

Berlin, 22. Mai 2019
26. WaBoLu-Innenraumtage

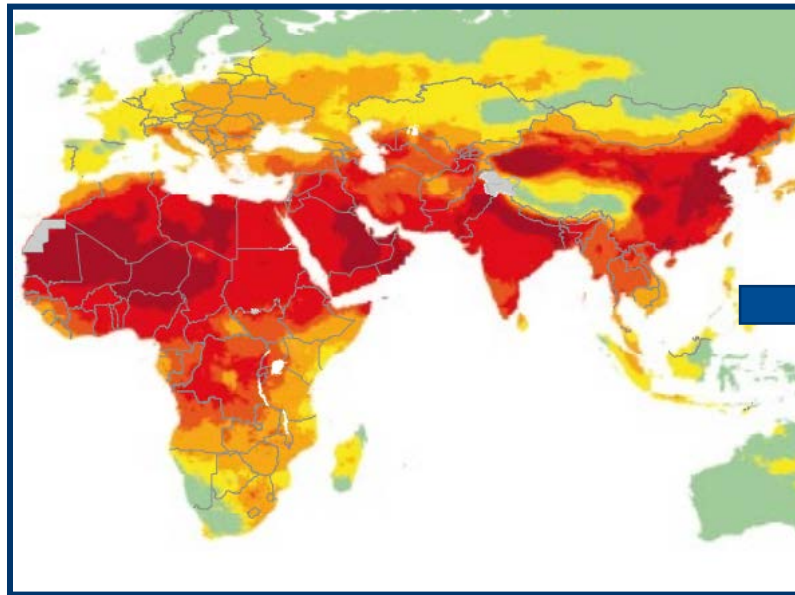
Messungen der Raumluftqualität an Schulen und Arbeitsplätzen mit Low-Cost-Sensoren für Partikel und Gase

*Stefan Schumacher¹, Ute Schneiderwind¹, Michael Bässler¹, Ana Maria Todea¹, Christof Asbach¹
Lea Kristin Sichma², Thorsten Schultze²*

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

² Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Nachrichtentechnische Systeme, Duisburg

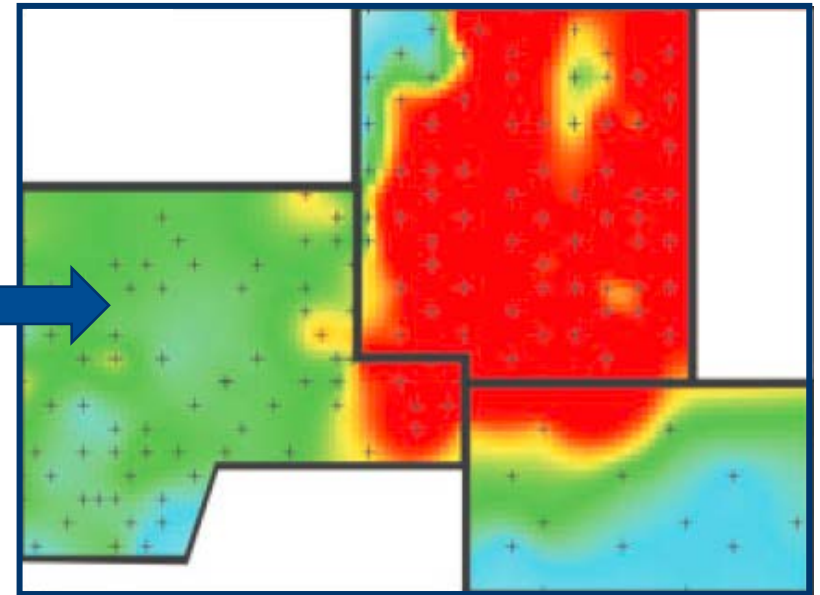
- weltweite Luftverschmutzung rückt zunehmend in den Fokus der Öffentlichkeit
- Trend geht in Richtung höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung



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



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



Ann. Occup. Hyg. **50** 249 (2006)

- wissenschaftliche Messgeräte zur Bestimmung der Luftqualität seit Jahrzehnten etabliert
- aber erst kostengünstige Sensoren bieten Möglichkeiten für ein dichtes Netzwerk

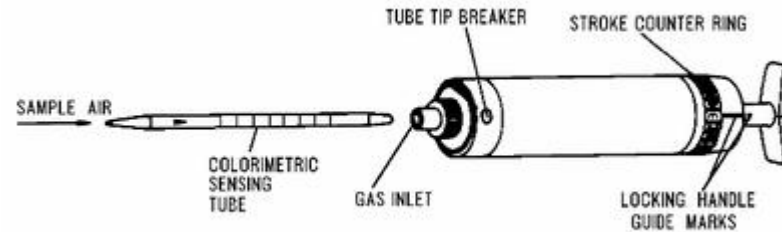
Eine kurze Geschichte der Luftqualitätssensoren

<http://askabiologist.asu.edu>



19./20. Jahrhundert: Kanarienvögel in Kohleminen für toxische Gase

www.sutori.com / www.draeger.com



1937: Drägerröhrchen zur CO-Detektion (heute für viele Gase)

www.alphasense.com



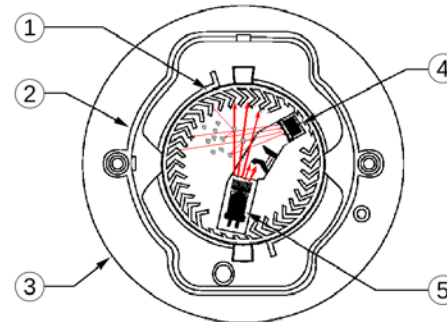
1962: Elektrochemische Gas-sensoren (heute kostengünstig)

1951: erster Ionisationsrauch-detektor in den USA verkauft



www.wikipedia.org

1972: erster optischer Rauchdetektor patentiert



www.wikipedia.org

seit ~2010: genutzt um Raumluft-reiniger zu steuern (kostengünstig)



www.philips.com / www.sparkfun.com

- große Zahl von Sensoren auf dem Markt verfügbar, prominentes Beispiel aus Citizen-Science-Projekten

	Nova Fitness SDS011
Bild	
Größenbereich	0,3 – 10 µm
Konzentrationsbereich	0 – 1.000 µg/m ³
Metrik(en)	PM _{2,5} , PM ₁₀
Preis	ca. 16 €

WAZ DIE ZEITUNG DES RUHRGEBIETS 16. Februar 2017

RHEIN-RUHR

Ich mess' meinen Feinstaub selber

Aus ein paar Kabeln und zwei Stück Abflussrohr lässt sich ein Messgerät basteln. Naturschützer bieten Info-Seminare an. Das Landesumweltamt freut sich darüber

von Ulf W. Schönert

... und zwei Plastik-Röhren aus dem Baumarkt als Werrauchschutzhülse. Rund 30 Euro kostet der Bastelkit. Über eine Crowdfunder-Plattform sammelte das OK Lab 9000 Euro, genug für 300 Messstationen, die nun nach und nach ans Netz gehen. Am 4. März, zum offiziellen Projekt-Start, waren schon rund 160 Sensoren online.

Die Landkarte auf der Homepage des Projekts zeigt den Stand der Dinge. In der Karte sind täglich Daten. Farblige Balken zeigen die Messwerte, die mit Farben von grün über orange bis rot die jeweilige Partikelbelastung in Schicht signalisieren. Die interaktive Karte ist intuitiv bedienbar. Einzelne Messwerte lassen sich in der Handfläche ablesen. Neben dem Datum findet sich auch eine Einbaufreizeit für den Selbstbau-Sensor sowie die Anzeigung zum Datenerhalt.

„OK“ steht für Open Knowledge, also offenes Wissen. Die 2004 gegründete Organisation Open Knowledge Foundation setzt sich für Selbstverwirklichung für offenes Wissen, offene Daten, Transparenz und Beteiligung ein. Eine Hauptforderung von Open Knowledge ist Informationsfreiheit, also beispielsweise der freie Zugang zu Verwaltungsdaten von Behörden. Die 26 deutschen OK Labs sind Treffpunkte des deutschen Abigen Open Knowledge Foundation Deutschland (www.oklab.de). Hier entwickelt Programmierer, Designer, Journalisten und sonstige Interessierte ehrenamtlich Projekte. Im Sommer 2015 ging das Projekt „Rhein-Ruhr“ an den Start.

Süddeutsche Zeitung 19. März 2017

Dreck-Sensor im Eigenbau

Eine Stuttgarter Initiative hat ein Netz aus selbstgebastelten Feinstaub-Messgeräten aufgebaut, deren Daten jederzeit im Internet abrufbar sind. So wollen die Aktivisten das Bewusstsein für Luftverschmutzung stärken

von Ulf W. Schönert

... und zwei Plastik-Röhren aus dem Baumarkt als Werrauchschutzhülse. Rund 30 Euro kostet der Bastelkit. Über eine Crowdfunder-Plattform sammelte das OK Lab 9000 Euro, genug für 300 Messstationen, die nun nach und nach ans Netz gehen. Am 4. März, zum offiziellen Projekt-Start, waren schon rund 160 Sensoren online.

Die Landkarte auf der Homepage des Projekts zeigt den Stand der Dinge. In der Karte sind täglich Daten. Farblige Balken zeigen die Messwerte, die mit Farben von grün über orange bis rot die jeweilige Partikelbelastung in Schicht signalisieren. Die interaktive Karte ist intuitiv bedienbar. Einzelne Messwerte lassen sich in der Handfläche ablesen. Neben dem Datum findet sich auch eine Einbaufreizeit für den Selbstbau-Sensor sowie die Anzeigung zum Datenerhalt.

„OK“ steht für Open Knowledge, also offenes Wissen. Die 2004 gegründete Organisation Open Knowledge Foundation setzt sich für Selbstverwirklichung für offenes Wissen, offene Daten, Transparenz und Beteiligung ein. Eine Hauptforderung von Open Knowledge ist Informationsfreiheit, also beispielsweise der freie Zugang zu Verwaltungsdaten von Behörden. Die 26 deutschen OK Labs sind Treffpunkte des deutschen Abigen Open Knowledge Foundation Deutschland (www.oklab.de). Hier entwickelt Programmierer, Designer, Journalisten und sonstige Interessierte ehrenamtlich Projekte. Im Sommer 2015 ging das Projekt „Rhein-Ruhr“ an den Start.

Was sind OK Labs?

Der Grad der Informationsfreiheit ist länder- und regional unterschiedlich. In Deutschland gibt es eine Verfassungsgarantie für alle Informationen von öffentlichen Stellen. Bürger können sie in normaler Weise kostenfrei erhalten. In anderen Bundesländern sind sie teilweise intransparent und die Gesetzgeber. Anfragen an die Verwaltung sind hier regelmäßig mit erheblichen Kosten verbunden.

Die OK Labs arbeiten also nach Bundes- und regional unterschiedlichen Verfassungen. OK Labs sind offen, jeder Interessierte ist willkommen. Am 4. März findet weltweit der internationale Open Data Day statt.

... und zwei Plastik-Röhren aus dem Baumarkt als Werrauchschutzhülse. Rund 30 Euro kostet der Bastelkit. Über eine Crowdfunder-Plattform sammelte das OK Lab 9000 Euro, genug für 300 Messstationen, die nun nach und nach ans Netz gehen. Am 4. März, zum offiziellen Projekt-Start, waren schon rund 160 Sensoren online.

Die Landkarte auf der Homepage des Projekts zeigt den Stand der Dinge. In der Karte sind täglich Daten. Farblige Balken zeigen die Messwerte, die mit Farben von grün über orange bis rot die jeweilige Partikelbelastung in Schicht signalisieren. Die interaktive Karte ist intuitiv bedienbar. Einzelne Messwerte lassen sich in der Handfläche ablesen. Neben dem Datum findet sich auch eine Einbaufreizeit für den Selbstbau-Sensor sowie die Anzeigung zum Datenerhalt.

„OK“ steht für Open Knowledge, also offenes Wissen. Die 2004 gegründete Organisation Open Knowledge Foundation setzt sich für Selbstverwirklichung für offenes Wissen, offene Daten, Transparenz und Beteiligung ein. Eine Hauptforderung von Open Knowledge ist Informationsfreiheit, also beispielsweise der freie Zugang zu Verwaltungsdaten von Behörden. Die 26 deutschen OK Labs sind Treffpunkte des deutschen Abigen Open Knowledge Foundation Deutschland (www.oklab.de). Hier entwickelt Programmierer, Designer, Journalisten und sonstige Interessierte ehrenamtlich Projekte. Im Sommer 2015 ging das Projekt „Rhein-Ruhr“ an den Start.



ZEIT ONLINE 22. Dezember 2017

Politik Gesellschaft Wirtschaft Kultur • Wissen Digital Campus • Arbeit Entdecken Sport ZEITmagazin mehr •

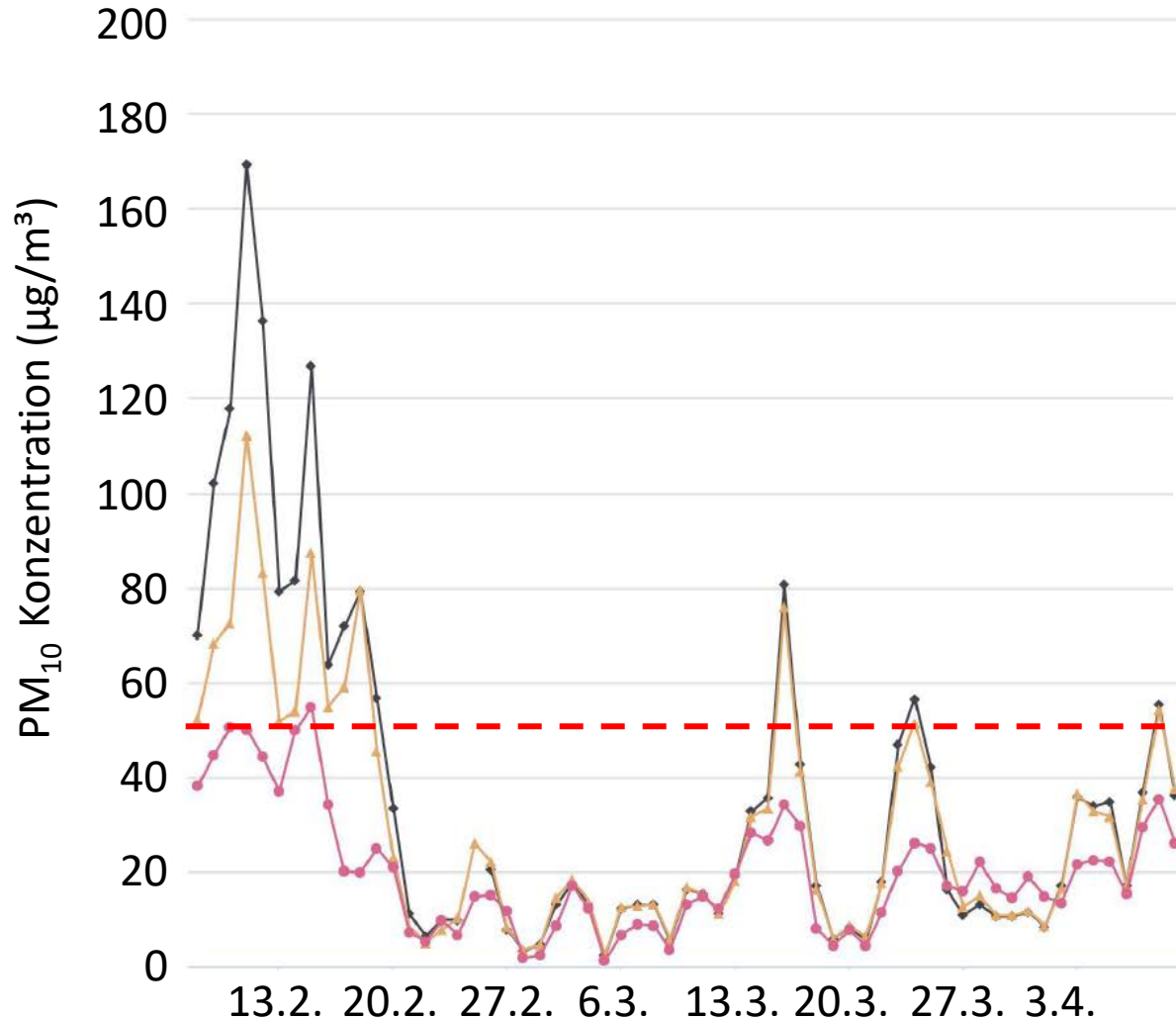
Luftverschmutzung

Feinstaub in der Falle

Die gefährlichen Partikel haben neue Gegner: Hobbyforscher mit selbstgebastelten Messstationen.

von Ulf Schönert

- im Allgemeinen gute Korrelation, aber starke Abweichungen zu bestimmten Zeiten



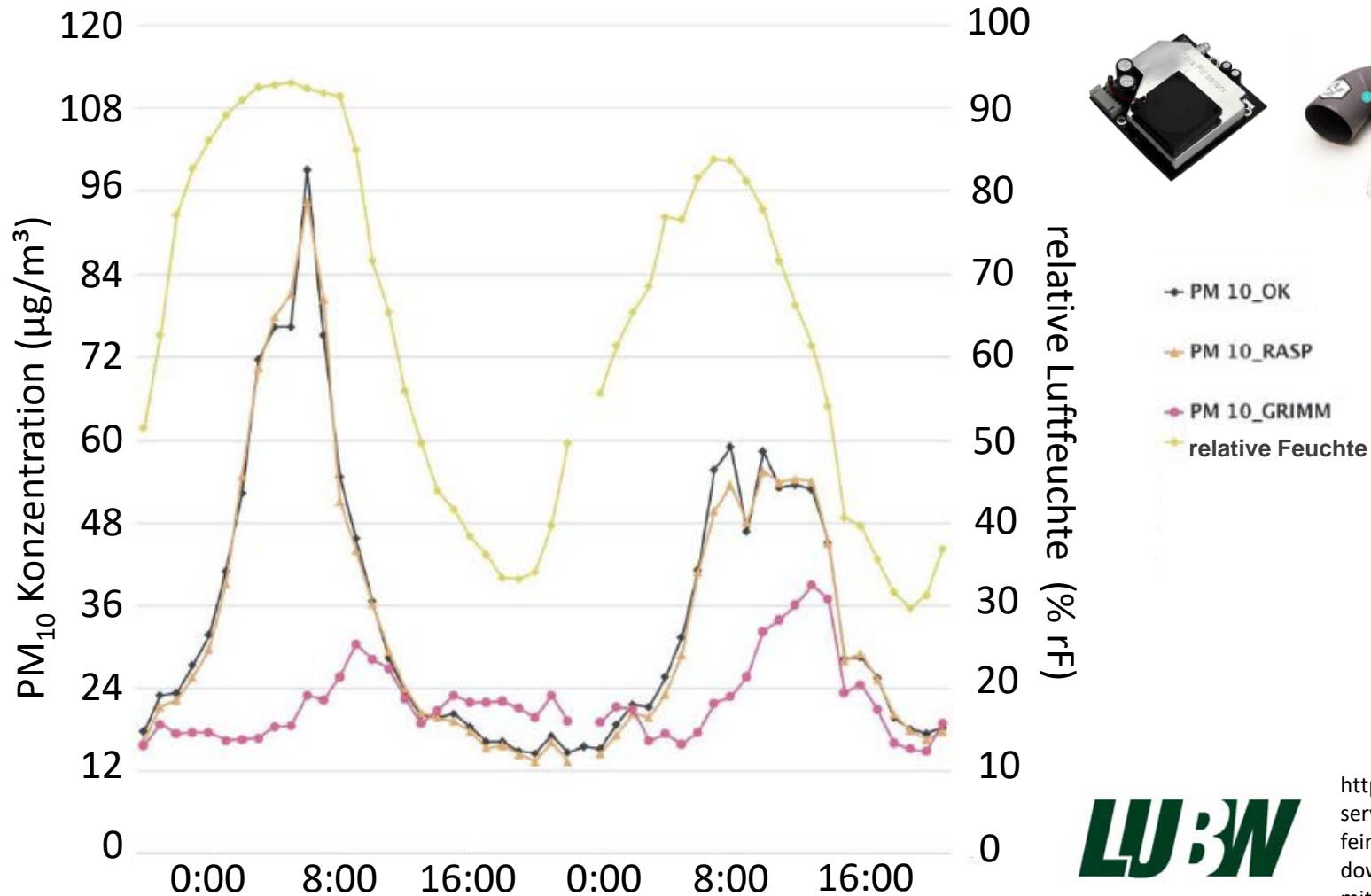
- PM 10_OK zwei Konfigurationen des gleichen Sensors
- PM 10_RASP optischer Partikelzähler
- PM 10_GRIMM als Referenzgerät

EU PM₁₀ Grenzwert



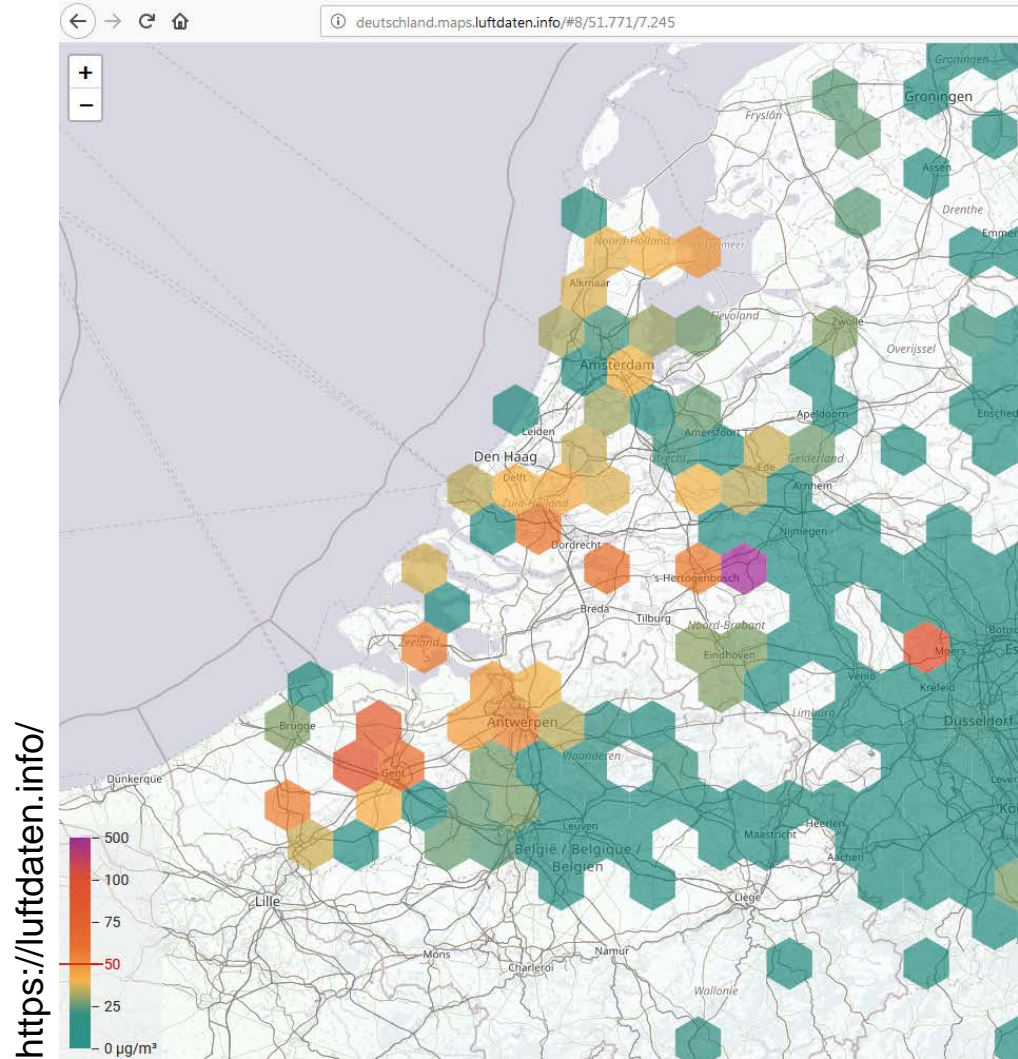
https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/268831/messungen_mit_dem_feinstaubsensor_sds011.pdf?command=downloadContent&filename=messungen_mit_dem_feinstaubsensor_sds011.pdf

- starke Abweichungen insbesondere bei hoher Luftfeuchte



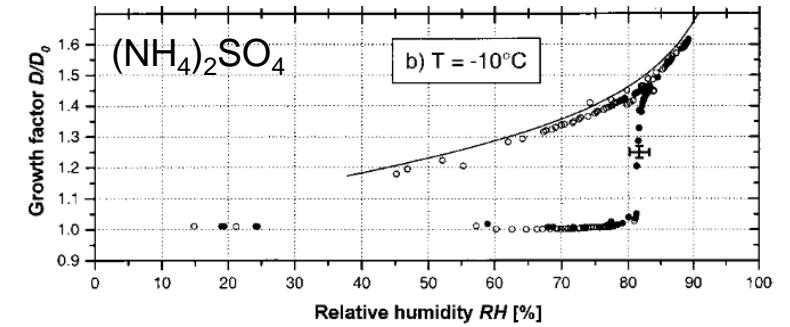
https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/268831/messungen_mit_dem_feinstaubsensor_sds011.pdf?command=downloadContent&filename=messungen_mit_dem_feinstaubsensor_sds011.pdf

- scheinbar hohe PM_x -Konzentrationen können durch meteorologische Bedingungen verursacht sein

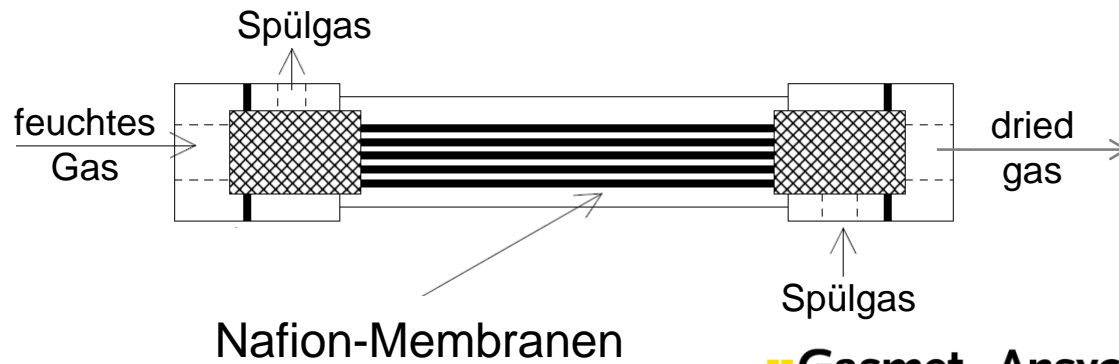


Hygroskopisches Partikelwachstum

- hygroskopische Partikel wachsen durch Wasseraufnahme
→ zu hohe Massenkonzentration ermittelt
- Datenkorrektur schwierig (Zusammensetzung, Hysterese)
- Alternative: kostengünstiger Trockner mit geringem Druckverlust
→ derzeit Entwicklung im Rahmen einer Masterarbeit



Environ. Sci. Technol. **36** 63 (2002)

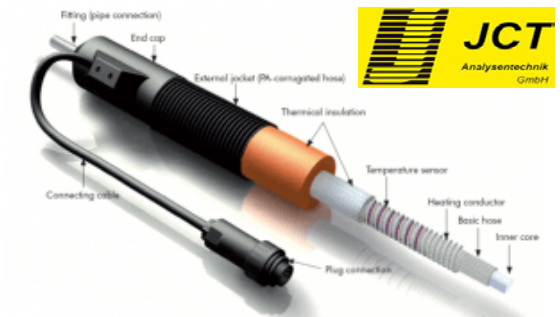


Gasmet . Ansyco
GASMESSTECHNIK & ANALYTISCHE SYSTEME

Diffusionstrockner



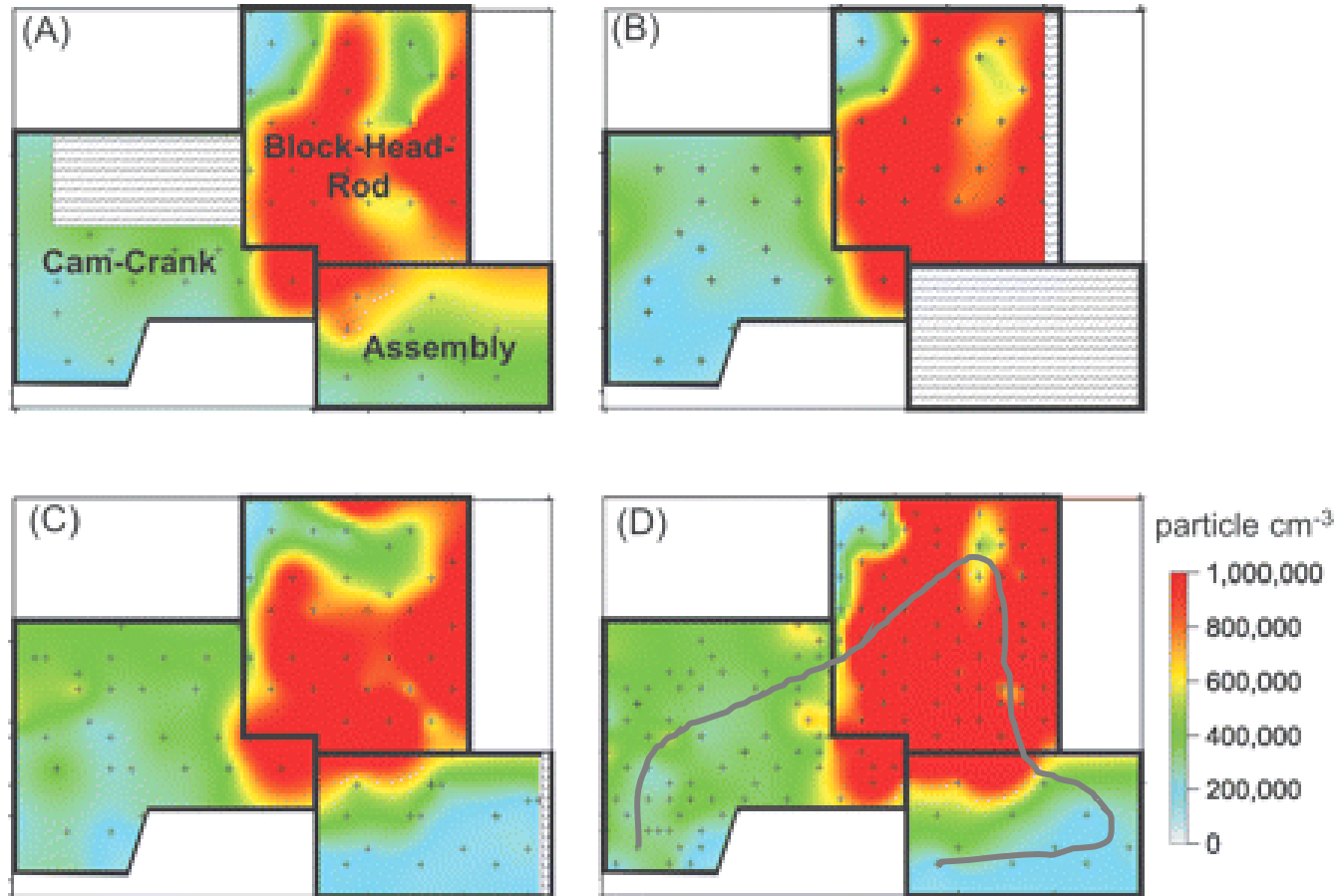
Gasheizung



- üblicherweise geringere und weniger schwankende relative Feuchte, oft hohe Partikelkonzentrationen
 - deutscher Arbeitsplatzgrenzwert für Staub kürzlich auf $1,25 \text{ mg/m}^3$ reduziert
- gravimetrische Analyse kommt an ihr Limit, insbesondere bei Kurzzeitmessungen

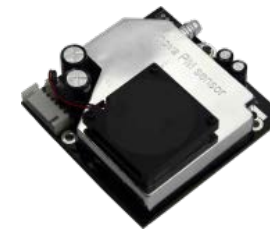


- optische Messtechnik bietet deutlich höhere zeitliche Auflösung
- Alternative zur personengebundenen Sammlung: dichtes Sensornetzwerk



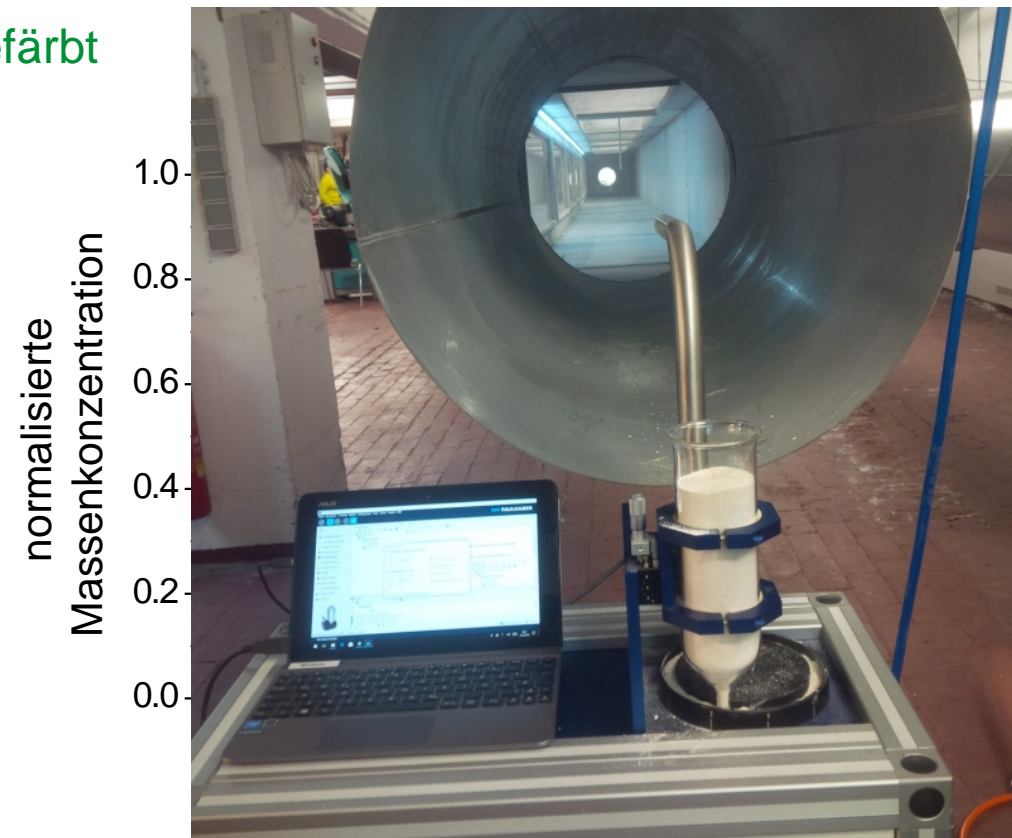
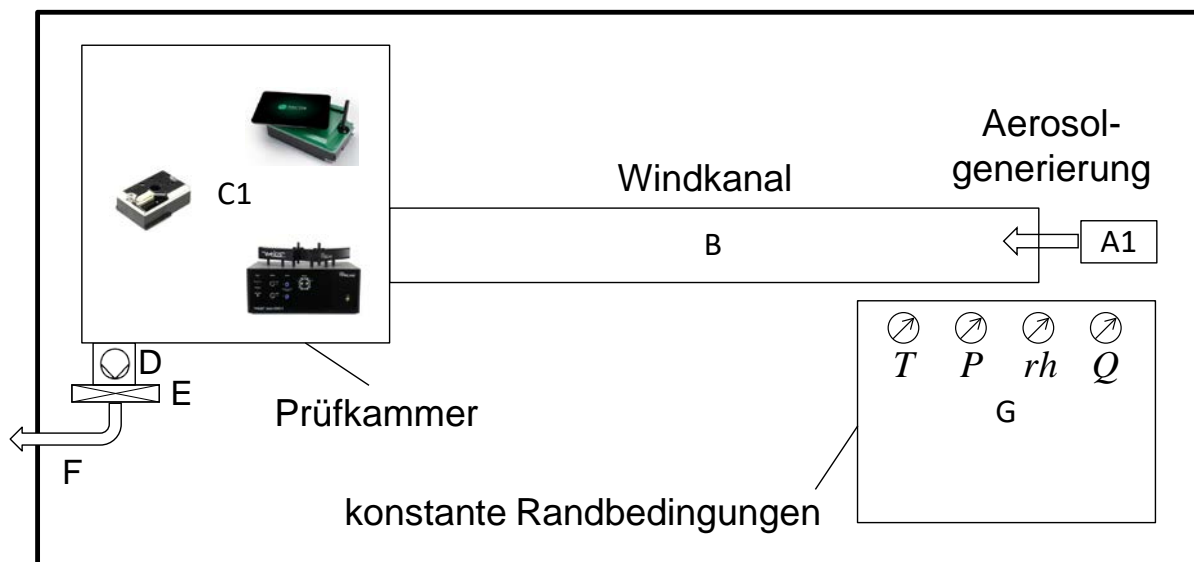
T. Peters et al. *Ann. Occup. Hyg.* **50** 249 (2006)

- Messungen in einer Fabrik zur Fertigung und Montage von Dieselmotoren
- teure Messtechnik > 50.000 €
- ebenso möglich mit kostengünstigen Sensoren (50 Sensoren ~1.000 €)
- kontinuierliche Messungen, wichtig bei starken zeitlichen Schwankungen oder zur Lokalisierung von Lecks
- Möglichkeit, die Bewegung der Arbeiter zu verfolgen, um persönliche Belastung abzuschätzen (z.B. iBeacon < 20 €)



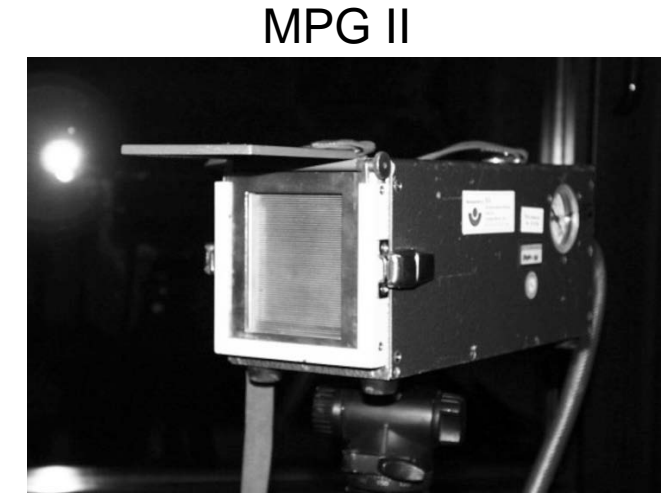
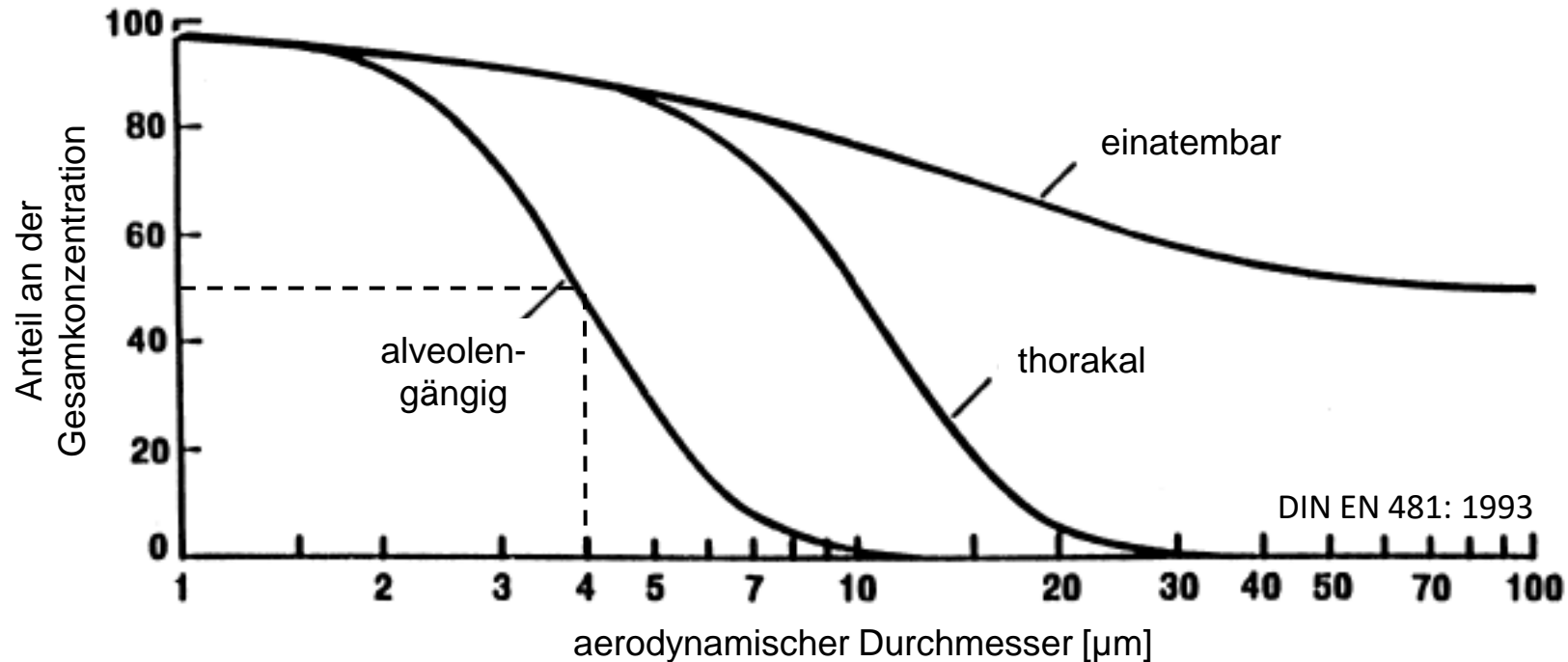
Sind die Partikelzähler und Sensoren für Arbeitsplatzaerosole geeignet?

- Experimente durchgeführt am Institut für Gefahrstoffforschung (IGF) in Dortmund
- Zuführung des generierten Staubs über Windkanal in Prüfkammer für homogene Durchmischung
 - CaCO_3 (eskal), in zwei Körnungen, weiß und eingefärbt
 - Schiefermehl (größere Partikel)
 - Glaskugeln (breite Größenverteilung)



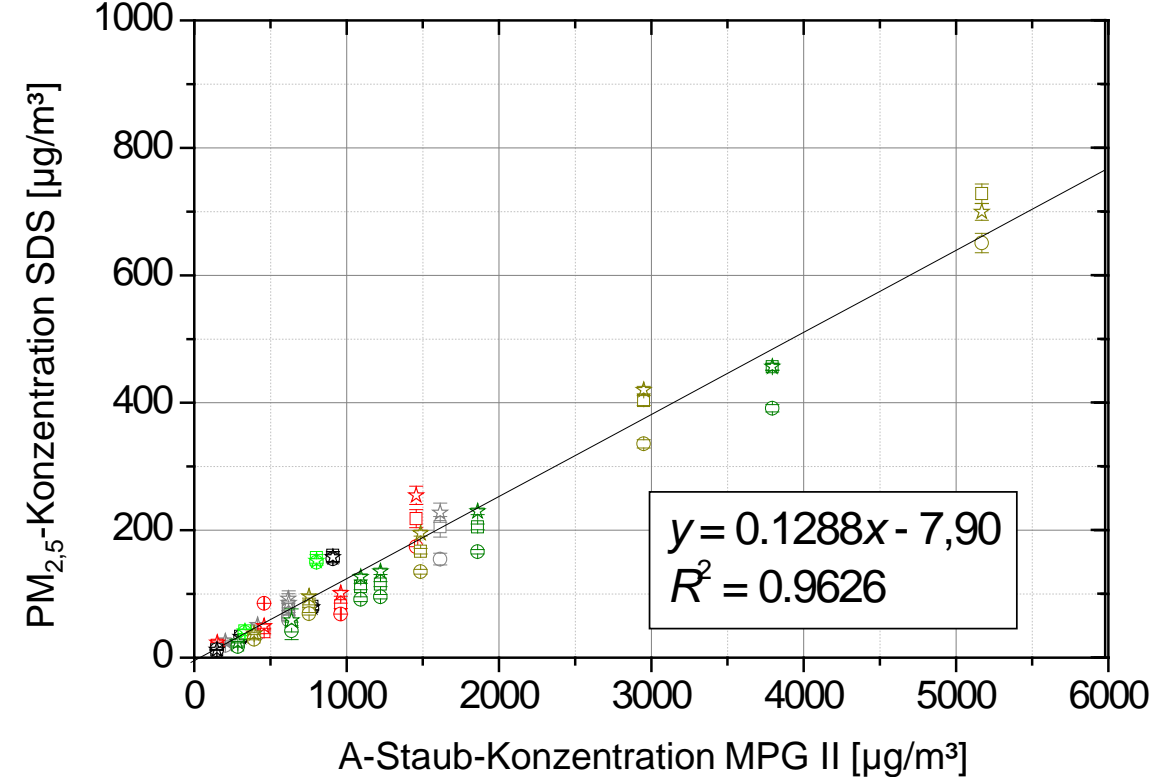
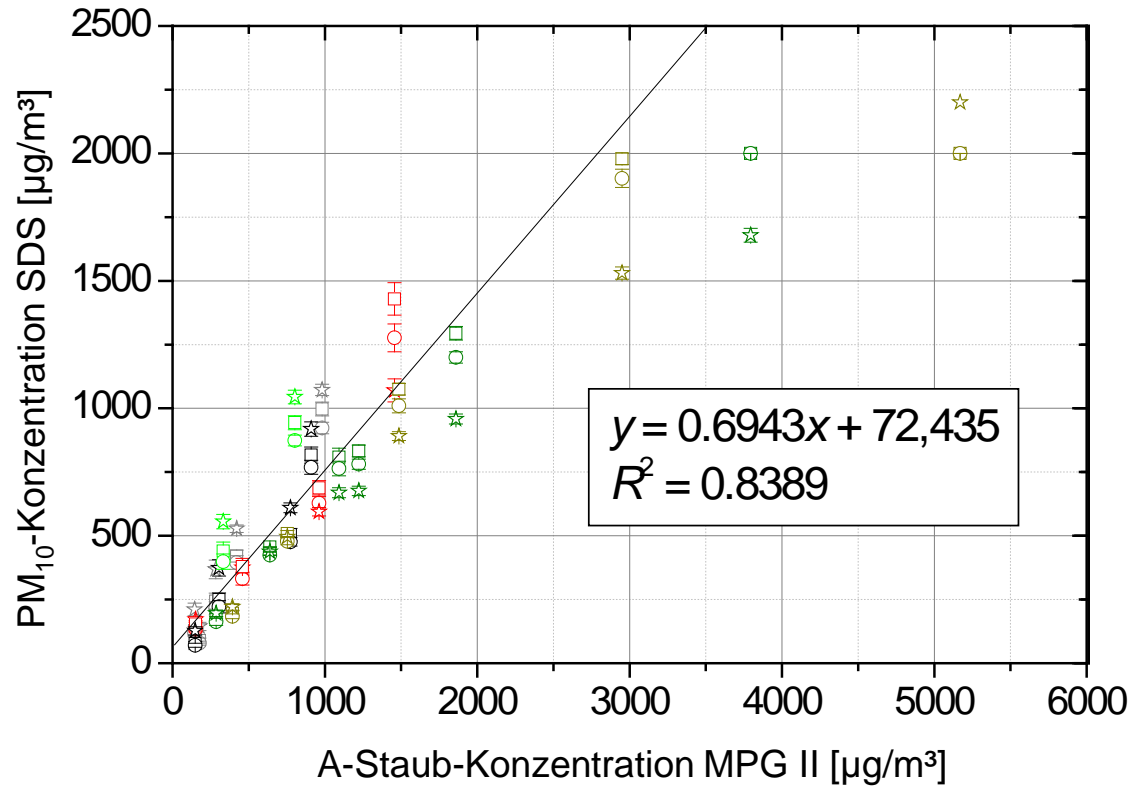
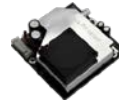
Asbach et al. *Gefahrstoffe – Reinh. Luft* **6** 252 (2018)

- für Arbeitsplätze ist der Staub, der in bis in die Lungenbläschen gelangen kann reguliert (A-Staub ~ PM_{4})



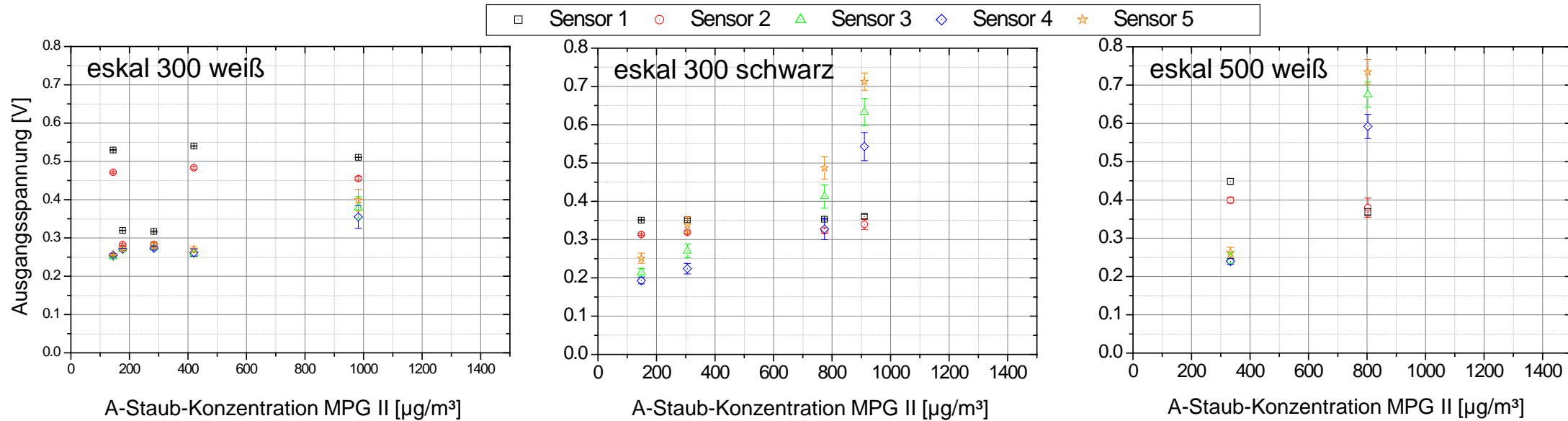
M. Mattenklott et al. *Gefahrstoffe – Reinh. Luft* 71 425 (2011)

- Referenzmessgerät MPG II (horizontaler Sedimentationsabscheider)
- scheidet gemäß A-Staub-Konvention ab und sammelt penetrierenden Staub auf einem Filter
- anschließend gravimetrische Analyse der Filterproben zur Bestimmung der Konzentration



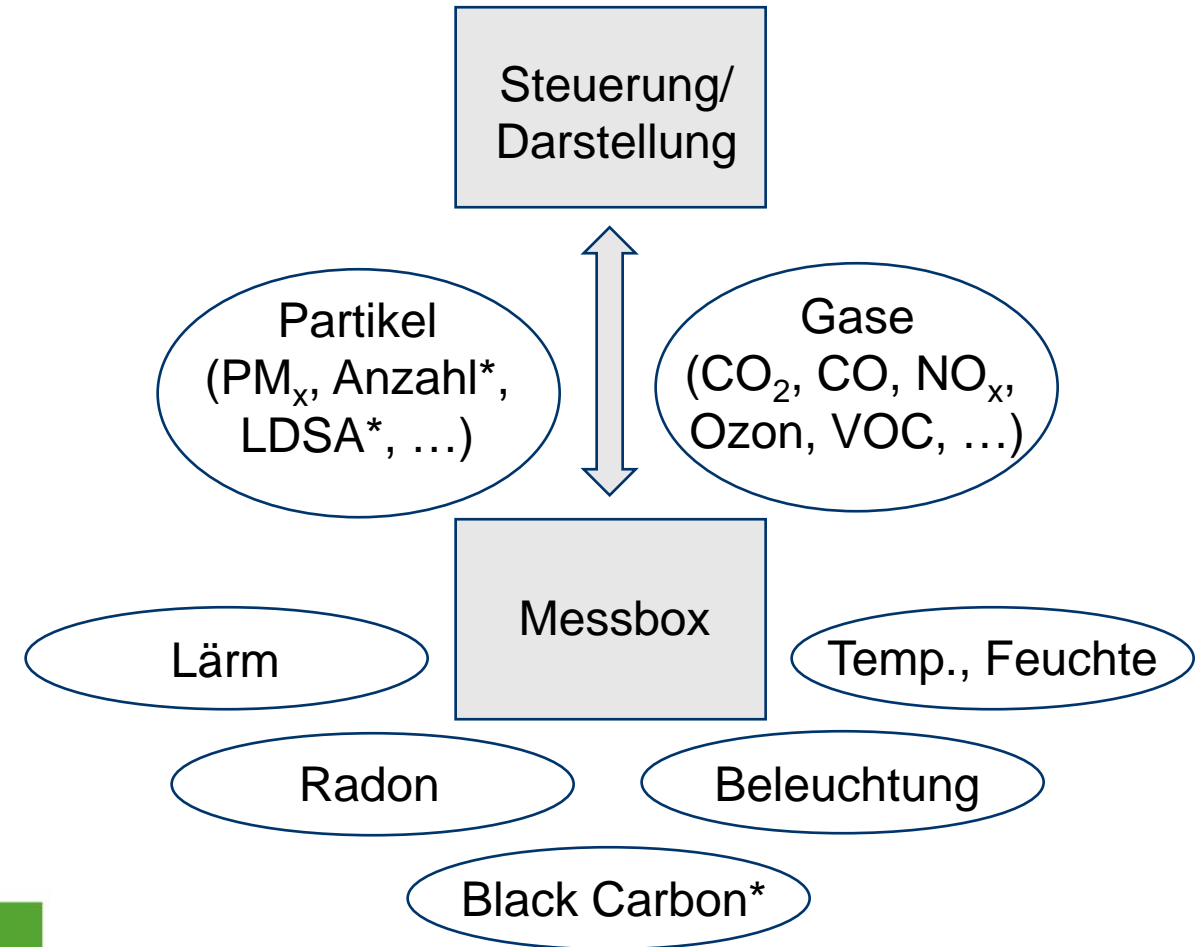
- gute Korrelation für PM₁₀ bis 2 mg/m³, Sättigung für höhere Werte
 - exzellente lineare Korrelation für PM_{2,5} bis 5 mg/m³
- weitere Untersuchungen zu diesem überraschenden Ergebnis

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
eskal 300	□	○	☆
eskal red	□	○	☆
eskal black	□	○	☆
eskal 500	□	○	☆
glass beads	□	○	☆
milled slate	□	○	☆

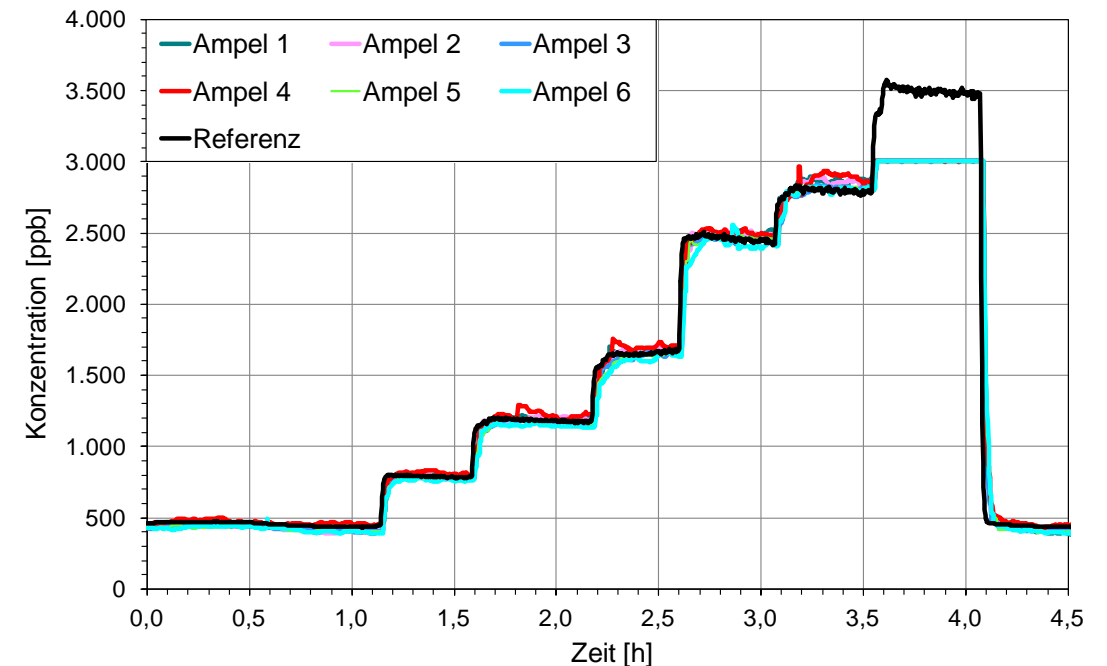
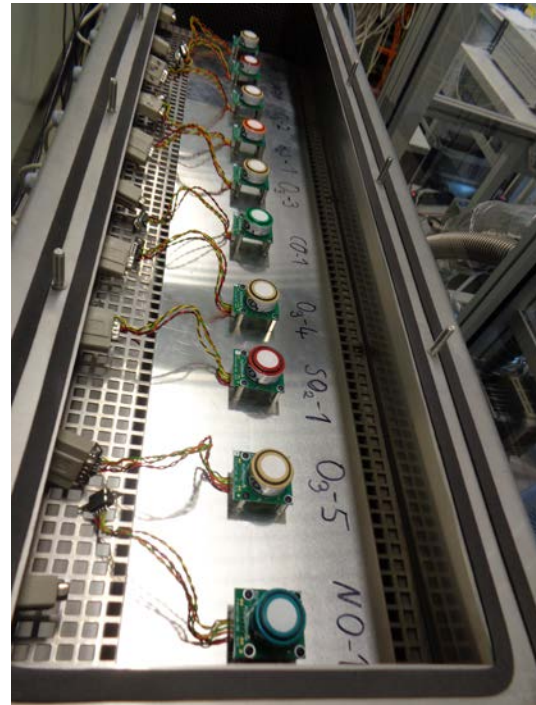


- hohe Streuung zwischen einzelnen Sensoren
- Reaktion erst für vergleichsweise hohe Konzentrationen
→ nicht geeignet für Messungen der Arbeitsplatzkonzentration

- Projekt im Auftrag des Umweltbundesamts
- gemeinsam mit der Universität Duisburg-Essen
- gestartet im März 2018, Laufzeit 3 Jahre
 - Auswahl und Validierung der Sensoren
 - Aufbau einer Multiparameter-Messbox
 - Entwicklung eines Front-Backend-Systems
 - Feldstudien an zwei Schulen
- Vorstudie mit CO₂-Ampeln, um die Bedingungen kennenzulernen und Interesse zu wecken

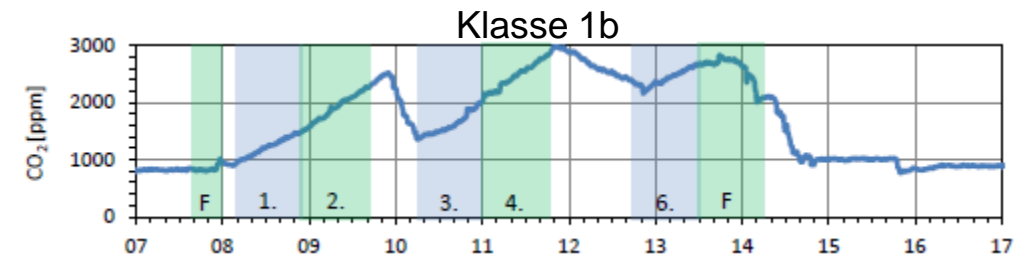
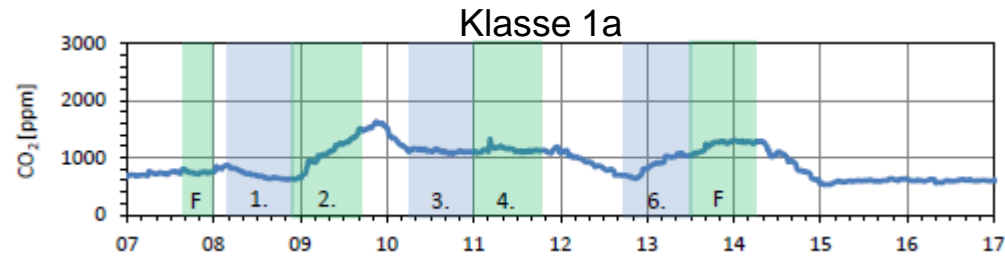


- 12 kommerzielle CO₂-Ampeln EMAQ-25 von Electro-Mation
- Messbereich 0 – 3000 ppm, Genauigkeit ±75 ppm oder 5% vom Messwert
- Validierung an Prüfstand mit definierten CO₂-Konzentrationen

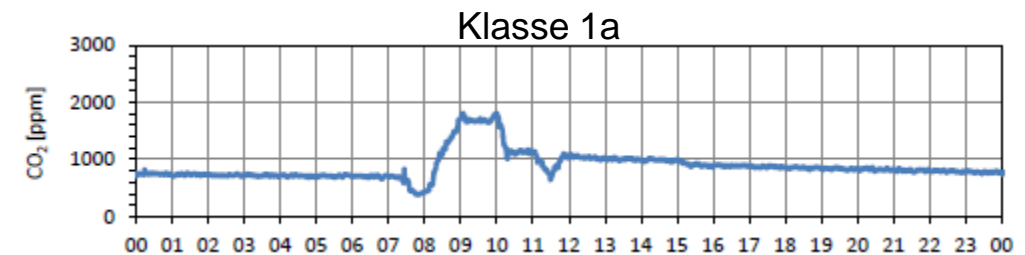
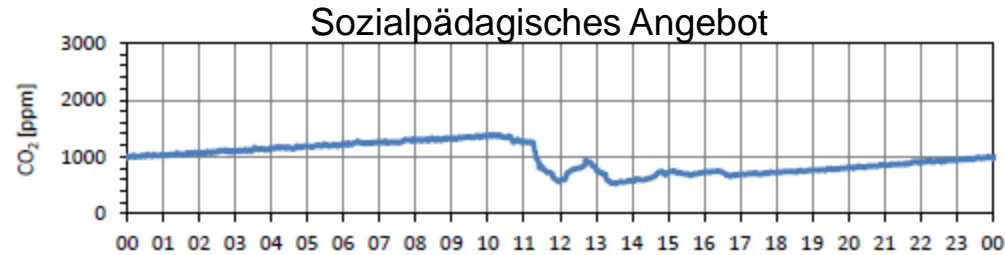


- alle Ampeln arbeiten im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Ungenauigkeiten

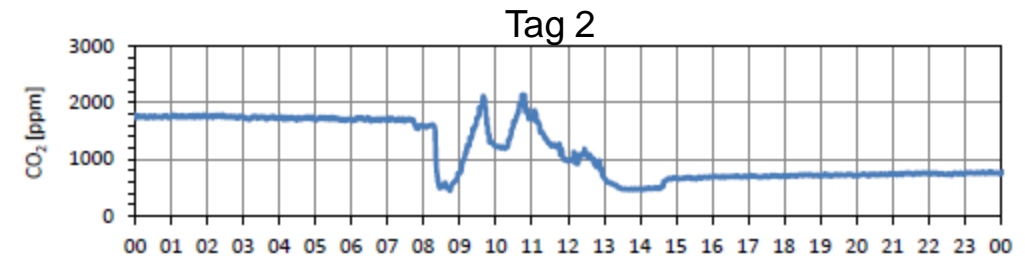
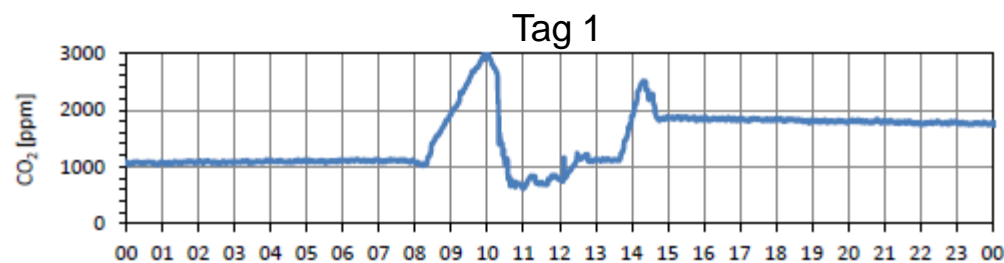
- mehrmonatige Messung an Grundschule (8 Klassenräume, Aula, Mensa, Spezialräume)
- teilweise erhebliche Unterschiede trotz ähnlicher Raumgröße, Belegung und Lüftungsverhalten



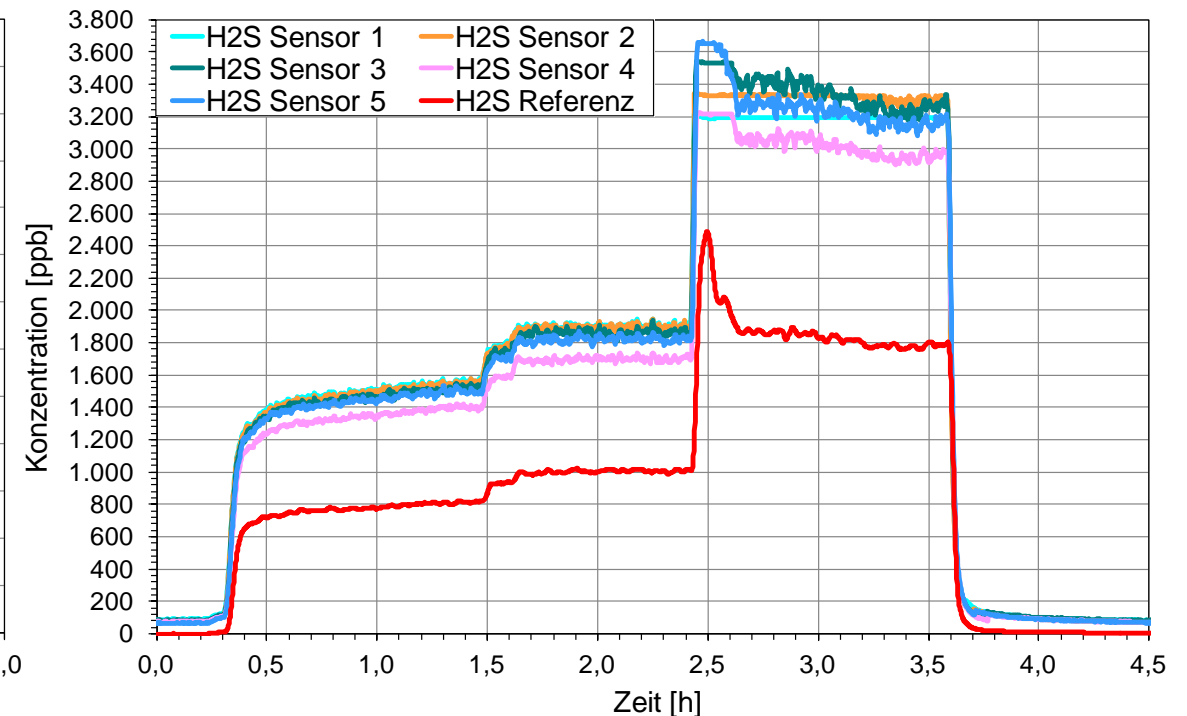
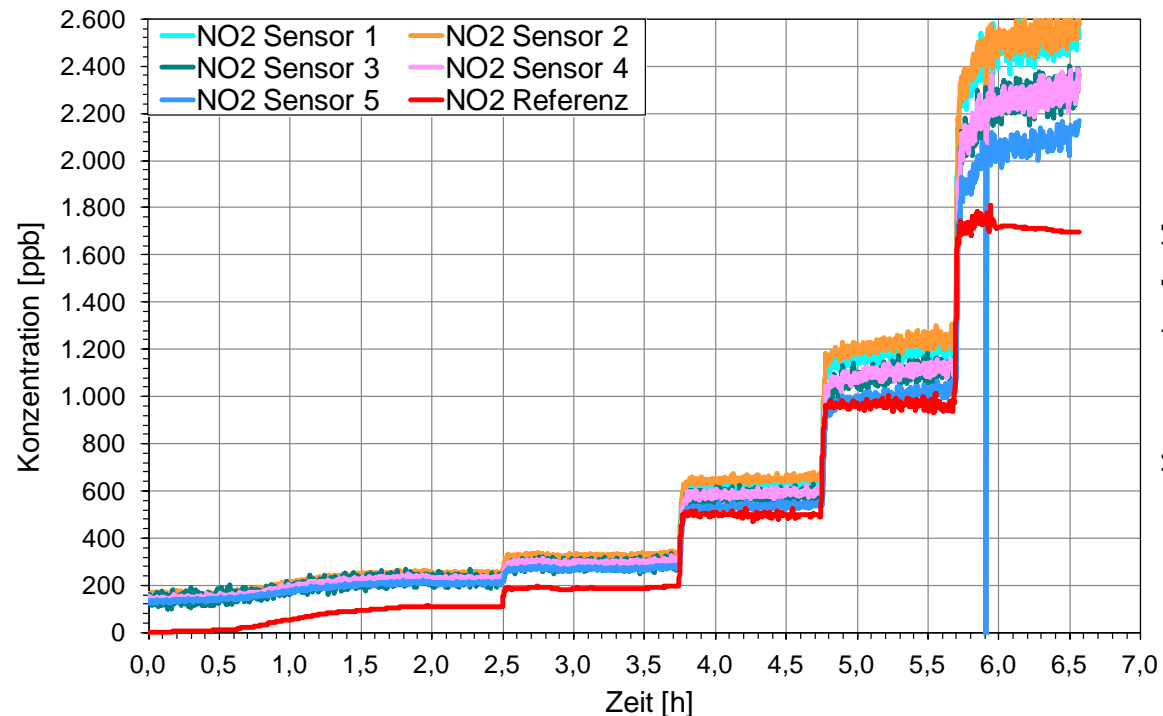
- deutlich unterschiedliche Verläufe über Nacht (eventuell Einfluss von Pflanzen)



- hohe CO₂-Konzentrationen halten sich ohne Lüften über lange Zeiträume

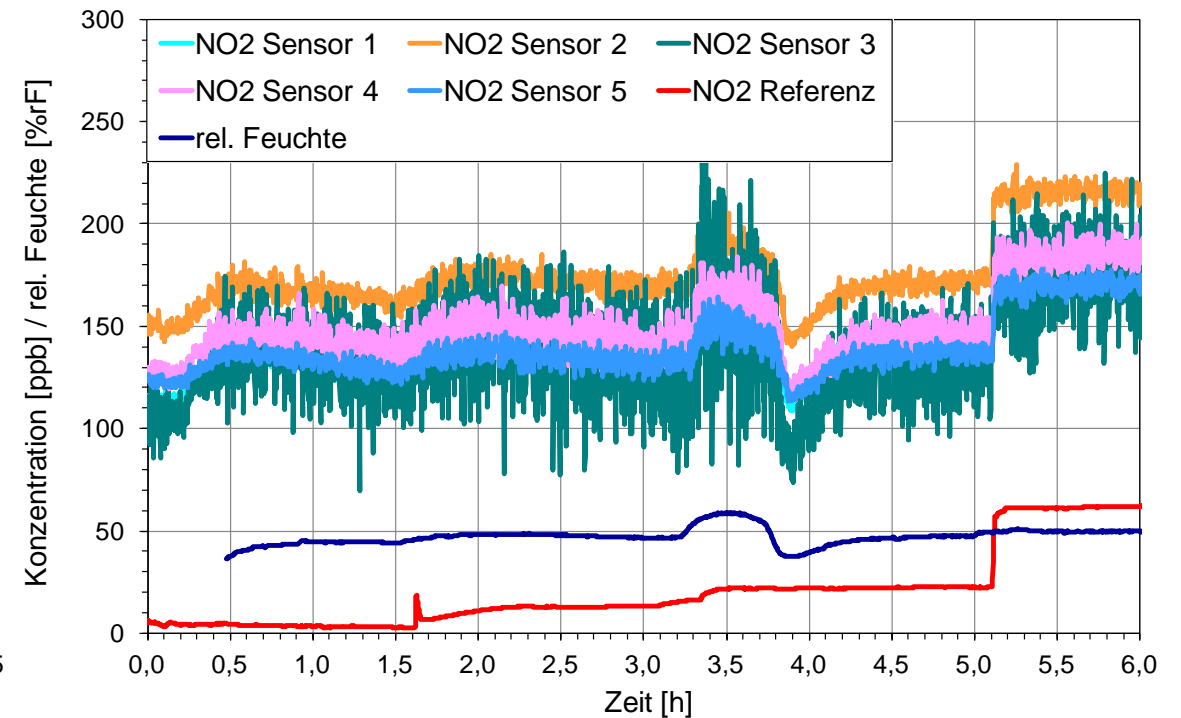
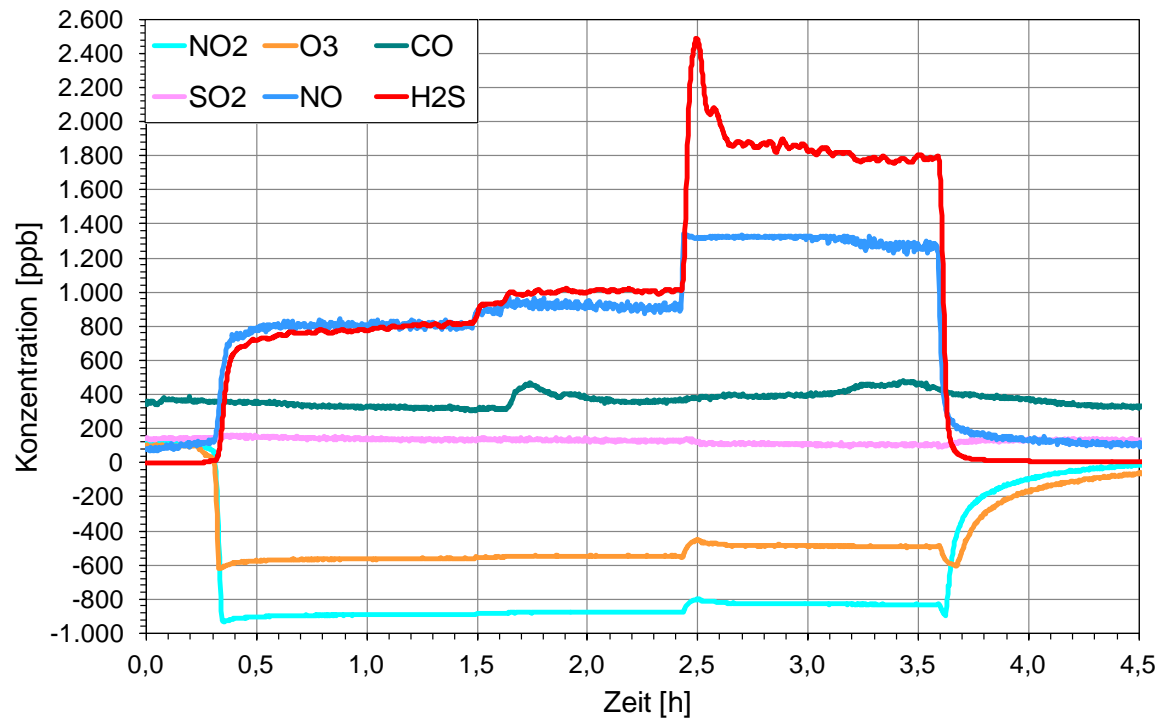


- jeweils fünf Sensoren von Alphasense für CO_2 , CO , NO_2 , NO , SO_2 , H_2S und VOC
- Sensoren mit vier Elektroden → Kompensation von Drift- und Temperatureffekten
- Hersteller liefert Kalibrierung für jede einzelne Kombination aus Board und Sensor

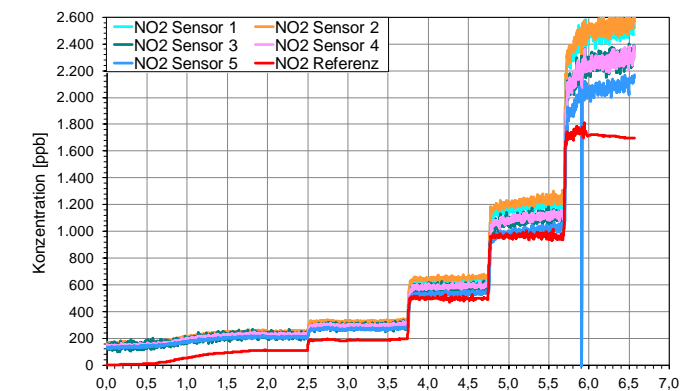
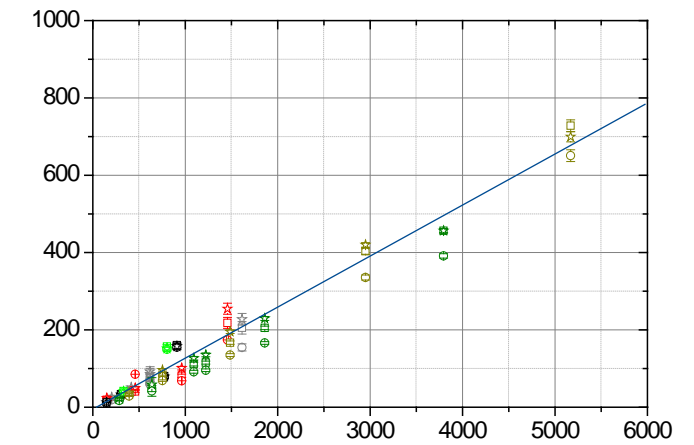


- Verlauf sehr gut abgebildet, jedoch eigene Kalibrierung für genaue Ergebnisse erforderlich

- teils erhebliche positive oder negative Querempfindlichkeiten der Sensoren
 - zumindest bei NO_2 in niedrigen Konzentration starke Feuchteabhängigkeit beobachtet
- derzeit systematische Erfassung und Versuch der Kompensation durch Algorithmen



- kostengünstige Sensoren geeignet für Netzwerke mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
- Partikelmessungen können durch hohe Luftfeuchte verfälscht sein
- Innenraummessungen von der Problematik weniger betroffen
- **Beispiel: Bestimmung der Arbeitsplatzexposition**
 - SDS-Sensoren zeigen sehr reproduzierbare Ergebnisse für $PM_{2,5}$
 - erstaunlich geringe Abhängigkeit vom Aerosol
 - Kalibrierung auf A-Staub-Konzentration möglich
- **Beispiel: Luftqualität an Schulen**
 - Gassensoren liefern nach Einzelkalibrierung gut Ergebnisse
 - starke Querempfindlichkeiten, wenn möglich zu korrigieren
 - nächster Schritt: Konzeption einer Messbox





Bundesanstalt für Arbeitsschutz
und Arbeitsmedizin



Weitere Informationen in Asbach et al. *Gefahrstoffe – Reinh. Luft* **6** 252 (2018)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!