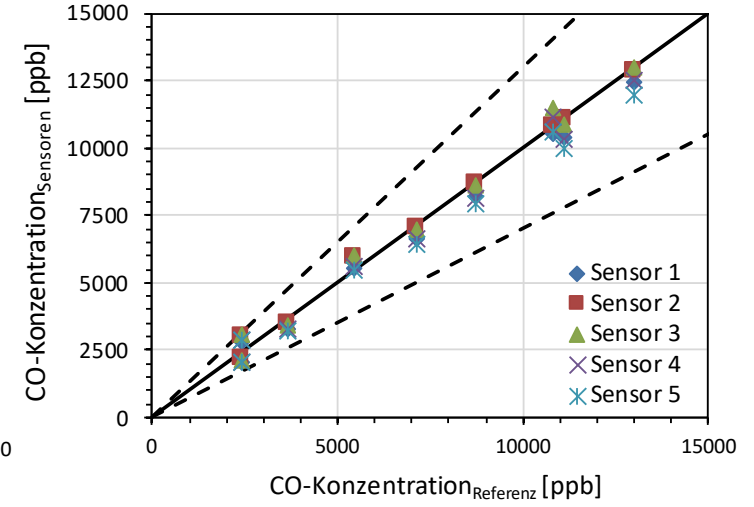
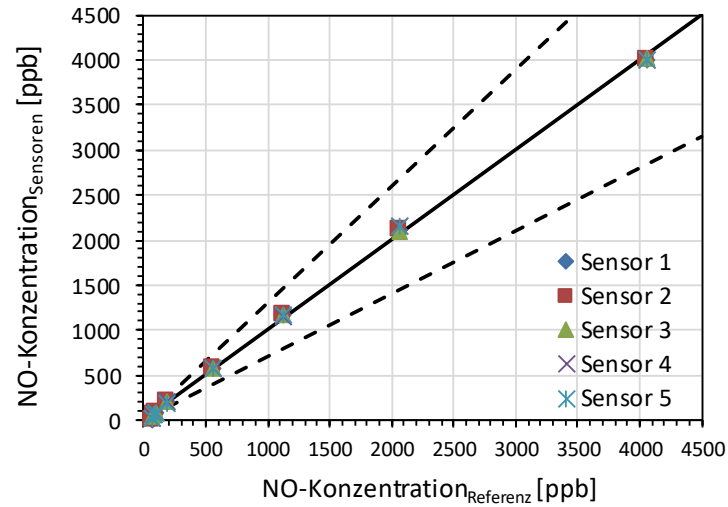
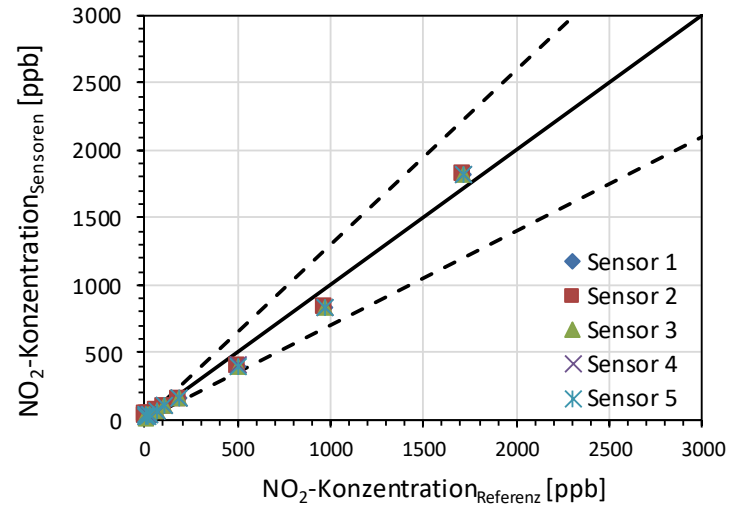


- Box zur Kalibrierung von bis zu zehn Sensoren
- Zudosierung definierter Gaskonzentrationen über Prüfstand
- Vergleich mit Referenzmesstechnik
- teilweise erhebliche Querempfindlichkeiten

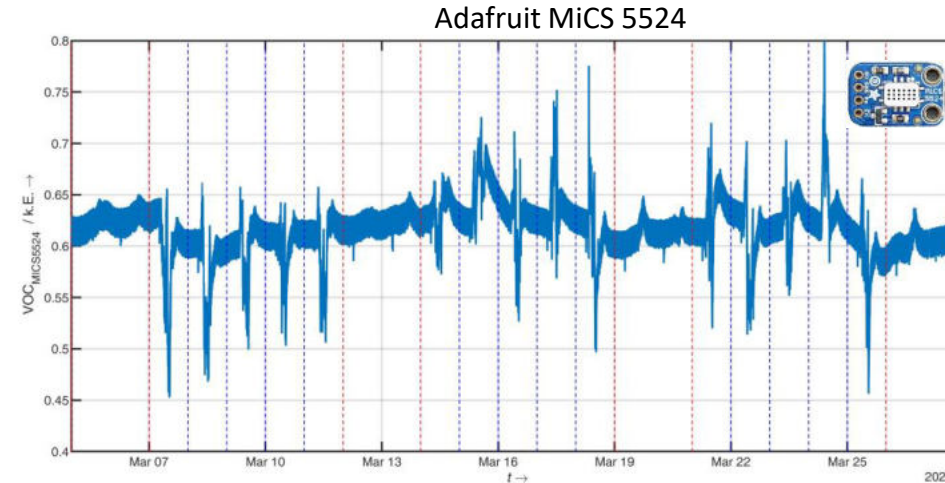
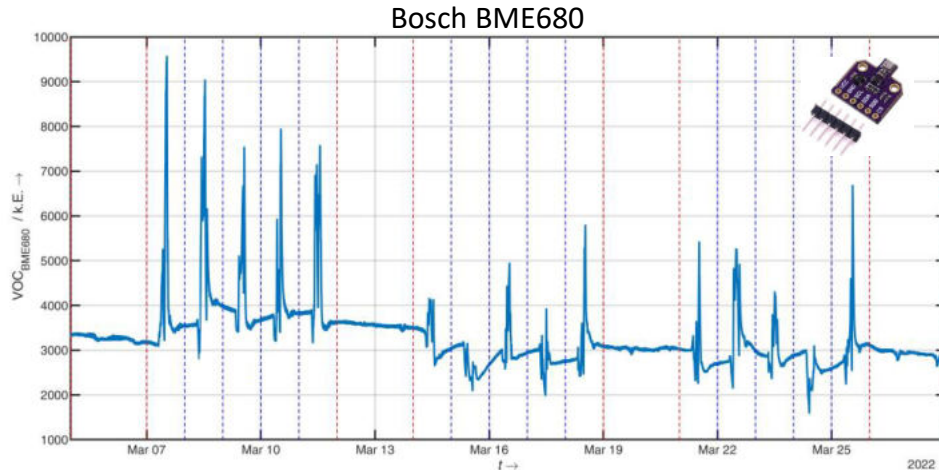
- mit Herstellerkalibrierung typischerweise Genauigkeit von $\pm 30\%$



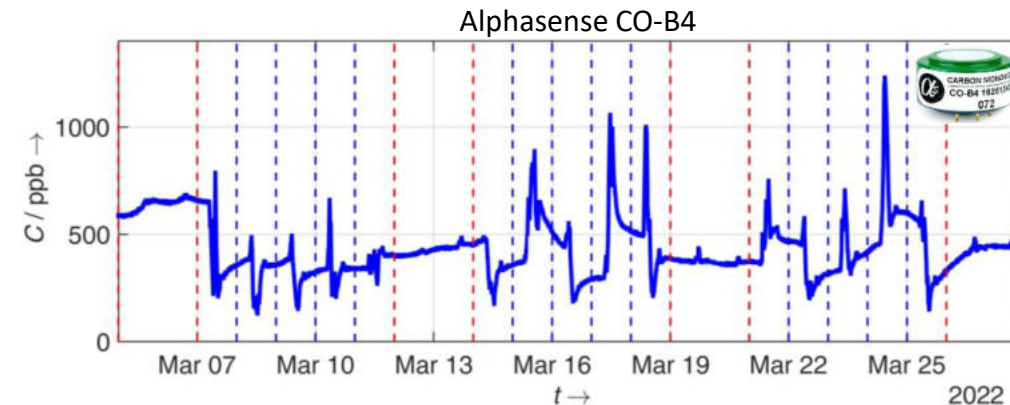
- Optimierungspotenzial durch eigene Rekalibrierung



- VOC-Sensoren Bosch und Adafruit zeigen entgegengesetzten Verlauf

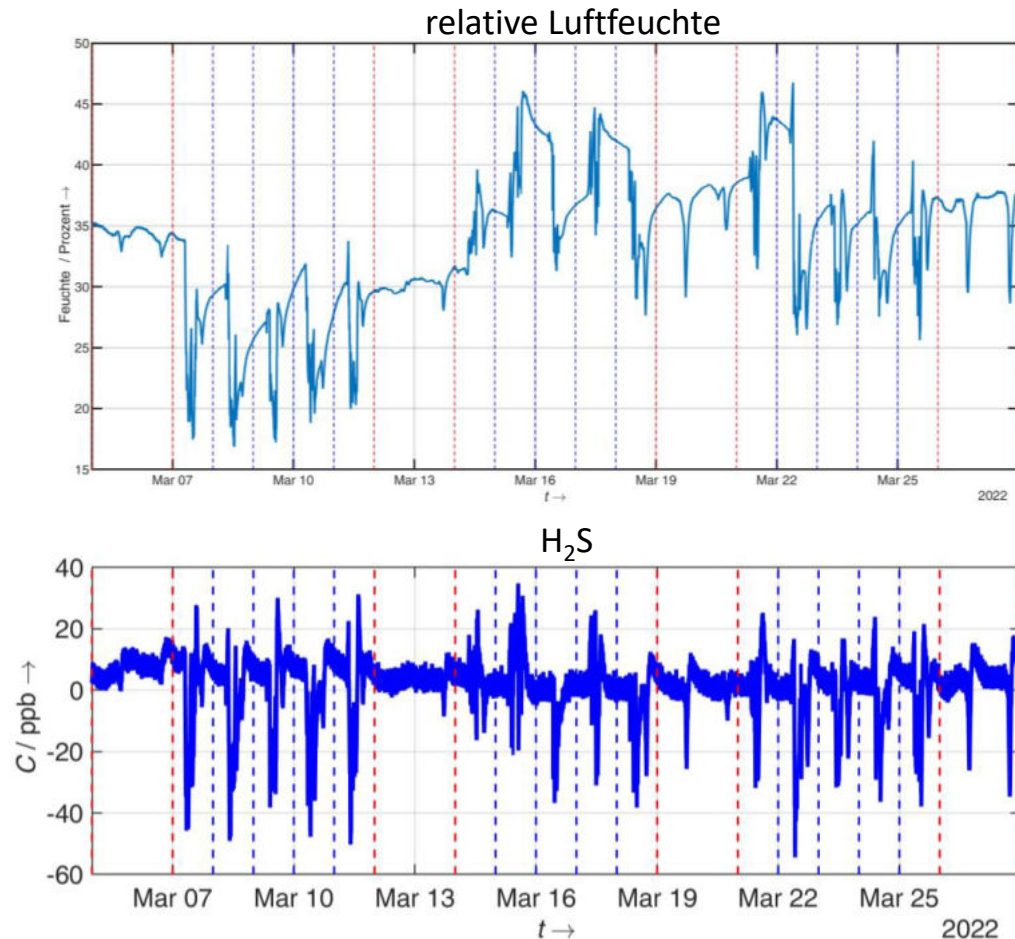


- starke Korrelation mit Alphasense CO-Sensor
- hohe CO-Konzentrationen nicht erwartet
→ wahrscheinlich Messung von Wasserstoff

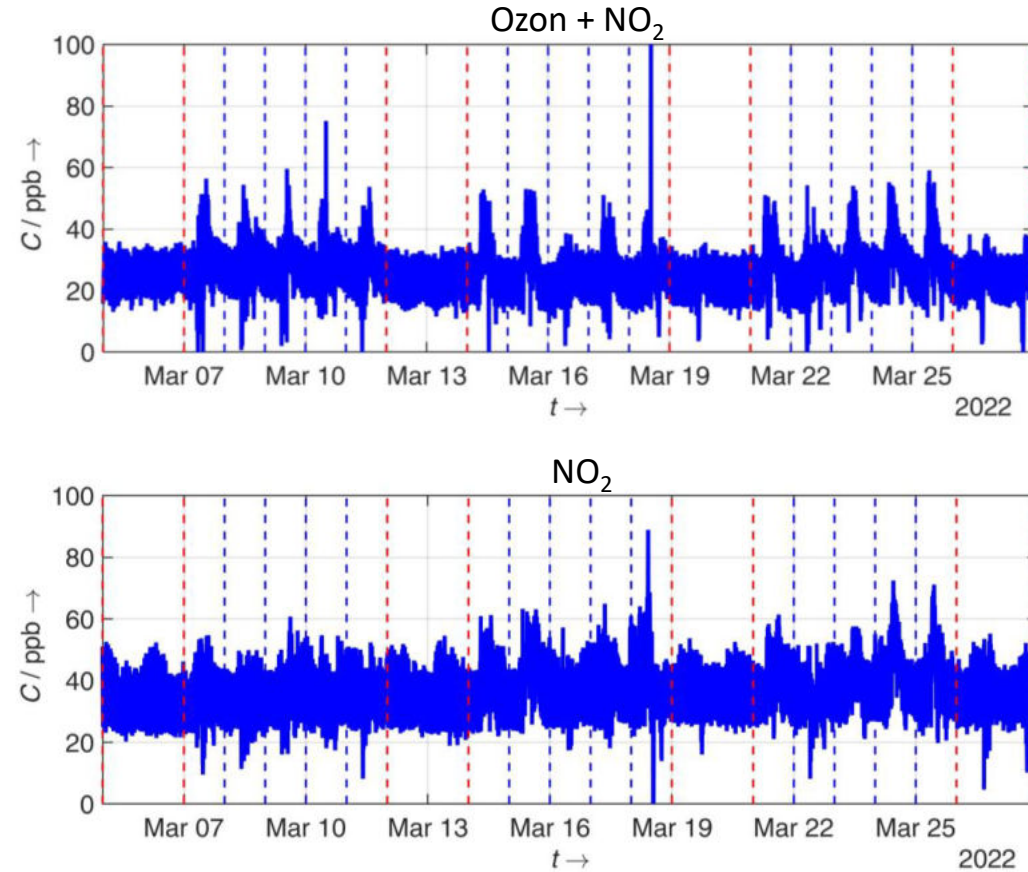


H ₂ S	sensitivity	% measured gas @	5ppm	H ₂ S	< 1
NO ₂	sensitivity	% measured gas @	5ppm	NO ₂	< 1
Cl ₂	sensitivity	% measured gas @	5ppm	Cl ₂	< 1
NO	sensitivity	% measured gas @	5ppm	NO	< -3
SO ₂	sensitivity	% measured gas @	5ppm	SO ₂	< 0.1
H ₂	sensitivity	% measured gas @	100ppm	H ₂ at 20°C	< 50
C ₂ H ₄	sensitivity	% measured gas @	100ppm	C ₂ H ₄	< 1
NH ₃	sensitivity	% measured gas @	20ppm	NH ₃	< 0.1

- einige Sensoren zeichnen Feuchteverlauf nach
→ Querempfindlichkeit oder nur Korrelation?



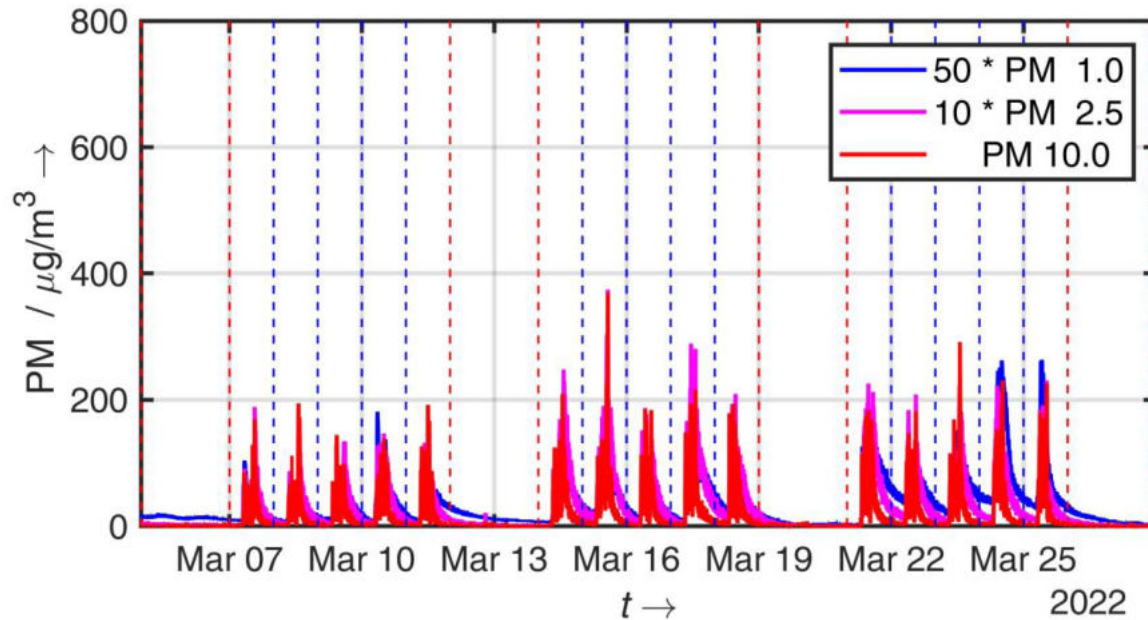
- Differenzierung von NO₂ und Ozon (gleicher Sensor)
→ Separierung trotz Offset und Artefakten möglich?



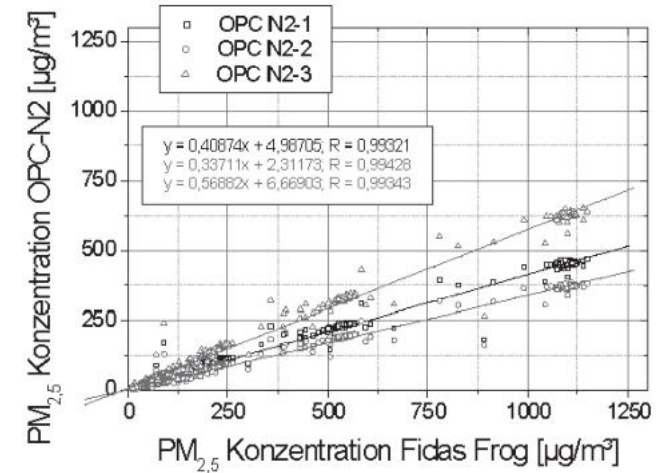
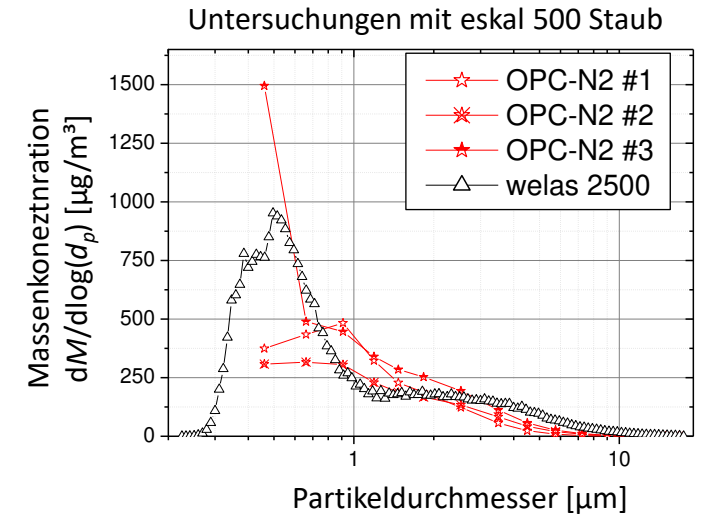
- Feinstaub assoziiert mit negativen Gesundheitsfolgen
- auch virenbeladene Tröpfchen oder Pollen als Feinstaub
- Messung mit Alphasense OPC-N3 (PM_x, Größenverteilung)



www.alphasense.com



- Feinstaub gelangt im Wesentlichen beim Lüften in Innenräume
 - feine Partikel bleiben über Stunden luftgetragen
- Luftreiniger auch nach Ende der Pandemie sinnvoll

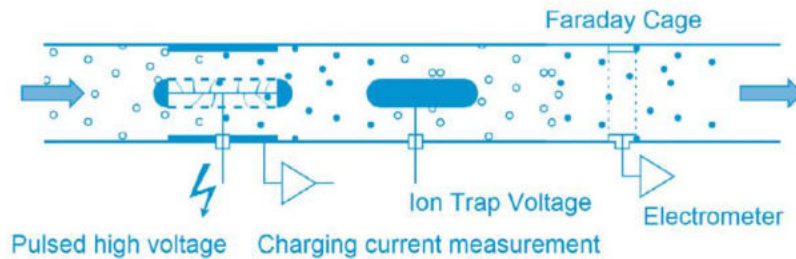


Gefahrstoffe – Reinh. Luft 78 242 (2018)

- Grenzwerte bisher in der Regel massenbasiert (PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀)
- gesundheitliche Auswirkungen kleinerer Partikel bei gleicher Masse größer
- wissenschaftlich gemessen meist mit Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)
- bisher keine wirkliche Low-Cost-Lösung für ultrafeine Partikel bekannt
- Kompromiss: Partikelmonitor basierend auf Diffusionsaufladung



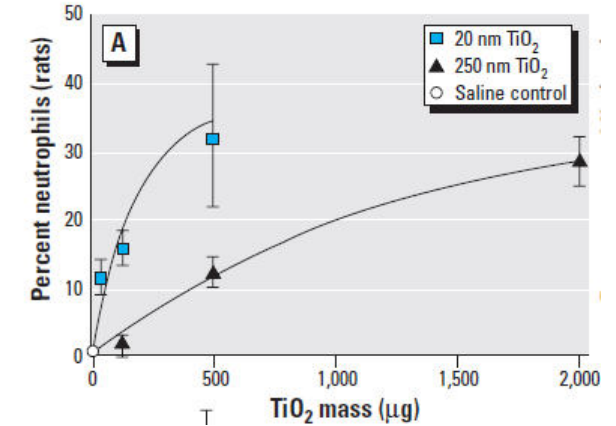
Partector 2 (www.naneos.ch)



<https://nanopartikel.info/forschung/projekte/nanoindex/>



- Problem: Pumpe des Messgeräts zu laut
→ keine Akzeptanz im Schulunterricht

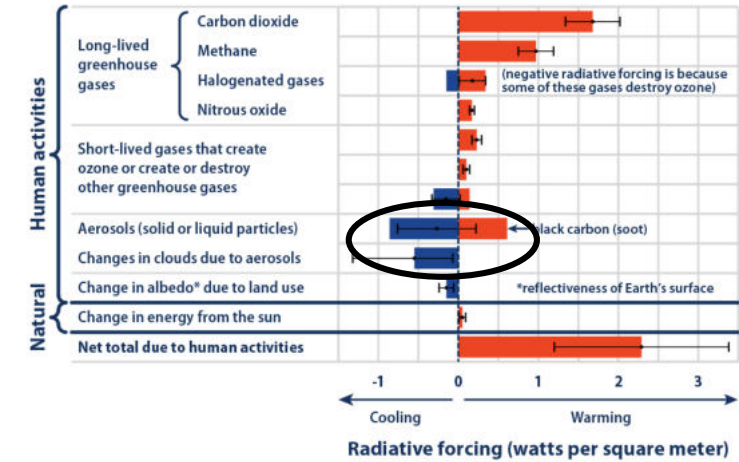


Oberdörster et al.
Env. Health Persp. **113** 823 (2005)

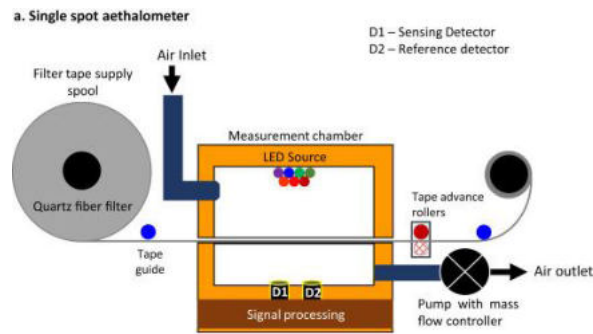


Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)
www.tsi.com

- schwarzer Kohlenstoff als Unterfraktion von Feinstaub
- entsteht bei unvollständigen Verbrennungsprozessen
- gesundheitlich relevant (Adsorption toxischer Substanzen)
- Beitrag zur globalen Erderwärmung, relativ kurzlebig in Atmosphäre
- Messverfahren: Aethalometer (Lichtabsorption durch Partikel)



www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-climate-forcing



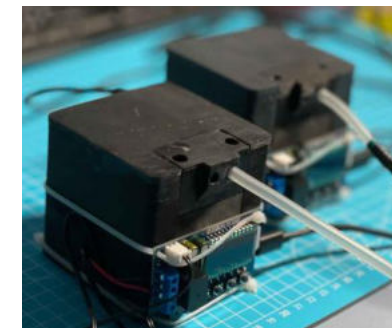
Mikroaethalometer MA200



<https://aethlabs.com/microaeth/ma200/overview>

Rajesh et al. *J. Aerosol Sci.*, 119, 77-90 (2018)

- Problem: Pumpe des Messgeräts zu laut
→ keine Akzeptanz im Schulunterricht
- mögliche Alternative: Aethalometer zum Selbstbau



<https://bcmeter.org>

- radioaktives Gas aus dem Boden kann sich in Innenräumen anreichern
- häufige Ursache von Lungenkrebs, kein unterer Schwellwert bekannt
- üblicherweise Langzeitmessungen mit Kernspurdetektoren
→ nur Mittelwerte über mehrere Wochen
- höhere Zeitauflösung mit Ionisationskammern

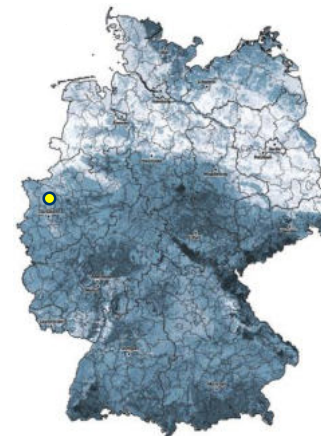
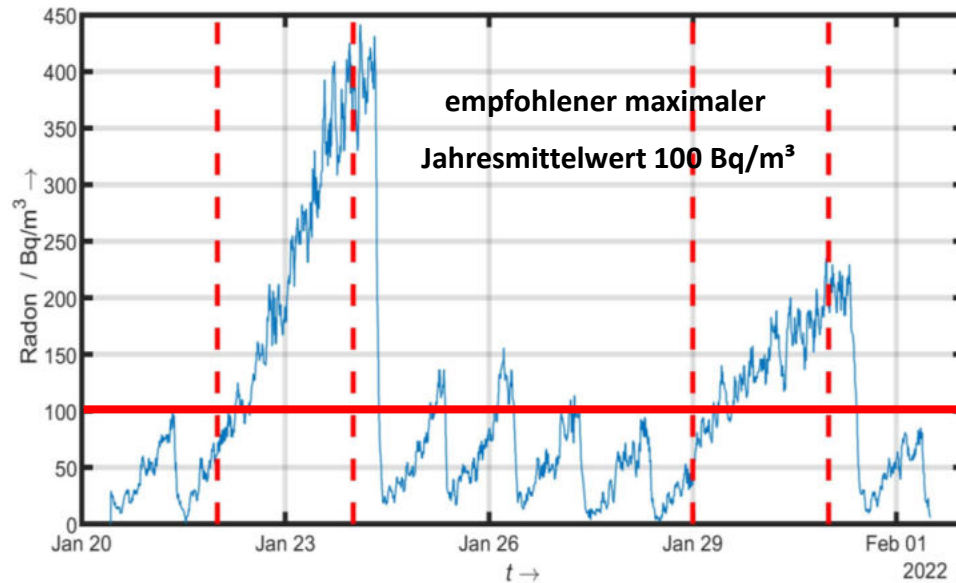
MPA NRW



FTLAB RD200M



www.radonshop.com/ftlab-radon-gas-sensor-rd200m-detektor

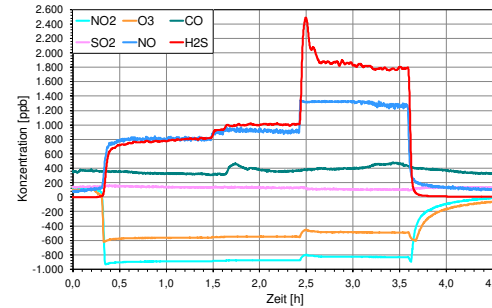
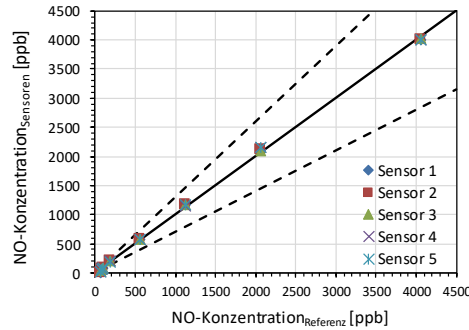


<https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/boden.html>

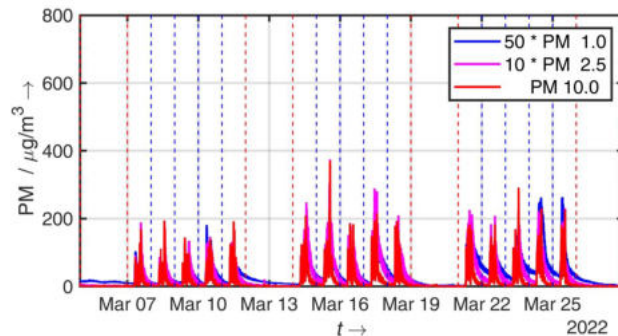
- regelmäßiges Lüften auch in Bezug auf Radon wichtig



- kostengünstige Sensoren zur Überwachung von Luftschadstoffen
- meist Kalibrierung und Berücksichtigung von Querempfindlichkeiten notwendig



- erfolgreiche Integration der Sensoren in Messkoffer, Vernetzung weitgehend erfolgt
- Messkampagne und Auswertung laufen aktuell



Dieses Projekt wurde gefördert durch das Umweltbundesamt und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (FKZ 3717 62 205 0).

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!